

Министерство образования Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Институт горного дела, геологии и геотехнологий СФУ»

П. Н. САМОРОДСКИЙ

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

**Промышленные типы месторождений металлических
полезных ископаемых**

Красноярск 2008

В данном лекционном курсе рассмотрены основные промышленные типы месторождений металлических полезных ископаемых.

Для каждого вида даны общие сведения, области применения и требования промышленности к качеству, охарактеризованы основные геолого-промышленные типы месторождений металлических полезных ископаемых.

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» и "Прикладная геохимия, петрография и минералогия".

ЛЕКЦИЯ 1

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное месторождение – это участок земной коры, в котором в результате геологических процессов произошло накопление минерального вещества, отвечающего современным требованиям промышленности по качеству и количеству запасов, технологическим свойствам, горно-техническим условиям, и экономически выгодного для эксплуатации.

Промышленные типы это основные "поставщики" данного вида минерального сырья в мировом балансе или в масштабе страны.

Рудопроявление - недостаточное по запасам или качеству скопление полезного ископаемого в земной коре, технологически, горно-технически или экономически невыгодное для разработки.

Месторождения рудных (металлических) полезных ископаемых это: виды минерального сырья, которые перерабатываются плавкой, гидрометаллургическим или иным способом с целью извлечения металлов. Они являются объектами переработки черной и цветной металлургии.

В учебном курсе дан обзор месторождений по металлам. Разделы курса освещают промышленные типы черных, цветных, редких, благородных и радиоактивных металлов, в которых описаны месторождения 56 металлов и их сообществ.

ЛЕКЦИЯ 2

ЧЁРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

В недрах 130 стран общие запасы железных руд оцениваются в 340 млрд т. Наибольшими запасами обладают Россия, Бразилия, Австралия, Украина, Канада и США (50-25 млрд т). Железные руды добывают 55 стран, наибольшую добычу осуществляют Бразилия, Китай, Австралия, Россия, Украина, Индия, США, Канада и ЮАР (от 160 до 28 млн т в год). К уникальным относятся месторождения железных руд с запасами в миллиарды тонн, к крупным и средним - в сотни миллионов тонн, к мелким - в десятки миллионов тонн. Уникальные месторождения насчитываются десятками, крупные - сотнями, мелкие - тысячами.

Цена товарной крупнокусковой железной руды (65 % Fe) в марте 2008 г составляла около 50-55 дол/т с доставкой в порт назначения.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ И ТИПЫ РУД

Гипогенными промышленными минералами железа являются магнетит FeFe_2O_4 , магномагнетит $(\text{Fe},\text{Mg})\text{Fe}_2\text{O}_4$, титаномагнетит (содержит до нескольких процентов TiO_2), гематит Fe_2O_3 и сидерит FeCO_3 , а *гипергенными* — мартит (псевдоморфоза гематита по магнетиту), гидроматит $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, гётит FeOOH ,

гидрогётит $\text{FeOОН} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, шамозит и тюрингит (силикаты железа переменного состава), сидерит (карбонат железа).

Промышленные типы железных руд выделяются в зависимости от их минерального состава: титаномагнетитовые и ильменит-титаномагнетитовые в базитах и ультрабазитах; апатит-магнетитовые (карбонатитовые); магнетитовые, магномагнетитовые (скарновые); магнетит-гематитовые (железистые кварциты); мартитовые, мартит-гидрогематитовые, гидрогематит-мартитовые и гидрогематитовые (богатые руды, образовавшиеся по железистым кварцитам); сидеритовые; гидрогётитовые (бурожелезняковые); хлоритовые, или шамозит-тюрингитовые, и гидрогётитовые оолитовые (осадочные); гётит-гидрогётитовые (природнолегируемые руды коры выветривания).

В России добываются руды с содержанием железа от 20 % и выше. Среди них различают природно богатые ($\text{Fe} > 50 \%$) и бедные ($\text{Fe} < 50 \%$), требующие обогащения. *Богатые руды* разделяются на доменные и мартеновские.

Железные руды, требующие обогащения, в настоящее время обеспечивают в России 80 % товарного производства. Они подразделяются на легко- и труднообогатимые, что зависит от их минерального состава и текстурно-структурных особенностей. *Легкообогатимыми* являются руды магнетитового состава и прежде всего - магнетитовые кварциты. К *труднообогатимым* относят те, в которых железо связано со скрытокристаллическими и колломорфными образованиями.

Продукцией горно-обогатительных предприятий являются концентраты, агломерат и окатыши. Концентраты, получаемые при переработке железистых кварцитов, скарновых магнетитовых и апатит-магнетитовых руд, должны содержать не менее 62-66 % железа, а при переработке оолитовых бурых железняков - 48-49 %.

Из руд, подвергающихся обогащению, в самостоятельные концентраты извлекают минералы титана, меди, кобальта, редких металлов, апатит. Флотацией хвостов мокрой магнитной сепарации комплексных руд могут быть получены золото-сульфидный и боратовый концентраты.

Легирующие компоненты (никель, кобальт, марганец) переходят из чугуна в сталь и являются полезными примесями. Из шлаков металлургического передела титаномагнетитовых концентратов извлекается ванадий. Фосфорсодержащие шлаки используются в качестве удобрений.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

магматические,
карбонатитовые,
скарновые,
вулканогенные гидротермальные,
вулканогенно-осадочные,
кор выветривания и осадочные,
эксфильтрационные,
метаморфизованные.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Титаномагнетитовые и ильменит-титаномагнетитовые месторождения известны в России - в Карелии (Пудожгорское), на Урале (Качканарское, Гусевогорское, Первоуральское, Копанское и др.), Горном Алтае (Харловское), в Читинской области, на трассе БАМ (Чинейский массив); за рубежом - в США (Тегавус), Норвегии (Телнесс), Швеции (Таберг), Танзании (Лиганга) и др.

Рудные тела представляют собой зоны концентрированной вкрапленности с шпировыми и жило-линзобразными обособлениями титаномагнетита в интрузивах габбро-пироксенит-дунитовой, габбровой, габбро-диабазовой и габбро-анортозитовой формаций.

Основным рудным минералом месторождений этой группы является титаномагнетит со структурой распада твердого раствора, представляющего собой магнетит с тонкопластинчатыми вростками ильменита и шпинели. В подчиненном количестве присутствуют зерна магнетита, ильменита и шпинели. Сопутствующими минералами служат породообразующие минералы вмещающих пород - оливин, пироксены, амфиболы, серпентин и др.

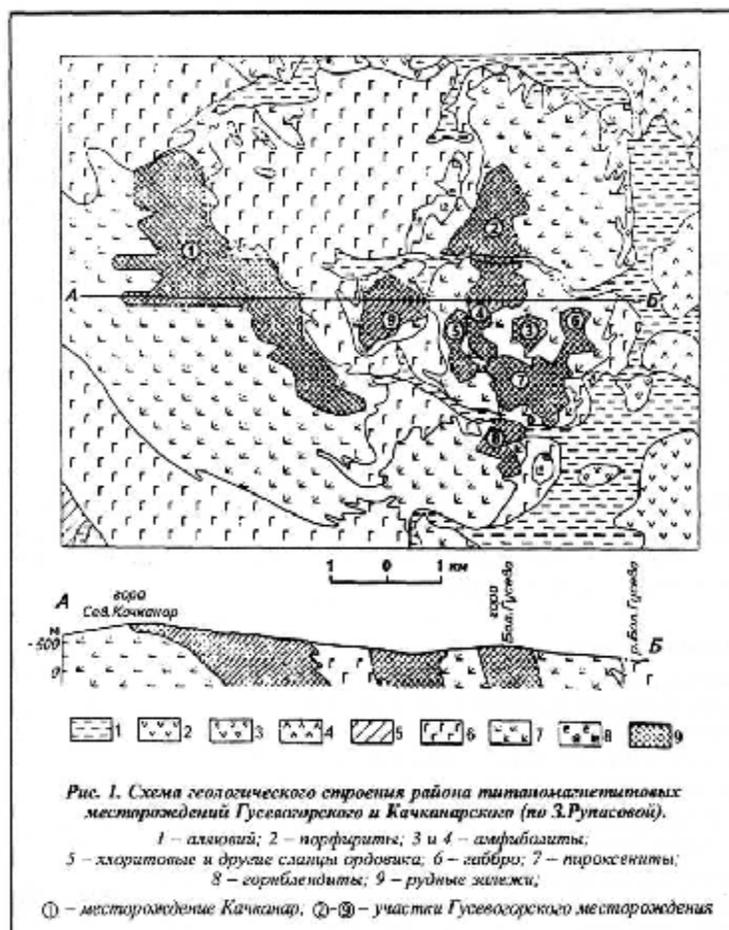
Руды характеризуются промышленным содержанием железа, ванадия, иногда титана, низким содержанием серы и фосфора (сотые доли процента) и рассеянной платины.

Качканарское рудное поле. Находится в Исовском районе Свердловской области. Рудоносный Качканарский габбро-пироксенитовый плутон имеет площадь около 110 км² (рис. 1).

Рудные тела образованы вкрапленностью титаномагнетита, реже шпировыми выделениями и прожилками массивных руд в основном в пироксенитах, габбро и горнблендитах, в значительно меньшей мере в перидотитах и оливинитах.

Основной рудный минерал - титаномагнетит - содержит 2-18 % ильменита, а также изоморфную примесь ванадия в магнетите.

Запасы Гусевогорского месторождения 3,4 млрд т, Качканарского - 3,3 млрд т при среднем содержании железа в рудах 16,6 %.



КАРБОНАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Перовскит-титаномагнетитовые и апатит-магнетитовые месторождения в щелочно-ультраосновных интрузивах центрального типа известны в России на Балтийском щите (Африканда, Ковдор) и Сибирской платформе (Гулинский массив, Маймечя-Котуйская провинция), за рубежом на Африканской платформе (Сукулу - в Уганде; Дорова - Зимбабве; Люлекоп - ЮАР).

Железные руды, в которых рудные минералы представлены титаномагнетитом и цериевым перовскитом - кнопитом, сосредоточены преимущественно в центральной части интрузивов. В интрузивах со значительным развитием карбонатитов распространены апатит-форстеритовые, флогопит-форстеритовые, апатит-кальцитовые и кальцитовые образования по ультраосновным породам. Железорудные тела в таких массивах представляют собой в основном апатит-форстеритовые породы с обильной вкрапленностью, жилами и прожилками магнетита, неравномерной вкрапленностью пироклора и бадделеита.

Ковдорское рудное поле находится в Кировском районе Мурманской области, месторождение приурочено к одноименному массиву ультраосновных щелочных пород и карбонатитов площадью 40 км².

Магнетитовые руды и магнетитсодержащие породы слагают вытянутое в субмеридиональном направлении рудное тело длиной свыше 1,3 км и шириной 100-800 м, залегающее среди ийолитов и пироксенитов в юго-западной части массива (рис. 2); разведано оно до глубины 1200 м. Падение рудных тел под углом 70-90°. Среднее содержание в рудах (в % мас): Fe - 27,5; MgO - 14; CaO - 11; P - 2,9; S - 0,3.

Разведанные запасы магнетитовых руд - 540 млн т. Кроме магнетитового из руд месторождения извлекают апатитовый и бадделеитовый концентраты.

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Скарново-магнетитовые месторождения широко распространены в России на Урале (Высокогорское, Гороблагодатское, Северо-Песчанское и др.) и Западной Сибири (Таштагольское, Абаканское, Тейское и др.), в Кустанайской области Казахстана (Сарбайское, Соколовское, Качарское и др.), в Азербайджане (Дашкесанское), а также в США, ФРГ, Чехии, Италии, Болгарии, Румынии, Китае, Японии и других странах.

Скарново-магнетитовые месторождения преимущественно связаны с плагиогранитами. По условиям образования они подразделяются на следующие формации: известково-скарновые, магнезиально-скарновые и магнезиально-известково-скарновые, скаполит-альбитовые и скаполит-альбит-скарновые, магнетитовые и гематитовые водно-силикатные.

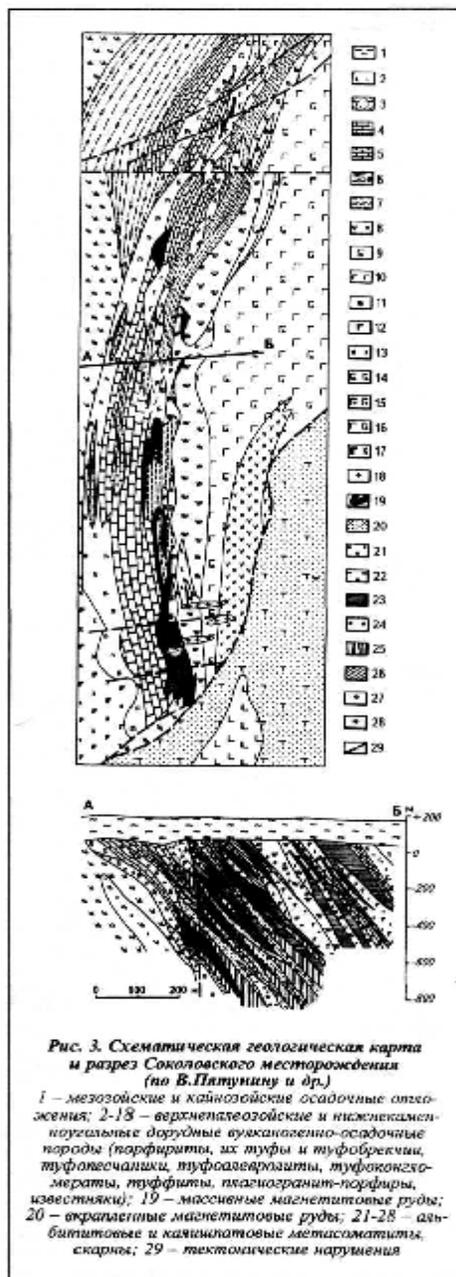


Соколовское и Сарбайское месторождения расположены в 45 км к юго-западу от г. Кустаная (Казахстан). Основной структурой района является Соколовско-Сарбайская антиклиналь, осложненная складками второго порядка и разрывными нарушениями. Соколовское месторождение приурочено к восточному крылу антиклинали, а Сарбайское - находится в западном крыле.

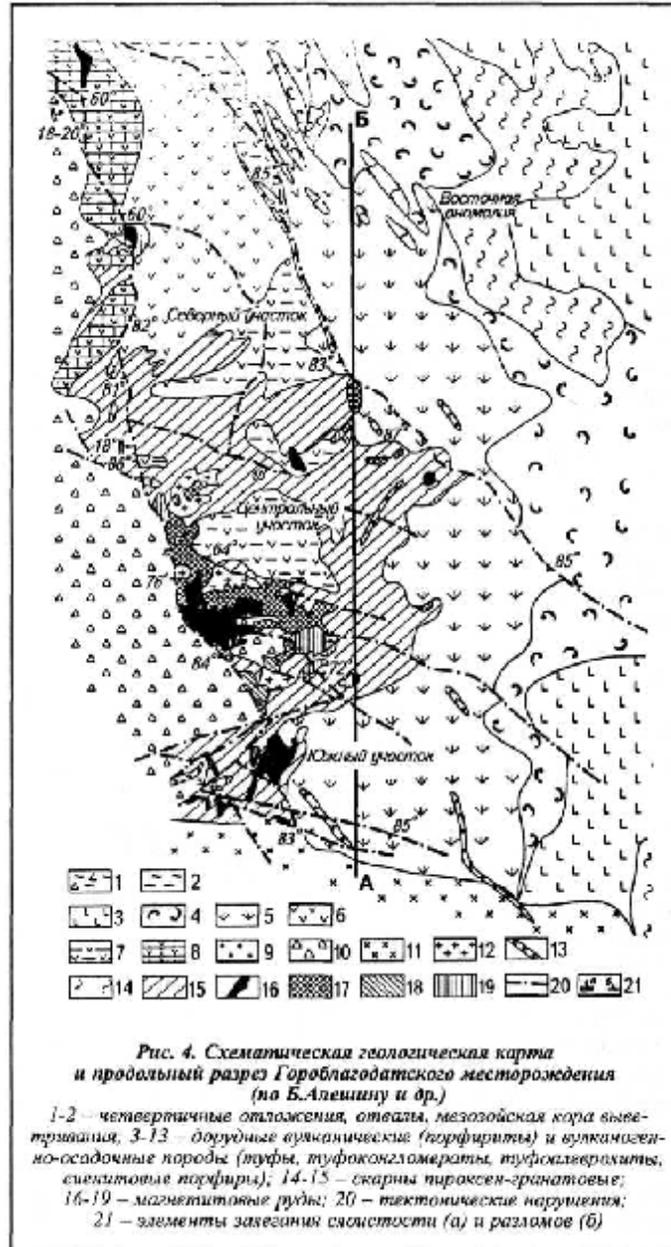
Рудная зона прослежена разведочными скважинами на протяжении 9 км (рис. 3) при ширине 100-600 м и на глубину до 1100 м. На месторождении разведано более 240 рудных тел, прослеженных по простиранию на 100-700 м и по падению на 100-1100 м, при мощности 2-250 м. Центральные участки рудных тел сложены богатыми массивными рудами, которые к периферии постепенно переходят во вкрапленные руды.

Главные минералы руд - магнетит, гематит (мартит) скаполит, альбит, диопсид, гранат, актинолит, эпидот; второстепенные - везувиан, пирит, халькопирит, сфалерит, апатит, цеолиты и кальцит.

Богатые руды содержат в среднем (в % мас): Fe - 55,6; S - 2,9; P - 0,07; бедные руды - Fe - 39,2; S - 2,5; P - 0,11. Запасы магнетитовых руд месторождения превышают 900 млн т.

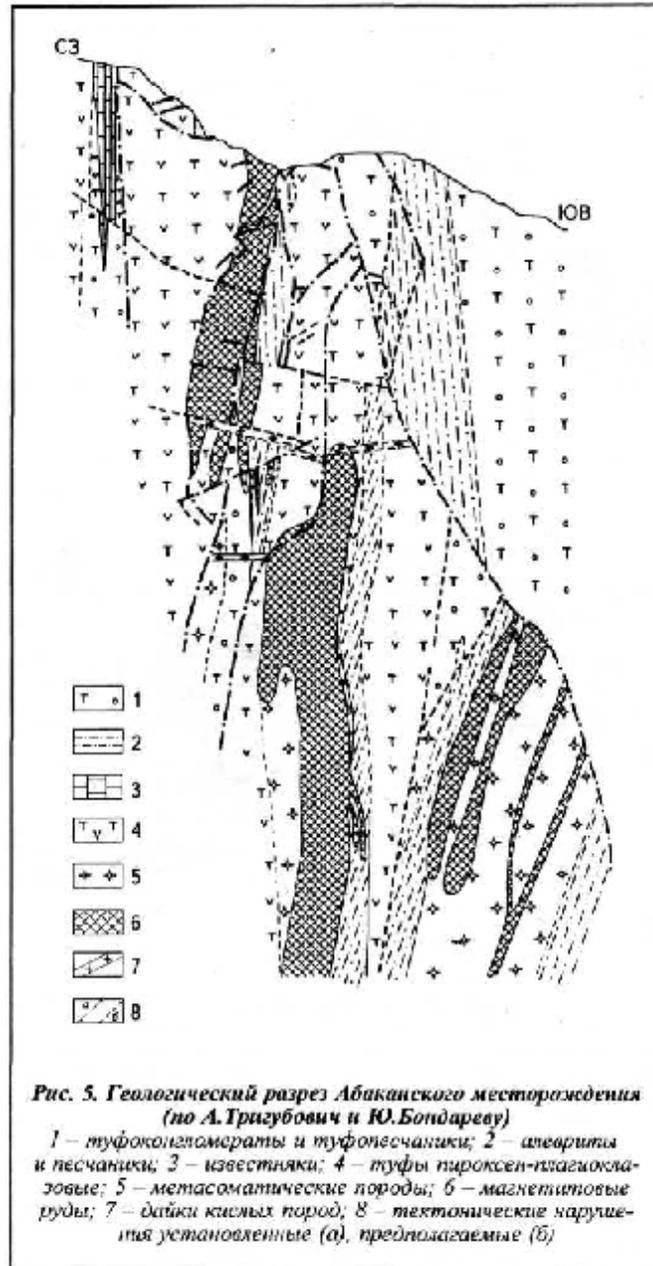


Гороблагодатское месторождение расположено на северо-восточной окраине г. Кушвы Свердловской области в зоне секущего контакта диорит-сиенитового массива с вулканическими и вулканогенно-осадочными породами. Рудовмещающие породы - порфириды, туфоконгломераты, туфопесчаники и туфоалевролиты позднесилурийского возраста. На контакте с диорит-сиенитовой интрузией вмещающие породы превращены в пироксен-гранатовые и магнетитовые скарны. На месторождении выявлено 15 рудных тел, пространственно и генетически связанных с зонами скарнирования или скаполитизации. Размеры рудных тел по длине от 200 до 930 м, по мощности - от 2 до 84 м, по падению прослежены на 530-1600 м. Руды сложены магнетитом, гранатом и эпидотом, оспенные - магнетитом, ортоклазом, скаполитом и пироксенами. Второстепенные минералы представлены сульфидами (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит), кальцитом, хлоритом, альбитом и цеолитами. В среднем руды содержат (в % мас): Fe - 35,5; SiO₂ - 18,8; P - 0,05; S - 0,68. Запасы железных руд - 160 млн т.



Абаканское месторождение находится в Республике Хакасия на северных отрогах Западного Саяна. Рудовмещающими породами являются кембрийские алевролиты и песчаники с прослоями известняков. В районе отмечены интрузии плагиогранитов и пироксеновых диоритов, а также многочисленные дайки плагиогранит-порфиров, альбит-порфиров, диабазов и порфиритов. Рудовмещающие породы смяты в складки и смещены дизъюнктивными нарушениями, часто пологопадающими (рис. 5).

Разведано четыре рудных тела, имеющих протяженность по простиранию 550-1000 м, по падению - 430-1150 м при средней мощности 14-60 м. Руды сложены магнетитом. Основные сопутствующие минералы - хлорит, кальцит и кобальтсодержащий пирит. Преобладает пятнистая текстура руд, встречаются массивная, полосчатая и брекчиевая. Запасы железных руд 128 млн т. со средним содержанием железа 41,5 % , серы - 2,36 и фосфора в рудах верхнего этажа - 0,19, нижнего - 0,7 %.



ВУЛКАНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Магномагнетитовые месторождения, парагенетически связанные с траппами, известны на Сибирской платформе, где они образуют ряд железорудных районов: Ангаро-Илимский, Ангаро-Катский, Средне-Ангарский, Канско-Тасеевский, Тунгусский, Бахтинский и Илимпейский. Наиболее крупные и разведанные месторождения этой группы - Коршуновское, Рудногорское, Нерюндинское и Тагарское. Месторождения залегают в палеозойских отложениях платформенного чехла. Распределение магномагнетитовых месторождений в пределах платформы тесно связано с расположением галогенных отложений в основании платформенной толщи, зон разломов и интенсивного проявления траппового магматизма. При внедрении силлов долеритов в результате нагрева рассолов по тектоническим разрывам и трубкам взрывов проникали растворы, вызвавшие метасоматические изменения пород и оруденение. Метасоматические процессы обусловили развитие

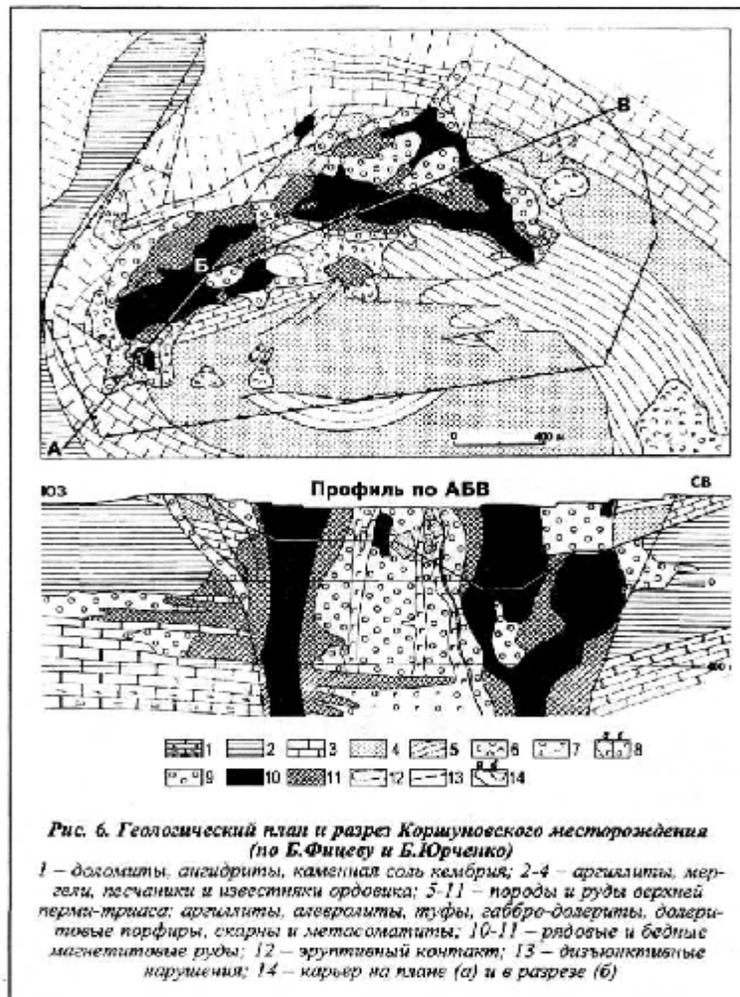
скарноподобных и более низкотемпературных хлорит-серпентинит-карбонатных метасоматитов.

Руды представлены зонами вкрапленности в метасоматитах, жильными телами и пластообразными залежами метасоматического замещения карбонатных пород. Роль экранов при образовании пластообразных залежей играли пласты аргиллитов, тонкозернистых известняков и трапповых силлов. Рудообразующий магнетит всегда содержит изоморфную примесь магния и относится к разновидности магномагнетита. С увеличением глубины содержание магния в магнетите убывает.

Коршуновское месторождение находится в районе Железногорска Иркутской области, на железнодорожной магистрали Тайшет-Лена. Месторождение локализовано в чехле плат-формы, сложенном отложениями верхнего кембрия и ордовика. Изверженные породы района представлены габбро-долеритами.

Основное рудное тело вытянуто с юго-запада на северо-восток на 2,5 км при ширине 400-600 м. На глубину рудные тела суживаются и прослежены до 1100 м. (рис. 6).

Наиболее развиты брекчиевые и вкрапленные руды, реже встречаются массивные и полосчатые руды; также встречаются псевдооолитовые структуры, связанные с быстрой кристаллизацией растворов. Главный рудный минерал - магномагнетит, содержащий до 6 % оксида магния; второстепенный - гематит. Разведанные запасы месторождения равны 260 млн. т со средним содержанием железа - 27,9 %, серы - 0,02 % и фосфора - 0,2 %.



ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К месторождениям этой группы относятся Западный Каражал в Центральном Казахстане; Холзунское - в Горном Алтае, Терсинская группа - в Кузнецком Алатау России; Лан и Дилль - в ФРГ; Гара Джебилет и Мешери Абделазис - в Алжире. Месторождения располагаются в синклинальных зонах эвгеосинклинальных областей. У одних месторождений, например Холзунского, проявлена самая тесная связь с вулканогенными фациями вулканогенно-осадочных формаций, выражающаяся в залегании рудных пластов среди туфов и туффитов с наличием прослоев и линз вулканических пород в самом рудном пласте, а также присутствием в составе руд пирокластических частиц. В других, например Западно-Каражальском, вмещающими рудные пласты и линзы породами служат переслаивающиеся известняки, кремнисто-карбонатные яшмовидные и аргиллиты, а подстилается рудоносная толща - типично вулканогенно-осадочными формациями.

Западный Каражал. Это месторождение находится в 110 км к юго-западу от ст. Жана-Арка Карагандинской области Казахстана в Атасуйском железорудном районе. В геологическом строении месторождения принимают участие эффузивные и туфогенные породы нижнего девона и осадочные породы верхнего девона - нижнего карбона Джаильминской мульды. До глубины 600 м породы залегают под углом 45-50°, далее круто погружаются.

Изверженные породы представлены дайками диоритов и диоритовых порфиритов, пересекающими как вулканические, так и осадочные отложения.

Рудная залежь образует пластообразное тело, согласно залегающее с вмещающими породами. Она прослежена по простиранию на 6,5 км, по падению до 800 м, мощность залежи 20-40 м, на западном фланге мощность уменьшается до полного выклинивания.

На месторождении установлено три промышленных типа руд: магнетитовые, магнетит-гематитовые и гематитовые. Первые два типа отличаются повышенным содержанием германия. Главные рудные минералы - гематит, магнетит; второстепенные - сидерит, барит, пирит; в небольших количествах встречаются арсенопирит, халькопирит, сфалерит, галенит. В зоне окисления, прослеживающейся на несколько десятков метров, распространены мартит и гидроксиды железа. Текстуры руд полосчатые и массивные; структуры зернистые, порфиробластовые.

Разведанные запасы руд 340 млн т со средним содержанием (в % мас): Fe - 55,5; SiO₂ - 12,4; S - 0,6; P - 0,03.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Месторождения выветривания являются зонами окисления месторождений сидери-товых и скарново-магнетитовых руд, а также ультраосновных пород. Образование зон окисления связано с эпохами древнего и современного выветривания.

Сидеритовые руды в зоне окисления переходят в смесь минералов гидроксидов железа (гётита, гидрогётита, гидрогематита). За счет скарново-магнетитовых руд возникают мартит-гидрогематитовые руды.

Месторождения гётит-гидрогётитовых руд являются верхней охристой зоной коры выветривания серпентинизированных дунитовых и перидотитовых массивов. Иногда с ними сопрягаются переотложенные руды, являющиеся озерными и морскими отложениями продуктов размыва коры выветривания. Они образуют пласты и имеют оолитовую текстуру.

Железные руды коры выветривания ультрабазитов состоят в основном из гидрогётита и примесей халцедона, опала, нонtronита, железистых хлоритов, магнезита, реликтовых акцессорных хромшпинелидов, пылеватого магнетита. Они содержат примесь хрома, никеля и кобальта и относятся к природнолегируемым

образованиям. Примерами подобных месторождений являются Серовское на Северном Урале, Елизаветинское на Среднем Урале, Аккермановское, Ново-Киевское, Ново-Петропавловское на Южном Урале, Малкинское на Северном Кавказе. За рубежом крупные месторождения железных руд кор выветривания ультрабазитов известны в экваториальных областях - на Кубе, Гавайских островах, Филиппинах, Гвинее, Гвиане и Суринаме.

Аккермановское месторождение, входящее в Орско-Халиловскую группу месторождений природно-легированных железных руд, расположено в 20 км к западу от г. Орска. Район месторождения представлен палеозойскими и более древними складчатыми комплексы Урала с прорывающими их основными и ультраосновными интрузивами.

На палеозойских породах и заключенных среди них серпентинитах развита триас-юрская кора выветривания. На известняках и кремнистых сланцах с резким несогласием лежат юрские континентальные отложения, состоящие из щебенистого делювия, песков, глин и галечников и включающие два рудных горизонта - нижний сидеритовый и верхний гётит-гирогётитовый.

Рудные тела нижнего горизонта пластообразные, в рудах наблюдаются выклинивающиеся глинистые прослои. Мощность рудной толщи в центральной части около 35 м, к периферии она уменьшается. Толща сложена сидерит-глинистыми и сидерит-гидрогётитовыми оолито-брекчиевыми рудами, сидерит которых в разной степени окислен. Отложения верхнего рудного горизонта заполняют карстовые впадины в известняках, в связи с чем мощность рудных тел резко изменчива и колеблется от 1 до 50 м, в среднем 14 м. Частично верхний горизонт лежит на слабо закарстованных известняках и глинах, имея правильную пластовую форму. Верхний горизонт сложен охристо-глинистыми, кусковато-щебенистыми (состоящими из обломков, конкреций и жеод), конгломерат-оолитовыми и галечными гидрогётит-гидрогематитовыми рудами.

В сидеритовых рудах в среднем содержится (в % мас): Fe - 27,1; Ni - 0,29; Cr - 1,43. Среднее содержание железа в гидрогётит-гидрогематитовых рудах 32 %. Среди них выделены руды I сорта с содержанием железа более 35 %, никеля - около 0,4 %, хрома - более 1 %. Разведанные запасы руд 158 млн. т.

ОСАДОЧНЫЕ МОРСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На территории СНГ платформенные морские месторождения сидерит-лептохлорит-гидрогематитовых бобово-оолитовых руд в карбонатно-терригенных отложениях представлены мезозойско-кайнозойскими железорудными бассейнами - Западно-Сибирским в России, Аятским - в Казахстане и Керченским - на Украине. Рудоносные формации входят в состав свит чехла Западно-Сибирской эпипалеозойской плиты (Западно-Сибирский и Аятский бассейны) или краевого прогиба области альпийской складчатости (Керченский бассейн).

Пологозалегающие рудные пласты принадлежат к прибрежно-морским фациям мезокайнозойского возраста. В Керченском и Аятском бассейнах по одному рудному пласту, в Западно-Сибирском - до четырех пластов при средних мощностях 2-20 м.

Руды сложены в основном оолитами различных размеров гидрогётитового, гематитового, леп-тохлоритового или сидеритового состава, обломками оолитов и песчано-глинистого материала, сцементированных теми же минералами. В Западно-Сибирском и Аятском бассейнах проявляется характерное изменение минерального состава руд по направлению от бывшей береговой линии в сторону моря: гидрогётит постепенно уступает место лептохлоритам.

За рубежом наиболее крупным объектом данной формации является Лотарингский бассейн мелкооолитовых руд площадью 1100 км², расположенный в основном на территории Франции, частично в ФРГ, Бельгии и Люксембурге.

Керченский железорудный бассейн характеризуется двумя типами месторождений морских платформенных осадочных оолитовых железных руд киммерийского возраста. Первый тип месторождений приурочен к крупным тектоническим брахисинклинальным структурам - мульдам; второй тип связан с компенсационными прогибами в зоне развития грязевого вулканизма, так называемыми "вдавленными синклиналиями".

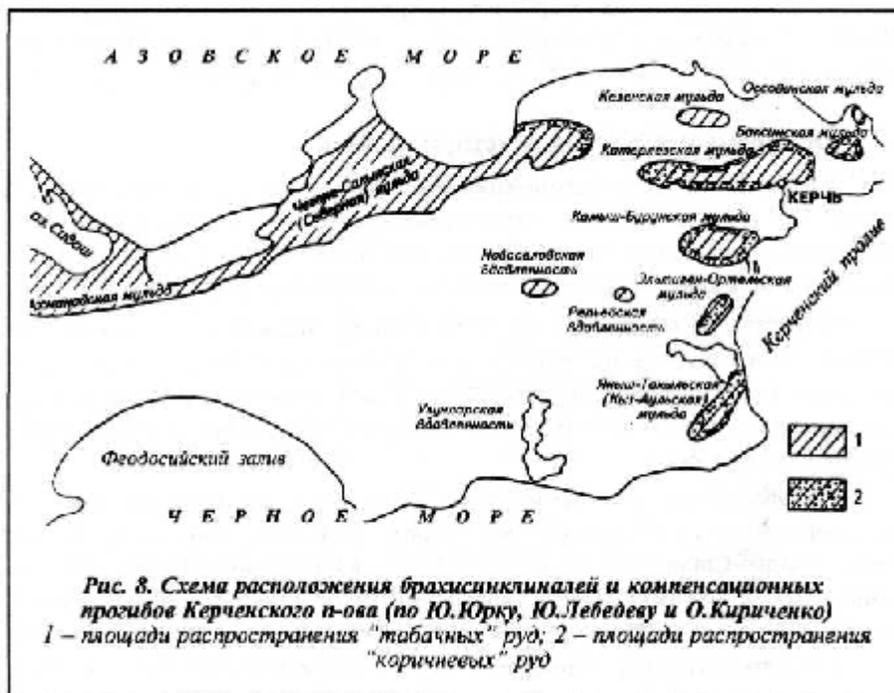
Во всех мульдах и прогибах рудный пласт среднекиммерийского возраста подстилается известняками понтического яруса или глинами нижнекиммерийского яруса и покрывается глинами с примесью песчанистого и алевролитового материала верхнекиммерийского яруса. Мощность рудных пластов в центральных частях месторождений 25-40 м, а в краевых снижается до 0,5 м (рис. 8, 9).

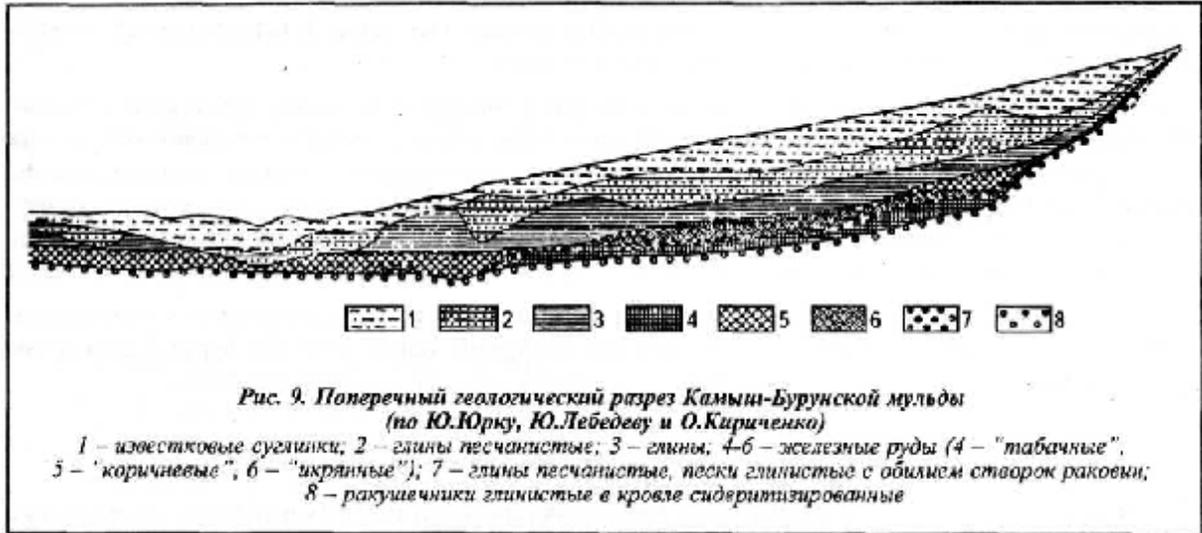
Главные типы руд - "табачные" и "коричневые". Второстепенными (малораспространенными) являются мангано-сидерит-родохрозитовые конкреционные и марганцево-железистые "икряные" - руды, отличающиеся от коричневых повышенным содержанием марганца.

Главные минералы табачных руд - гидрогётит, аллофаноид и смектит, а также карбонаты мангансидерит-родохрозитового ряда. В обломках оолитов часто встречаются кварц и полевой шпат, реже наблюдаются фосфаты (вивианит и керченит), гидроксиды марганца (псиломелан, вернадит, пиролюзит) и пирит. Редкой находкой является реальгар.

Главные минералы коричневых руд - гидрогётит и смектит, второстепенные - псиломелан, пиролюзит, гипс, арагонит, кальцит, пирит, керченит, кварц, полевой шпат и глауконит. Основные текстуры руд - оолитовая и пизолитовая. В коричневых рудах содержится (в % мас): Fe - 37,5; MnO - 3,0; V₂O₅ - 1,19; P - 1,0; S - 0,06; As - 0,13.

Запасы железных руд главнейших месторождений Керченского бассейна - 1,5 млрд т, в том числе 560 млн т коричневых руд.





МОРСКИЕ РОССЫПИ

В пляжевых песках вдоль побережья Камчатки и Курильских островов наблюдается обогащение магнетитом до глубины 4-5 м. На Камчатке обогащенные пески залегают в морских террасах. В Ручарском месторождении на о. Итуруп пляжевый песок содержит до 7,5 % железа, при обогащении дает руду с содержанием железа 48 %, оксида титана - 8,2, оксида ванадия - 0,23. Прогнозные ресурсы этой провинции составляют 1-2 млрд т.

За рубежом месторождения магнетитовых пляжевых песков разрабатываются в Индии, Австралии и Новой Зеландии. Легкость обогащения, большие запасы и комплексность привлекают к ним все большее внимание.

ОСАДОЧНЫЕ КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Гидрогётитовые бобово-оолитовые озерно-болотные месторождения представлены большим числом мелких месторождений, особенно на Восточно-Европейской платформе. Руды сложены скоплениями гидрогётитовых жеод и оолитов в глинисто-песчанистых озерно-болотных отложениях. Руды характеризуются низким содержанием железа (30-40 %). В настоящее время месторождения этой формации утратили промышленное значение.

Сидерит-лептохлорит-гидрогётитовые месторождения в древних речных отложениях вошли в число промышленных после открытия крупного Лисаковского месторождения в Кустанайской области Казахстана. Месторождения этой формации связаны с русловыми пойменными, часто эстуариевыми отложениями олигоценых палеорек Тургайского прогиба и Туранской плиты, врезанных в морские отложения чехла эпипалеозойской платформы. Рудные залежи вытянуты на десятки километров вдоль русла палеорек, представлены основной русловой залежью и сопровождающими ее линзовидными, овальными и неправильной формы пойменными залежами. В состав руд входят гидрогётит, лептохлориты, сидерит, стильносидерит, кварц (обломочный), кальцит, анкерит, глинистые минералы, пирит, марказит, гипс, местами гидроксиды марганца. Руды преобладающе оолитовые. Содержание железа в рудах низкое (30-35 %), фосфора - повышенное (около 0,5 %).

В Тургайском прогибе, кроме Лисаковского, выявлены однотипные Октябрьское и Шиелинское месторождения. В Северном Приаралье известны месторождения

Талды-Эспе, Кок-Булак, Талды-Булак и ряд более мелких, в северо-восточном Усть-Урте - Кашкаратский железорудный район.

ЭКСФИЛЬТРАЦИОННЫЕ (ГИДРОГЕННО-ИНФИЛЬТРАЦИОННЫЕ) МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К этой группе относятся **Бакальские** месторождения сидеритовых и бурожелезняковых руд в Саткинском районе Челябинской области. В рудном поле площадью 150 км² разведано 24 железорудных месторождения (рис. 10), в которых насчитывается более 200 рудных тел в виде пласто-, гнездо- и линзообразных залежей и рудных жил. Наиболее крупные пластообразные залежи площадью 1,5-2 км² имеют мощность до 80 м.

Рудное поле сложено протерозойскими доломитами, известняками, мергелями и известково-глинистыми сланцами. Пачки карбонатных пород содержат пласты сидеритов и окисленных руд. Последние сложены плотными, порошковатыми и глинистыми бурыми железняками и гидрогематитовыми (турьитовыми) рудами. Текстуры руд: массивная, концентрически-скорлуповатая, полосчатая, прожилковая, друзовая и брекчиевая. Среднее содержание железа в сидеритовых рудах 30,6 %, в бурых железняках 44 %. Запасы сидеритовых руд более 1 млрд т, бурых железняков 30 млн т.

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

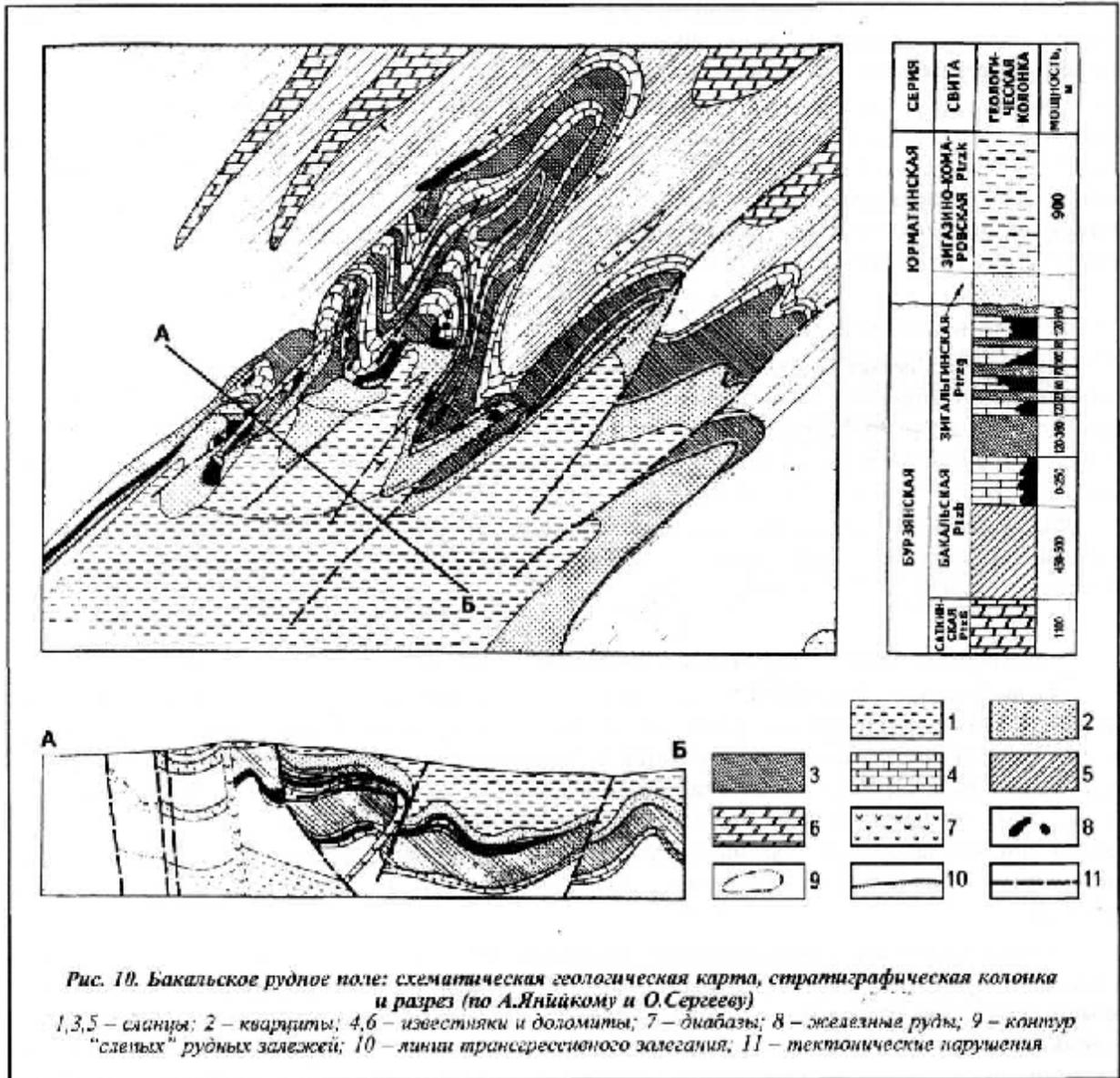
К этой серии относятся залежи метаморфизованных железистых кварцитов и месторождения метаморфогенных богатых руд древних формаций.

Месторождения железистых кварцитов залегают в метаморфизованных осадочных комплексах докембрийских геосинклиналей кристаллических щитов, складчатых фундаментов древних платформ или выступах древних структур, в ядрах антиклинорий более молодых складчатых областей. Железистые кварциты присущи только докембрийским складчатым областям. Они, являясь в подавляющей части морскими хемогенными осадками, достаточно четко обособляются среди терригенных и вулканогенно-осадочных вмещающих комплексов, образуя переходные хемогенно-терригенные, хемогенно-терригенно-карбонатные и хемогенно-вулканогенные разности в рудных пластах.

В России железистые кварциты сосредоточены на Кольском п-ове и в Карелии, в бассейне Курской магнитной аномалии, на Южном Урале, в Туве, в Читинской области и Республике Саха, на Дальнем Востоке; на Украине - в Криворожско-Кременчугском железорудном бассейне, в Казахстане - Карсакпайское, Гвардейское.

За рубежом широко известны крупные районы распространения железистых кварцитов: железорудный пояс Лабрадора (Канада), Верхнего озера (США), штата Минас-Жерайс и района Сьерра-дус-Каражес (Бразилия), в штатах Бихар, Орисса и других (Индия), в районах Нимба (Либерия, Гвинея) и Тамазимби (ЮАР), в Хамерсли (Западная Австралия), Аныданской группы (север Китая) и ряда районов в других странах.

Все крупнейшие месторождения железистых кварцитов с запасами руды в миллиарды и десятки миллиардов тонн относятся к нижнепротерозойским эвгеосинклинальным образованиям, претерпевшим метаморфизм фации зеленых сланцев. Главные минералы железистых кварцитов этой формации - кварц, магнетит, гематит, куммингтонит, биотит, хлорит. Структура кварцитов преимущественно тонко- и мелкозернистая, редко среднезернистая; текстура слоистая и плейчатая. Месторождения этой формации залегают в осадочных и частично вулканогенно-осадочных породах.



Для железистых кварцитов типичны средние содержания железа в пределах 20-40, чаще всего 32-37 %. Руды характеризуются высоким содержанием железа (54-69 %) и низкими содержаниями серы и фосфора.

Метаморфические тела богатых руд сложены магнетитовыми и магнетито-железно-слюдковыми рудами, залегающими среди железистых кварцитов, метаморфических осадочных и вулканогенно-осадочных пород - амфиболовых, магнетит-амфиболовых, кварц-биотитовых и других сланцев. По форме различают пласто-, линзо- и столбообразные, штоковые, гнездовые рудные тела. Они имеют преимущественно крутое склонение, локализованы в зонах дробления, в шарнирах или крыльях синклиналиных складок.

Руды в основном сложены магнетитом, гематитом - железным блеском, щелочными амфиболами (родуситом, рибекитом и др.). По преобладающим минералам выделены амфибол-магнетитовые, амфибол-магнетит-гематитовые, кварц-магнетит-гематитовые, эгирин-амфибол-магнетитовые и карбонат-магнетит-гематитовые руды.

Наиболее характерными примерами метаморфогенных месторождений могут служить Первомайское и Желтореченское месторождения в северной части Криворожского бассейна.

Железородный бассейн **Курской магнитной аномалии (КМА)** расположен в европейской части России. На территории бассейна площадью 120 тыс. км² распространены два промыш-ленных типа руд: осадочно-метаморфизованные железистые кварциты и богатые железные руды коры выветривания железистых кварцитов. Железистые кварциты принимают участие в строении кристаллического фундамента, слагая большую часть средней свиты курской серии отложений нижнего протерозоя. Вследствие сложного складчатого строения и допалеозойского эрозионного среза железистые кварциты выходят под отложения комплекса осадочных пород девона, юры, мела и четвертичного возраста. Магнито- и гравиразведочными работами установлено, что железистые кварциты КМА приурочены к пяти железородным полосам северо-западного простирания, протяженностью от 180 до 425 км. Внутри каждой полосы железистые кварциты залегают в виде одного или нескольких параллельных, иногда прерывистых пластов, имеющих крутое (70-80°) падение и почти всюду северо-западное простирание.

Главные рудные минералы в кварцитах - магнетит (5-30 %), гематит (55-5 %), кварц (30-60 %); в подчиненном количестве находятся силикаты и карбонаты. Структура кварцитов в магнетитовых прослоях кристаллобластовая, в гематитовых - лепидобластовая, в кварцевых - роговиковая. Среднее содержание железа в железистых кварцитах 32-36 %.

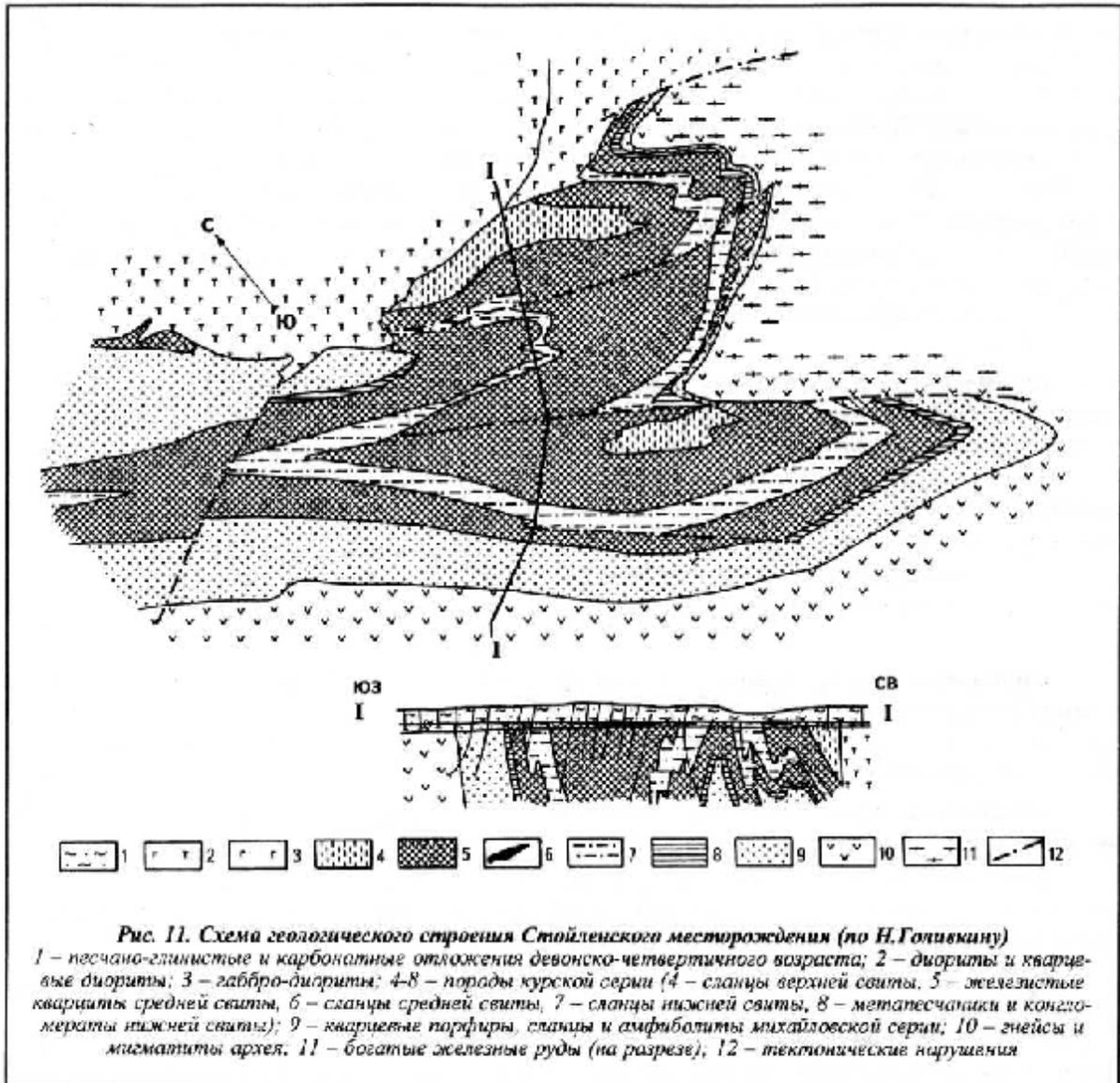
Разведанные и прогнозные запасы КМА до глубины 700 м оцениваются в 850 млрд т, богатых железных руд до глубины 1200 м - 80 млрд т.

Стойленское месторождение находится вблизи с. Стойло Белгородской области. На площади месторождения распространены мигматизированные биотитовые и мусковито-биотитовые гнейсы архея, перекрытые двумя сериями протерозойских пород - нижней (михайловской) и верхней (курсской).

Михайловская серия сложена кварцевыми порфирами, а курская - кварцитовидными песчаниками и кварцитами, железистыми кварцитами и филлитовидными мусковито-биотитовыми, гранато-биотитовыми и углистыми сланцами. Докембрийские породы перекрыты осадочными отложениями палеозоя, мезозоя и кайнозоя мощностью от 84 до 167 м. (рис. 11).

Запасы железистых кварцитов Стойленского месторождения 5,7 млрд т со средним содержанием железа 35,1 %, ежегодная добыча 14 млн т. На соседнем аналогичном Лебединском месторождении запасы железистых кварцитов 4,15 млрд т со средним содержанием железа 34,3 %, ежегодная добыча 25 млн т. Между Стойленским и Лебединским месторождениями разведано Стойло-Лебединское месторождение с запасами железистых кварцитов 2,5 млрд т со средним содержанием железа 35 %, ежегодная добыча 11 млн т.

Севернее Лебединского расположено Коробковское месторождение железистых кварцитов с запасами 2 млрд т со средним содержанием железа 34,1 % и ежегодной добычей 3 млн т. В северной части КМА разрабатывается Михайловское месторождение с запасами железистых кварцитов 8,7 млрд т со средним содержанием железа 39,2 %, ежегодная добыча 20 млн т. Разработка ведётся преимущественно открытым способом. Шахтным способом отработывается Яковлевское месторождение богатых маргитовых руд с запасами 1,8 млрд т со средним содержанием железа 60,5 %.

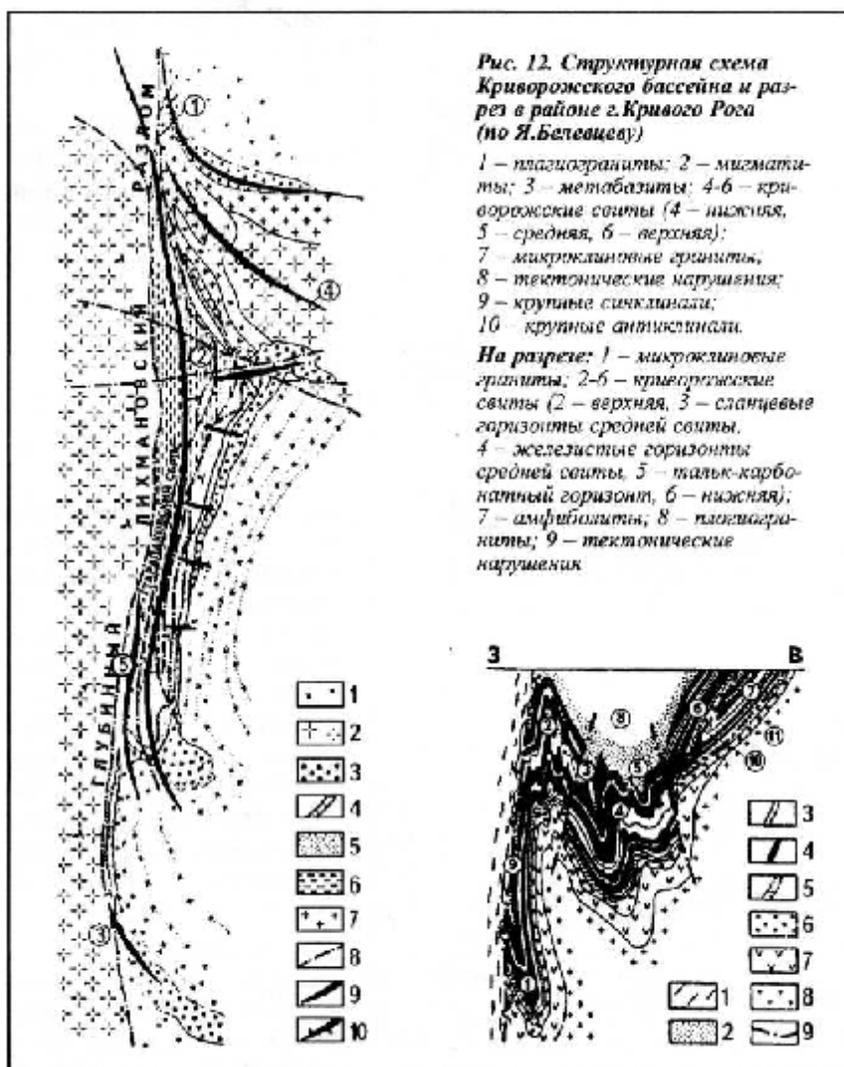


Криворожский железорудный бассейн расположен на правом берегу Днепра, вытянут в субмеридиональном направлении на 100 км (рис. 12). Бассейн входит в состав Украинского кристаллического щита и является частью до-кембрийского зеленокаменного пояса. Архейский этаж сложен гнейсами, мигматитами, амфиболитами, кристаллическими сланцами. Вышележащий этаж образован криворожской серией протерозойского возраста, подразделяемой на три отдела: нижний – зеленых сланцев с аркозами, кварцитами и филлитами; средний – собственно рудоносный, железисто-кварцитовый и сланцевый; верхний – кварци-топесчано-сланцевый с линзами известняков.

Криворожская серия образует сложный син-клинорий, состоящий из синклинальных и ан-тиклинальных складок с падениями крыльев под углами 45-80°, большей частью с килевидным замыканием синклиналей. Шарниры синклиналей погружаются под углом до 40° на север. Обычно крылья складок срезаны продольными разломами. В результате дислокаций на общем простирании бассейна обособлены рудоносные структуры (с юга на север): Ингулецкая (Южное рудное поле), Саксаганская (Главное или Саксаганское рудное поле), Первомайская, Анновская, Желтореченская (Северное рудное поле), Папель-настовская. В Северном

рудном поле осадочные породы прорваны протерозойскими гранитными интрузиями; также встречаются дайки диабазов.

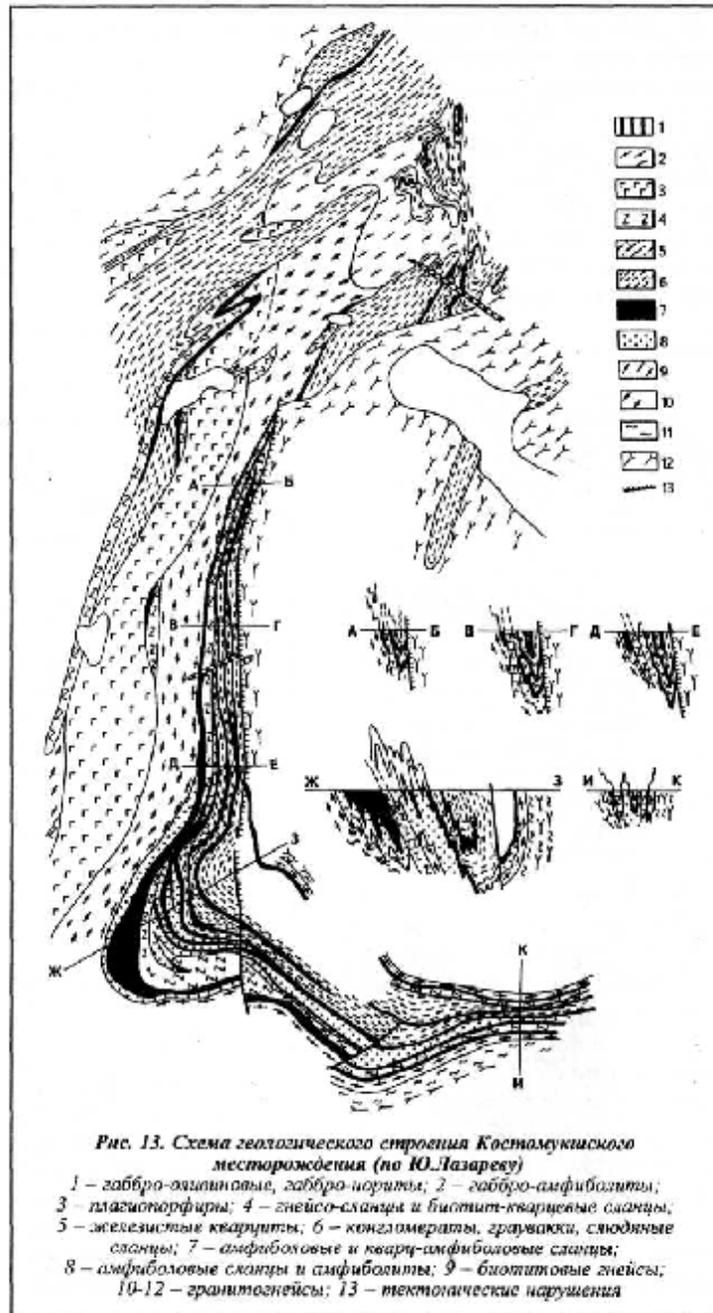
Среди богатых руд Криворожского бассейна выделяется четыре основных типа по характеру главных рудных минералов: 1) маритовые и гематит-маритовые (местное название "синька"); 2) мартит-гематит-дисперсно-гематит-гидрогётитовые ("краска-синька"); 3) гематит-дисперсно-гематит-гидрогётитовые ("краска"); 4) магнетитовые и магнетит-железно-сланцевые. Богатые железные руды Криворожского бассейна характеризуются высоким содержанием железа (54-64 %) и низким содержанием вредных примесей (серы -0,03-0,15 %, фосфора -0,04-0,28 %). Запасы богатых руд бассейна оцениваются в 1,16 млрд т со средним содержанием железа 56,7 %, железистых кварцитов - 18 млрд т со средним содержанием железа 34,3 %.



Костомукшское месторождение расположено в северо-западной части Карелии. Рибекит-магнетитовые, биотит-магнетитовые и грюнерит-магнетитовые полосчатые кварциты мощностью от 40 до 350 м залегают в метаморфизованных осадочно-вулканогенных архейских породах, смятых в крупную синклиналиную складку меридионального простирания протяженностью 12 км, при ширине 0,5-3 км (рис. 13).

Вмещающие породы сложены плагиопорфирами и гнейсами. Интрузивные породы месторождения представлены микроклиновыми гранитами, пегматитами и ультраосновными. Магнетитовые кварциты сложены кварцем, актинолитом,

магнетитом, грюнеритом, биотитом, пиритом и пирротинном. Разведанные запасы магнетитовых кварцитов превышают 1 млрд т со средним содержанием железа 32,2 %.



Железорудный бассейн штата Минас-Жерайс, расположенный в районе "железорудного четырехугольника" в центральной части Бразилии, включает 125 месторождений (общая площадь 7 тыс. км²). На архейских кристаллических сланцах и гнейсах в этом районе несогласно залегают нижнепротерозойские породы серии Минас мощностью до 7 км, сложенные кварцами, сланцами, филлитами, конгломератами, метаморфизованными лавами и туфами. Средняя свита серии Минас представлена тонкослоистыми и массивными гематитовыми рудами и маргит-магнетитовыми кварцитами с прослоями и линзами марганцевых руд, переслаивающимися с доломитами, кварцитами и сланцами.

Гематитовые руды и кварциты имеют протяженность с востока на запад 300 км и с севера на юг - около 100 км, мощность - от нескольких десятков метров до километра

(средняя 150 м). Текстура их тонкополосчатая, с поперечным размером полос от 1 мм до 2 см. Структура тонко- и мелкозернистая с размером зерен железорудных минералов 0,001-0,4 мм. Содержание железа в богатых рудах 63-69 %, запасы - 30 млрд т.

Железорудный бассейн Хамерсли расположен в Западной Австралии, площадь его 150 тыс. км², при длине около 600 км и ширине до 350 км. На архейских гранитогнейсах несогласно залегают нижнепротерозойские породы, подразделяющиеся на три свиты. Нижняя свита сложена базальтами, аркозовыми песчаниками и глинистыми сланцами. Средняя свита (Хамерсли) мощностью 2,5 км образована гематитовыми рудами и кварцитами, кремнистыми сланцами, доломитами, алевролитами, долеритами и дацитами. Верхняя свита представлена терригенными, богатыми кварцем, обломочными породами с прослоями доломитов и железистых кварцитов. В центральной части бассейна породы залегают полого, у его краев они смяты в складки и разбиты разрывами. В свите Хамерсли три группы пластов (снизу вверх): гематитовые руды, кварциты, сланцы мощностью соответственно 200, 650 и 200 м. Типы руд: гематитовые массивные, гематитовые конгломераты и лимонитовые пизолиты. Содержание железа в кварцитах 25-40 %, в богатых рудах (голубой гематит) - 64-67 %, фосфора и серы - сотые доли процента, кремнезема - до 3,6 %. Всего в этом районе насчитывается более 100 месторождений. Общие запасы богатых руд бассейна 32 млрд т, запасы железистых кварцитов достигают сотен миллиардов тонн.

Железорудный бассейн оз. Верхнего расположен на границе США и Канады, протяженность его с запада на восток около 600 км, с севера на юг - около 300 км, включает шесть железорудных районов. На архейских гранитах и гнейсах здесь залегают нижнепротерозойские породы, представленные в основании кварцитами, конгломератами, доломитами, сланцами, в средней части разреза - железистыми кварцитами, сланцами и безрудными кварцитами, а в верхней части - песчаниками и покровами основных лав.

Железистые кварциты на наиболее крупном месторождении **Месаби** (США) прослежены по простиранию на 145 км при ширине 3-16 км, включают четыре продуктивных горизонта суммарной мощностью 100-220 м. Содержание железа в магнетитовых кварцитах 25-38 %. Богатые массивные руды столбо- и линзообразных залежей вскрыты до глубины 800-1200 м. Руды кварц-гематитовые, реже кварц-магнетитовые, мартитовые и гематитовые. Богатые руды содержат 50-62 % железа, серы и фосфора - от сотых долей до 0,1 %. Запасы их - около 100 млн т, а железистых кварцитов - 16 млрд т.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

В геосинклинальный этап (островодужная, реже - спрединговая стадии цикла Уилсона) основная концентрация железа происходит на ранней стадии, когда в связи с базальтовым магматизмом формируются магматические и скарновые месторождения железных руд; в эту же стадию в прибрежных частях геосинклинальных бассейнов накапливаются осадочные руды. Средняя и поздняя (коллизионная) стадии геосинклинального цикла для железа мало продуктивны. В платформенный этап формируются железорудные осадочные, эпигенетические месторождения и месторождения выветривания.

В архейско-раннепротерозойскую металлогеническую эпоху сформировались железорудные бассейны с широко развитыми фациями первично хемогенных, терригенно-хемогенных и вулканогенных железисто-кремнистых осадков, метаморфизованных затем в железистые кварциты. К ним относятся уникальные месторождения железистых кварцитов и образованных по ним богатых (мартит-гематитовых) руд районов Лабрадора (Канада), Верхнего озера (США, Канада), Минас-Жерайс, Сьерра-дус-Каражес (Бразилия), КМА (Россия), Кривого Рога

(Украина), штатов Бихар и Орисса (Индия), Западной Африки, Западной Австралии и Восточной Антарктиды. Общие ресурсы железа в железистых кварцитах составляют сотни миллиардов тонн, далеко превосходят ресурсы всех других групп железорудных месторождений.

Позднепротерозойская эпоха характеризуется накоплением гематитовых оолитовых руд в прибрежных терригенно-карбонатных геосинклинальных морских отложениях (Клинтон - в США, Ангаро-Питский бассейн - в России, Баффинг-Бакойский бассейн - в Мали, месторождения Южной Африки и Северной Австралии).

Палеозойская эпоха отличается весьма значительным железорудением, связанным с каледонской и герцинской складчатостью. В эту эпоху формировались крупные магматические титаномагнетитовые месторождения Урала и Южной Африки, скарново-магнетитовые месторождения Урала, Западной Сибири (Россия), Кустанайской области (Казахстан), штатов Калифорния, Юта, Нью-Мексико (США) и др.

В мезозойскую и кайнозойскую эпохи были образованы крупные осадочные морские железорудные бассейны (Западно-Сибирский - в России, Керченский - на Украине, Аятский - в Казахстане, Лотарингский - во Франции) и континентальные речные и озерные месторождения на молодых эпигерцинских платформах и плитах.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРГАНЦА

Марганцевые руды начали использовать в конце XVIII в. для изготовления красок и медицинских препаратов. Широко применяться марганцевые руды стали во второй половине XIX в. в связи с открытием способов производства стали. В настоящее время металлургическая промышленность является основным потребителем марганца и только 8 % его используется в электротехнической (для производства сухих батарей), химической (красильной и лакокрасочной) и керамической отраслях промышленности.

Общие мировые запасы марганцевых руд в 56 странах равны 10,6 млрд т, в том числе в ЮАР - 4,5 млрд т, на Украине - 2,5 млрд т, в Казахстане, Габоне, Австралии, Бразилии, Китае и Грузии - до 240 млн т. Добыча марганцевой руды составляет 20 млн т/год. Марганцевую руду добывают 26 стран, более половины разрабатывает Украина и Китай, от 2,5 до 1,2 млн т в год добывают ЮАР, Австралия, Бразилия, Индия и Габон. Стоимость металлургической руды с содержанием 48-50 % марганца и менее 0,1 % фосфора составляет 127 дол/т, электротехнической (MnO_2 - 78-85 %) - 250 дол/т. Все запасы марганцевых руд в России составляют 148,2 млн. т. В настоящее время свыше 90% потребляемого в России марганца завозится из-за рубежа, в основном из Украины и Казахстана.

К уникальным относятся месторождения марганцевых руд с запасами более миллиарда тонн, к крупным - с запасами в сотни миллионов тонн, к средним и мелким - с запасами в десятки миллионов тонн.

В металлургии используют руды с содержанием 30-36 % марганца и менее 0,2 % фосфора. Кондиционное содержание для легкообогатимых руд более 10 %, а для труднообогатимых - более 20 % марганца.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Марганец состоит из одного изотопа ^{55}Mn . Кларк марганца 0,1 %. Повышение содержания (до 1,5 кларка) наблюдается в ультраосновных и основных породах. Коэффициент концентрации марганца высокий (около 300).

Марганец обладает двумя устойчивыми валентностями: соединения Mn^{2+} и Fe^{2+} замещают друг друга в эндогенных процессах, Mn^{4+} и Fe^{3+} совместно участвуют в экзогенных процессах. Они осаждаются при различных значениях pH среды: железо - в более, а марганец - в менее окислительных (дальше от берега) условиях.

Эндогенные обособления марганца почти не имеют промышленного значения. Уникальные и крупные концентрации отмечаются в осадочных и вулканогенно-осадочных породах, а также корях выветривания метаморфических пород.

Известно более 150 минералов марганца. Промышленные минералы: пиролюзит MnO_2 (55-63 %), браунит $MnMn_6SiO_{12}$ (60-69), гаусманит $MnMn_2O_4$ (65-72), манганит $MnOОН$ (50-62), вернадит $MnO_2 \cdot nH_2O$ (40-45), псиломелан $BaMnMnO_6 \cdot 4H_2O$ (45-60), родохрозит $MnCO_3$ (40-45), манганокальцит $(Ca, Mn)CO_3$ (7-23) и манганосидерит $(Mn, Fe)CO_3$ (23-32).

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выделяют следующие промышленные типы марганцевых месторождений: осадочные, вулканогенно-осадочные, выветривания и метаморфогенные. Главное промышленное значение имеют первый и третий типы.

ОСАДОЧНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Родохрозит-псиломелан-пирролюзитовые месторождения среди прибрежно-морских и лагунных олигоценовых отложений сосредоточены в южной части Паратетиса, в котором образовались Никопольский марганцеворудный бассейн на Украине, Чиатурское месторождение в Грузии, Мангышлакское в Казахстане, Оброчище в Болгарии. Их накопление связывают с осадочными или вулканогенно-осадочными процессами.

Огромное количество марганцевых руд сосредоточено в железо-марганцевых конкрециях, выстилающих крупные площади дна Тихого, Атлантического и Индийского океанов (рис. 14). Запасы их 2,5 трлн т, что в сотни раз превышает суммарные запасы, учтенные во всех месторождениях суши. В связи с тем, что происходит непрерывное формирование конкреций, запасы этих руд ежегодно возрастают на 10 млн т.

Источником железа, марганца, а также сопутствующих - кобальта, никеля, меди, цинка, свинца, золота, серебра и других элементов одни геологи считают донные вулканические гидротермы, другие - инфильтрацию из донных базальтов океанической водой, третьи - снос с континентов.



Никопольский бассейн включает Никопольское и Больше-Токмакское месторождения и ряд рудоносных площадей, вытянутых вдоль берегов Днепра и Ингульца в районе городов Никополя и Запорожья в виде полосы протяженностью 250

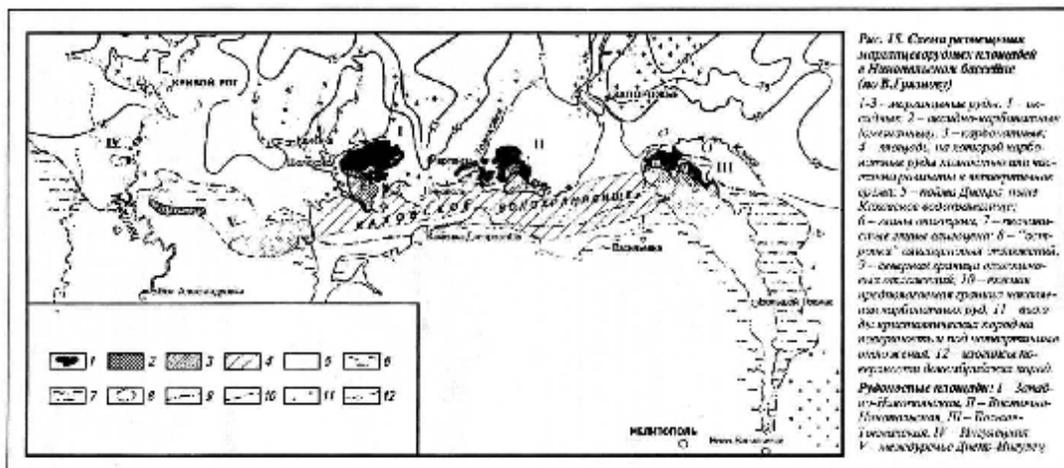
км и шириной до 25 км (рис. 15). Пласт марганцевой руды залегает в нижнеолигоценых песчано-глинистых осадках, которые простираются вдоль южного склона Украинского кристаллического щита и западного склона Азовского кристаллического массива.

Рудный пласт характеризуется перемежаемостью марганцевых конкреций, линз и стяжений мощностью от нескольких сантиметров до 4,5 м, с песчано-алеврит-глинистыми осадками, залегание его почти горизонтальное, местами с падением на юг под углами 5-7°. Количество марганцевых руд, заключенных в глинисто-алевролитовой нерудной массе, достигает 50 % мас, а среднее содержание марганца 15-25 %. В основании рудного пласта нередко расположен слой глауконитового песка. Марганцеворудные отложения залегают с размывом на подстилающих породах верхнего эоцена, сложенных алевритами, углистыми глинами и песками или на кристаллических породах фундамента.

Надрудные отложения представлены плиоценовыми глинами, известняками-ракушечниками, мергелями и четвертичными суглинками общей мощностью от 15 до 80 м.

В пределах полосы месторождений по мере погружения кристаллического фундамента выделяются три рудные латеральные зоны: оксидных, смешанных (оксидно-карбонатных) и карбонатных марганцевых руд. Среди разведанных руд этих месторождений соотношение оксидных, смешанных и карбонатных руд равно 25:5:70.

Оксидные руды сложены пиролюзитом, псиломеланом, манганитом; карбонатные – манганокальцитом и родохрозитом.



Пласт оксидных существенно пиролюзит-манганитовых руд мощностью 1-5 м приурочен к северным прибрежным окраинам бассейна. Он представлен частым переслаиванием зеленовато-серых монтмориллонитовых глин с примесью песка и алеврита и марганцевых конкреций размером от 1 до 20 см. Количество конкреций в рудном пласте колеблется от 10 до 60 %. В товарной руде содержание марганца - от 25 до 52 %. Карбонатные руды залегают в нижней части рудного пласта, встречаются в виде реликтов в оксидных рудах или образуют пласты, целиком сложенные манганокальцитом.

Чиатурское месторождение находится на западе Грузии. В геологическом строении территории района принимают участие гранитоиды, габброиды, кристаллические сланцы докембрия и нижнего палеозоя; песчаники, известняки и кварцевые порфиры юры; карбонатно-терригенные отложения мелового возраста и песчано-глинистые отложения палеогена и неогена. Марганцеворудный горизонт (олигоцен), трансгрессивно залегает на подстилающих верхнемеловых известняках с пологим падением на восток. С юго-запада месторождение срезано крупным сбросом северо-западного простирания.

Олигоценые отложения подразделяются на подрудные, рудный горизонт и надрудные. В основании подрудных отложений залегает базальные конгломераты и кварц-аркозовые песчаники. Марганценовый горизонт представлен переслаиванием рудных пластов с прослоями опоковидных песков и глин (рис. 16). Число рудных пластов меняется от 3 до 25, мощность их 1-50 см, безрудных слоев - до 1 м. Общая мощность рудного горизонта достигает 14 м, средняя - 4,2 м. Над рудоносным горизонтом залегают глинистые песчаники и кремнистые туффиты и глины. Общая мощность олигоценых отложений 110 м.

На месторождении выделяются первичноокисные (45 % запасов), карбонатные (40 %) и окисные (15 %) руды. Первичноокисные руды подразделяются на оолитовые твердые и мягкие руды пиро-люзитового, манганитового и псиломеланового состава. Они содержат (в % мас): Mn - 45-52; Fe - 0,7-1,2; P - 0,1-0,2; SiO₂ - 7-12. Карбонатные руды образуют прослои (до 0,5 м), чередующиеся с песчано-глинистыми, опаловыми и карбонатно-опаловыми породами.

Сложены манганокальцитом, кальцитом, родохрозитом и опалом, в них встречаются также барит, гипс, пирит, марказит. Содержат (в % мас): Mn - 10-30; Fe - 2-4; P - 0,1-0,3; SiO₂ - 5-40; CaO - 10-35. Окисные руды, представляющие продукты гипергенного окисления карбонатных руд, вскрытых на поверхности, сложены гидроксидами марганца и железа, опалом, реликтивными остатками первичных окисных и карбонатных руд. Содержат (в % мас): Mn - 30-35; Fe - 2-5; SiO₂ - 8-35. В промышленном отношении наибольшее значение имеют окисные пиролюзитовые руды.



ЖЕЛЕЗО-МАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ ДНА ОКЕАНОВ

Впервые железо-марганцевые конкреции на дне Тихого океана были открыты английской экспедицией на судне "Челленджер" в XIX веке. Однако реальные представления об их развитии получены во второй половине двадцатого века, когда стало применяться подводное фотографирование и теленаблюдение морского дна. Установлено, что железо-марганцевые конкреции формируются преимущественно в пелагической области океанов и практически отсутствуют в периконтинентальных зонах.

Конкреции и рудные корки на поверхности коренных пород обнаружены в пелагической области практически повсеместно как на дне котловин, так и на склонах поднятий. Мощность Fe-Mn корок на базальтах и туфобрекчиях изменяется от нескольких миллиметров до 10-15 см. Наиболее распространены конкреции размером 3-7 см в поперечнике. Морфологические типы конкреций - сферические, эллипсоидные, лепешковидные, плитчатые, желвакообразные и гроздевидные. Часто эти формы обусловлены конфигурацией обломков пород и органических остатков, служащих ядрами конкреций. Текстуры конкреций и корок - скорлуповато-слоистые, оолитовые, петельчатые, колломорфные, пятнистые и прожилковые. Главные

рудообразующие минералы в конкрециях - вернадит и гидрогётит, реже встречаются другие гидроксиды и оксиды марганца и железа .

В Fe-Mn конкрециях содержится (в % мас): Mn - 25-30; Fe - 10-12; Ni - 1-2; Co - 0,3-1,5; Cu - 1-1,5. Концентрация конкреций на обрабатываемых участках 10-20 кг/м².

Вулканогенно-осадочные месторождения

Марганцевые месторождения этого типа приурочены к областям интенсивного проявления подводного вулканизма, характеризующимся накоплением лав и туфов с подчиненным количеством осадочных пород и руд. Для них установлена отчетливая связь с кремнистыми (яшмы, туфы), карбонатными (известняки, доломиты) и железистыми (магнетит-гематитовыми) породами и рудами.

Руды формировались на ранней стадии геосинклинального (островодужного) этапа. Поступление марганца, железа, кремнезема, меди, свинца, цинка, бария, германия и других компонентов осуществлялось поствулканическими подводными эксгаляциями и гидротермами. Обычно железо-марганцевые месторождения приурочены к диабаз-порфировым, андезитовым или кварц-кератофировым комплексам и располагаются как у очагов вулканической деятельности, так и в удалении от них среди горизонтов пирокластического материала.

Месторождения этого типа отличаются браунит-гаусманитовым составом первичных марганцевых руд и псиломелан-вернадитовыми рудами в корях выветривания. Они представлены пластообразными залежами мощностью 1-10 м, содержащими (в % мас): Mn - 40-55; Si - менее 10; P - 0,03-0,06. Месторождения обычно небольшие. Примерами являются палеогеновые объекты Северного и Южного Урала, девонские Атасуйского и Джездинского районов Центрального Казахстана, Горного Алтая, кембрийские - Мазульское и Дурновское в Кузнецком Алатау, Удско-Шантарского района в Хабаровском крае и ряд мелких мелового возраста на Кавказе.

Северо-Уральский марганцеворудный бассейн имеет рудный горизонт в виде субмеридиональной полосы шириной от 100 до 700 м, прослеженной более чем на 200 км от г. Серова на юге до пос. Бурмантово на севере. В этой полосе разведано 15 месторождений (Полуночное, Марсятское, Березовское и др.).

Рудовмещающие породы нижнего палеоцена, мощностью до 30 м, представлены песчаниками, гравелитами и глинами с пластами и линзами марганцевых руд, преимущественно карбонатных, окисленных на выходах. Подстилающие породы верхнего мела - аргиллиты, песчаники и кварц-глауконитовые пески мощностью до 23 м. Перекрывающие породы мощностью до 120 м представлены диатомитами в южной половине бассейна и аргиллитами - в северной.

Карбонатные руды сложены манганокальцитом и манганосидеритом. Среди них выделяются песчанистые, песчано-глинистые, кремнистые, конкреционно-глинистые и глинистые разновидности. Полуокисленные руды состоят из переслаивающихся полосок оксидов марганца и железа с карбонатами марганца. В них отмечается примесь кварца, глауконита и сульфидов железа. Оксиды марганца представлены плотными и порошковатыми разновидностями манганита и пиролюзита. Запасы марганцевых руд бассейна со средним содержанием марганца 20-22 % равны 41,3 млн т, прогнозные ресурсы оцениваются в 125 млн т.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Месторождения выветривания образуются по марганецсодержащим метаморфизованным силикатным и карбонатным породам. Распространены они главным образом в Индии и Бразилии, а также в Канаде, Венесуэле, Габоне, Гане, ЮАР и Австралии.

В Индии промышленное значение имеют залежи богатых марганцевых руд, сложенные пиролюзитом и псиломеланом, образовавшиеся в корях выветривания

(марганцевых шляпах) гондитов и кодуритов протерозойского возраста, содержащих (в % мас): Mn - 30-50; SiO₂ - до 12; Fe - до 14; P - обычно до 0,2, иногда до 2. Глубина распространения оксидных руд - 10-70 м. Несколько десятков крупных и сотни мелких месторождений богатых марганцевых руд выявлены в центральных и южных штатах Индии (Мадхья-Прадеш, Махараштра, Раджастхан, Гуджарат, Орисса и Андхра-Прадеш).

В Бразилии марганцевые месторождения связаны с железистыми кварцитами, марганецсодержащими карбонатными породами и гондитами в штатах Минас-Жерайс, Байя, Гоя, Мату-Гросу, на территории Амапа. Месторождения в штате Мату-Гросу кембрийского и ордовикского возраста, остальные - протерозойские. В штате Минас-Жерайс имеется более 50 марганцевых месторождений, связанных с железистыми кварцитами и более 100, связанных с марганецсодержащими известняками, доломитами, кварцитами и сланцами, входящими в состав нижнепротерозойских пород серии Минас.

В железистых кварцитах, средняя мощность которых 150 м, обычно встречаются от одного до пяти пластов или линз мощностью 0,5-6 м, обогащенных марганцем. Они прослеживаются по простиранию от сотен метров до 10 км. Содержание марганца в них 40-50 %. Отношение Mn:Fe - 3:1, а в гондитах - 8-10:1, что позволяет различать руды этих формаций.

Содержание марганца в оксидных гипергенных рудах, образованных по марганецсодержащим доломитам, 30-53 %, кремнезема и железа - до 3 %, фосфора - до 0,1 %. Эти руды отличаются от руд, образованных по силикатным породам, низким содержанием кремнезема и железа.

В ЮАР в районе Куруман (Калахари) месторождения марганца приурочены к основанию толщи железистых кварцитов, перекрытых известковистыми доломитами верхнего докембрия системы Трансвааль. Рудная толща состоит из трех рудных пластов суммарной продуктивной мощностью от 20 до 50 м. Пласты прослеживаются на несколько километров. Руды сложены браунитом, криптомеланом, реже гаусманитом и манганитом. Содержание марганца в рудах - 38-48 %, железа - 4-20. Здесь разрабатываются мощные рудные залежи оксидных марганцевых руд зоны окисления.

МЕТАМОРФИЗОВАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Метаморфизованные марганцевые месторождения связаны с марганецсодержащими протерозойскими силикатными породами - гондитами и кодуритами. Гондиты сложены кварцем, спессартином, браунитом, гаусманитом и родонитом. Кодуриты состоят из калиевого полевого шпата, спессартина и апатита. Они переслаиваются с мраморами, кварцитами и сланцами. Гондиты и кодуриты распространены на больших площадях в сотни квадратных километров, протяженность метаморфизованных марганценосных залежей - до 3-8 км, мощность - 3-60 м, среднее содержание марганца - 10-20 %. Наиболее крупные месторождения отмечены в Индии и Бразилии.

В Индии метаморфизованные осадочные формации кварцитов, сланцев и карбонатных пород, включающих гондиты и кодуриты, а также метаморфизованные марганцеворудные залежи, отмечены в районах Саусар, Аравалли, Чемпенер, Гангпур и Кондолит. Встречаются они в виде поясов протяженностью до 200 км при ширине до 30 км. Степень метаморфизма вмещающих пород отвечает зеленосланцевой, амфиболитовой и гранулитовой фациям. Рудные тела и вмещающие породы собраны в складки различных размеров. Метаморфизованные марганцеворудные залежи отличаются полосчатой текстурой, сложены браунитом, биксбиитом и голландитом. Они переслаиваются с марганецсодержащими силикатными породами, гондитами и

кодуритами. В настоящее время разрабатываются наиболее мощные рудные тела оксидных марганцевых руд зоны окисления; гондиты и кодуриты не разрабатываются.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

В геосинклинальном этапе основная концентрация марганца происходит на ранней стадии, когда в прибрежных частях морских бассейнов накапливаются осадочные руды. Средняя и поздняя стадии геосинклинального цикла для Mn не продуктивны. В платформенный этап формируются месторождения - осадочные и выветривания.

В позднеархейско-раннепротерозойскую металлогеническую эпоху сформировались мощные геосинклинальные образования, характеризующиеся в ряде случаев высокопродуктивными Mn-толщами (гондиты - в Индии и Гане, железистые кварциты - в Бразилии, ЮАР и др.).

Палеозойская эпоха характеризуется скоплением марганца в нижнекембрийских и девонских породах в связи с андезито-базальтовым вулканизмом (месторождения Урала, Кузнецкого Алатау, Хабаровского края в России, Центрального Казахстана), а также в процессе накопления осадочных Mn-карбонатов (Усинское месторождение в Кемеровской области).

В мезозойскую эпоху встречаются рудопроявления марганца, обусловленные поздне меловым и юрским вулканизмом (Забайкалье в России, Армения, Грузия, Болгария, Турция, Канада, США, Новая Зеландия).

Палеогеновая эпоха отличается уникальными скоплениями осадочных олигоценых марганцевых руд бассейна Паратетиса (Никопольский бассейн - на Украине, Чиатурское месторождение - в Грузии, Мангышлакское - в Казахстане, Оброчище - в Болгарии и другие) и скоплениями палеоценовых марганцевых руд вдоль восточного склона Урала.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРОМА

Хром открыт в 1797 г. французским химиком Л. Вокеленом в минерале крокоите с Урала (Берёзовское месторождение). Руды хрома (хромиты) впервые выявлены на Урале в 1799 г. В настоящее время основным потребителем хромитов является металлургическая отрасль промышленности, значительно меньше их потребляют огнеупорная и химическая отрасли промышленности. Хром необходим для производства нержавеющей, жаропрочных, кислотоупорных, инструментальных и других видов сталей. Сплавы хрома с кобальтом, вольфрамом или молибденом используются в качестве антикоррозионных покрытий (хромирование).

Мировые запасы хромитов в 27 странах составляют 3,5 млрд т. Из них около 80 % сосредоточены в Казахстане и ЮАР, остальные - в основном в Зимбабве, Индии, Турции, Филиппинах и Финляндии. Добыча хромитовой руды достигла 13 млн т. В настоящее время хромиты добывают 20 стран, при этом доля Казахстана и ЮАР составляет 60 % добычи. Стоимость хромитовой руды для металлургической промышленности 110-140 дол/т, для огнеупорной и химической промышленности - 60-80 дол/т.

К уникальным относятся месторождения хромитов с запасами в сотни млн т, к крупным и средним - десятки миллионов тонн, к мелким - единицы миллионов тонн. Металлургическая отрасль промышленности потребляет руды с содержанием (в %): $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 49$, при соотношении Cr_2O_3 : "FeO" > 3 (где "FeO" = $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0,9$) и содержания S и P < 1 ; химическая - $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 49$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 14$, $\text{SiO}_2 < 5$; огнеупорная - $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 32$, $\text{SiO}_2 < 6$, CaO < 1 .

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

В природе известно четыре изотопа хрома с массовыми числами 50,52-54, наиболее распространен ^{52}Cr . Кларк хрома 0,0083 %. Повышенные содержания отмечаются в ультраосновных (0,2 %) и основных (0,02 %) породах. Коэффициент концентрации хрома весьма высокий (около 4000).

Хром обладает двумя валентностями - Cr^{3+} и Cr^{6+} . Соединения трехвалентного хрома наиболее устойчивы и широко распространены. Соединения шестивалентного хрома образуются только в резко окислительной обстановке, при высоком значении pH. Трехвалентный атом хрома в силу высокого сродства с кислородом образует оксиды вместе с ионами алюминия, магния, двух- и трехвалентного железа, обособляющимися на высокотемпературной магматической ступени эндогенного процесса при дифференциации перидотитовой магмы. В экзогенных условиях такие соединения устойчивы, способны поступать в россыпи или мигрировать в виде взвесей, иногда обогащая отложения песков и глин.

Известно 25 минералов хрома. Промышленными являются хромшпинелиды ("хромиты"), имеющие общую формулу $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} \cdot (\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3$. Состав хромитов изменчив (в % мае): Cr_2O_3 - 18-65; MgO - до 16; FeO - до 18; Fe_2O_3 - до 30; Al_2O_3 - до 33. Присутствуют также оксиды Ti, Mn, V, Ni, Co, Zn и др. Наибольшее значение имеют магнохромит (Cr_2O_3 - 50-60 %), меньшее - алюмохромит и хромпикотит. Другие хромсодержащие минералы - хромвезувиан, хромдиопсид, хромтурмалин, хромовый гранат (уваровит), хромовая слюда (фуксит), хромовый хлорит - часто сопровождают хромиты или встречаются в зоне гипергенеза (хроматы, хромкарбонаты и др.) и имеют поисковое значение.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Среди промышленных типов хромитовых месторождений выделяются: раннемагматические, позднемагматические и россыпные (последние несущественные).

РАННЕМАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

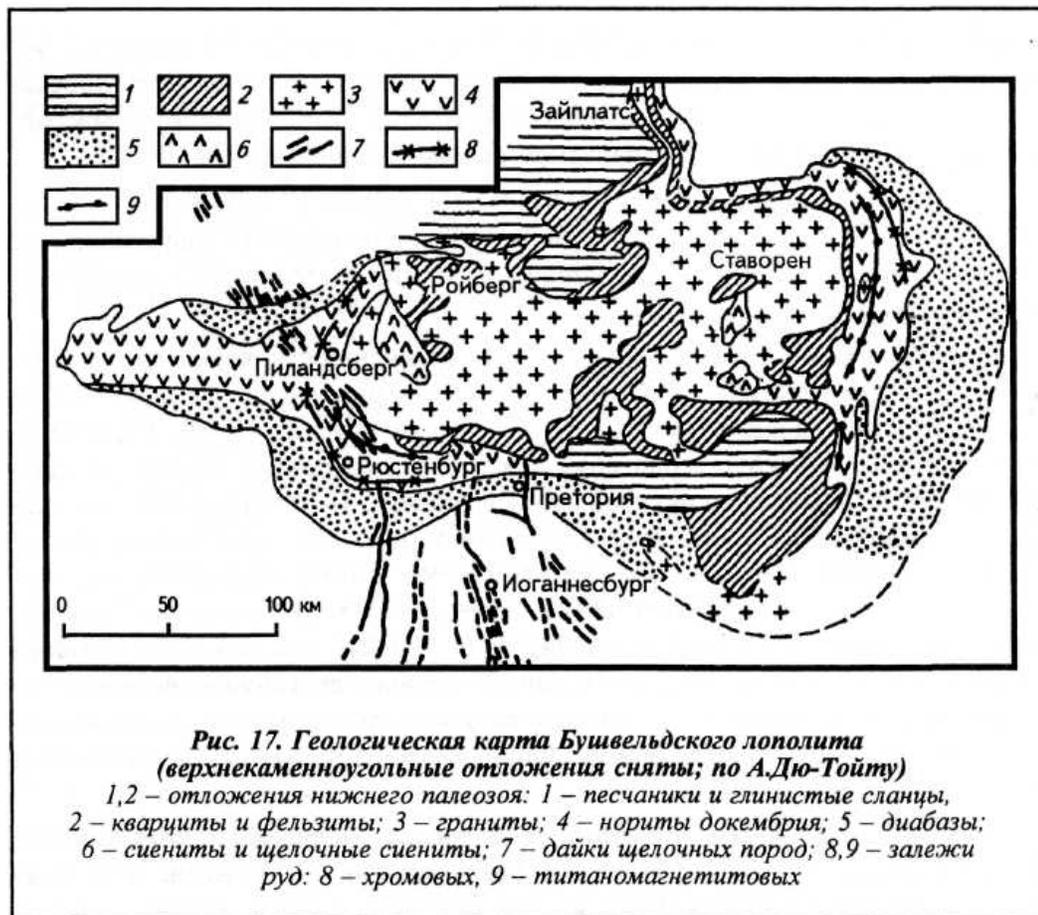
Раннемагматические месторождения представлены пластообразными телами хромитовых руд в расслоенных массивах ультраосновных пород. Примерами уникальных по запасам месторождений этого типа являются Бушвельдский массив в ЮАР, Великая Дайка в Зимбабве, Стиллуотерс в США.

Бушвельдский массив (провинция Трансвааль, ЮАР) представляет собой грандиозный лополит протяженностью с запада на восток 460 км, с севера на юг - 250 км, сужающийся и погружающийся к центру под углами 15-30° (рис. 17). Он внедрился в мощную толщу кварцитов и эффузивов протерозоя (трансваальская система) в протерозойское же время. Внедрение происходило в момент максимального накопления осадков и прогибания крупной платформенной мульды. Главная особенность внутреннего строения массива - его расслоенность. Отдельные горизонты основных и ультраосновных пород, имеющие мощность от сантиметров до метров, прослеживаются по простиранию на расстояния до 100-200 км. В массиве снизу вверх отмечается следующая смена пород: нориты мощностью 350 м (зона Закалки); нориты, перемежающиеся с перидотитами, мощностью 1500 м (Базальная зона); нориты с прослоями пироксенитов и анортозитов мощностью около 1000 м (Критическая зона); габбро-нориты мощностью 3500 м (Главная зона); габбро-диориты мощностью 2000 м (Верхняя зона).

Месторождения хромитов сосредоточены в пироксенитах и анортозитах Критической зоны. С норитами в этой зоне связаны платиноносные медно-никелевые сульфидные месторождения (горизонт Меренского). В анортозитах Главной зоны встречены месторождения титаномагнетитов. В Верхней зоне массива известны граниты, в связи с которыми отмечены гидротермальные месторождения олова и флюорита.

Месторождения хромитов приурочены к двум рудоносным горизонтам протяженностью 110-160 км. Залежи вкрапленных и массивных руд имеют форму параллельных прослойков, элементы их залегания полностью совпадают с расслоенностью вмещающих пород.

Встречаются хромиты с нодулярной текстурой. В пределах рудных горизонтов до глубины 120 м выявлено 27 хромитовых пластов, которые объединяются в три группы: верхнюю (до глубины 30 м), среднюю (30-75 м) и нижнюю (до глубины 120 м). Мощность пластов 0,2-1,8 м. Хромиты нижней группы пластов содержат 42-50 % Cr₂O₃. Отношение Cr₂O₃ : "FeO" в них изменяется от 1,8 до 2. Хромиты средней и верхней групп пластов содержат 32-46 % Cr₂O₃, при отношении Cr₂O₃ : "FeO", равном 1,5-1,75. Запасы хромита оцениваются в 1 млрд т со средним содержанием оксида хрома 45 %.



Позднемагматические месторождения хромитов широко распространены на Урале, Кавказе, в Сибири, на Чукотке, Камчатке, Сахалине, а также за рубежом - в Албании, Греции, Югославии, Турции, Иране, Пакистане, Индии, Филиппинах, Мадагаскаре и на Кубе.

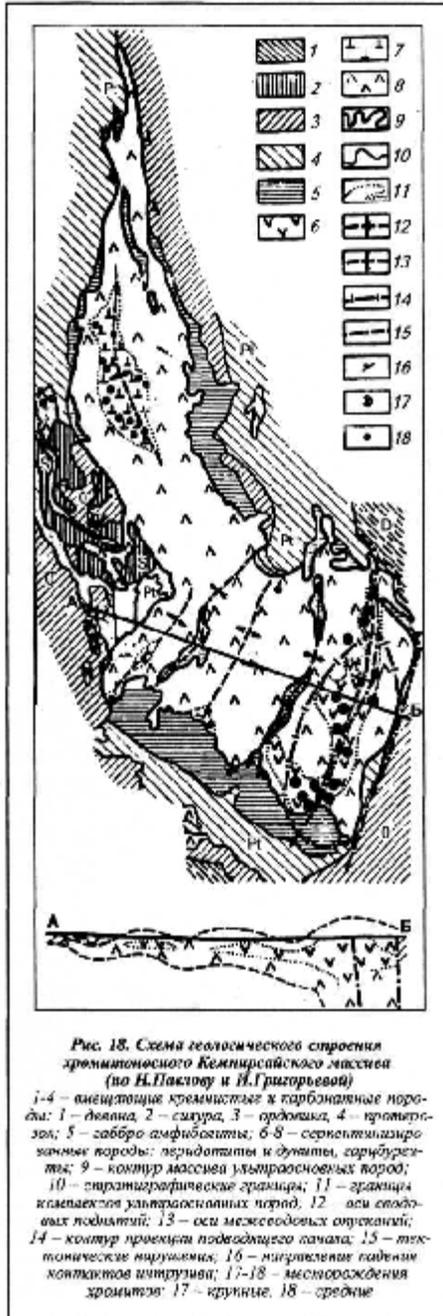
Главная хромитоносная провинция в России и Казахстане - Урал, где известно 25 районов, в которых в разное время производилась добыча хромитов. В настоящее время разрабатывается Донская группа хромитовых месторождений, находящаяся в юго-восточной части Кемпирсайского массива на Южном Урале, и Сарановское месторождение - на западном склоне Среднего Урала.

Кемпирсайский массив ультраосновных пород расположен в пределах Уралтауского мегаантиклинория в Актюбинской области Казахстана. Вытянут он в субмеридиональном направлении на 82 км. Ширина массива изменяется от первых километров в северной части до 32 км в южной. Северная часть массива представляет собой моноклинально падающее на запад тело мощностью до 2,5 км с углами падения 40-60°. В южной части по геологическим и геофизическим данным массив имеет форму лакколита (рис. 18), залегающего между породами верхнего протерозоя и нижнего палеозоя. Возраст интрузии 400-380 млн лет. Массив сложен частично серпентинизированными гарцбургитами и дунитами. В пределах массива известно более 160 хромитовых месторождений и рудопроявлений. Все промышленные месторождения Cr размещены в Южно-Кемпирсайском рудном поле. Вмещающими рудные залежи породами являются серпентинизированные дуниты. Контакты хромитов с вмещающими породами обычно резкие, нормальные, реже тектонические. Выклинивание рудных тел по падению и восстанию тупое, очень редко наблюдается их расщепление.

Наиболее распространенные формы рудных тел - линейно-вытянутые линзы, реже изометрические и столбообразные залежи. В непосредственной близости от рудных тел в дунитах наблюдаются шпирсы вкрапленных хромитовых руд (0,5-1 м в поперечнике), тонкие (1-10 см) жилки и прожилки массивных хромитов, а также сульфидо-держашие дуниты. Углы падения рудных тел 5-15°, реже - до 45°, глубина залегания - до 1200 м (максимальная глубина разведки).

Размеры отдельных рудных тел варьируют от нескольких десятков метров до 1,5 км по простиранию при мощности от первых м до 150 м. Количество рудных тел в месторождениях различно. Рудные тела разбиты преимущественно субширотными сбросо-сдвигами на отдельные блоки, иногда смещёнными на расстояния до первых сотен м. Руды массивной, вкрапленной и нодулярной текстуры сложены магнохромитом, реже - алюмохромитом, оливином (частично серпентинизированным).

Среднее содержание в рудах (в % мас): хромшпинелидов - от 80 до 90; серпентина - 5-15; карбонатов - 4-7; остальные минералы - менее 1. В массивных хромитовых рудах содержится (в %): Cr₂O₃ - 55-63, в густо вкрапленных - 45-55, Al₂O₃ - 8-15, MgO - 10-30. Отношение Cr₂O₃ : "FeO" > 4. Хромитовые руды содержат платину и палладий (первые граммы на тонну).



Сарановское месторождение приурочено к Сарановскому хромитоносному габбро-перидотитовому массиву меридионального простирания, имеющему протяженность до 2 км при ширине до 200 м (Горнозаводской район Пермской области). Массив располагается в западном крыле Центрально-Уральского поднятия и находится во внешнем поясе ультрабазитов Урала. Своим возникновением он обязан каледонской активизации субмеридиональных разломов внутри протерозойского фундамента. Массив залегает среди кварц-сланцевых сланцев верхнепротерозойского возраста. По форме он представляет собой моноклинальное согласное тело, круто падающее на восток. На глубинах 300-400 м, по данным бурения, массив переходит постепенно из крутопадающего в пологое тело с углами падения 30-40°.

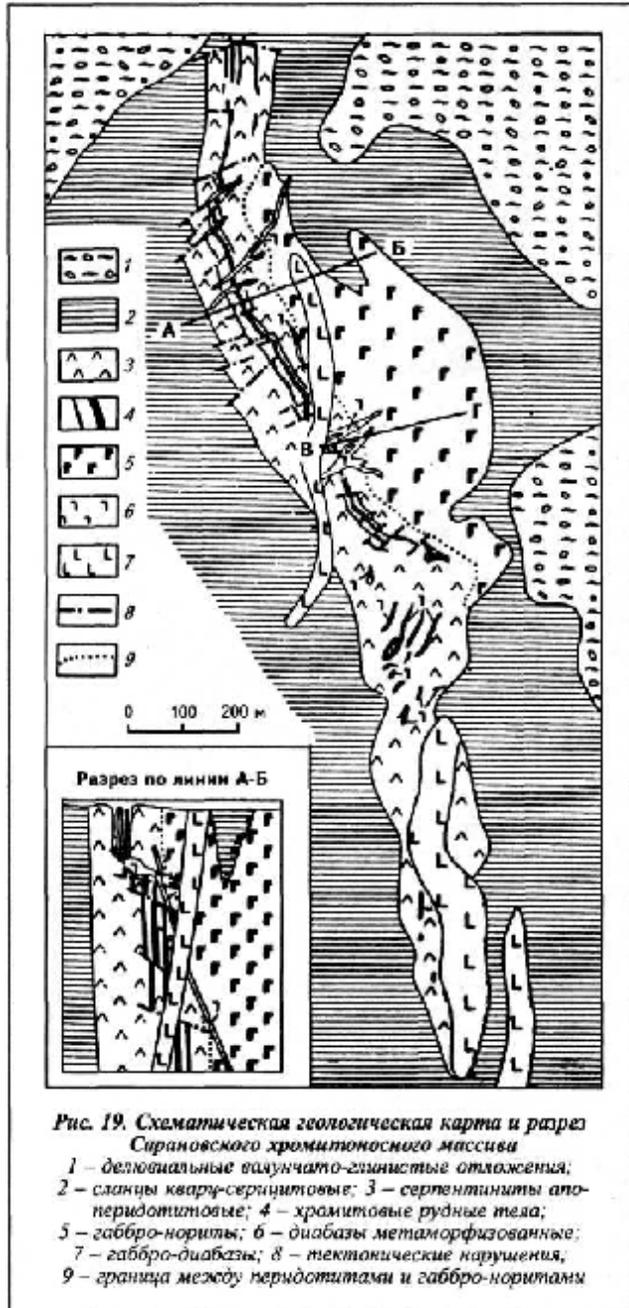
Собственно рудоносная зона шириной 40-45 м состоит из трех параллельных жиллообразных рудных залежей - Западной, Центральной и Восточной (рис. 19), расположенных в осевой части массива. Западная залежь имеет протяженность 910 м при средней мощности 7 м, Центральная - 1200 м при мощности 10-14 м, Восточная -

1100 при мощности 2 м. На глубине встречаются сопутствующие линзообразные тела небольшой мощности (до 1,5 м) и протяженности (десятки метров). Последующими тектоническими нарушениями рудные залежи разбиты на блоки с амплитудой перемещения до нескольких десятков метров. Рудные тела и вмещающие ультраосновные породы пересечены дайками габбро-диабазов.

Все три залежи сложены массивными и густо вкрапленными хромитовыми рудами с небольшим содержанием серпентинизированного оливина, пироксенов и магнетита. Руды средне-зернистые, с размером зерен от долей до 2-3 мм, сидеронитовой структуры и полосчатой текстуры.

Вследствие интенсивных более поздних гидротермальных изменений в рудах нередко присутствуют флогопит, альбит, тальк, магнезит, кварц, кальцит, пирит, халькопирит, пирротин, апатит.

Руды содержат (в % мас): Cr_2O_3 - 37-38; MgO - 12-13; Fe_2O_3 - 5-7; FeO - 14-17; Al_2O_3 - 18-19 и повышенное содержание титана, ванадия и платиноидов. Из-за низкого содержания хрома и высокой железистости и глинозёмистости руды месторождения не пригодны для выплавки феррохрома и используются как огнеупорное и химическое сырье.



РОССЫПНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Элювиально-делювиальные россыпи хромитов образуются в результате выветривания коренных магматических месторождений. К ним относятся валунчатые руды Сарановского месторождения, элювиальные россыпи Алапаевского и Варшавского месторождений на Урале, порошокатые руды коры выветривания верхних горизонтов месторождений Южно-Кемпирсайского района. Подобные месторождения также известны на Кубе, Филиппинах, в Новой Каледонии и на месторождениях Великой Дайки в Зимбабве.

Прибрежно-морские россыпи известны на Тихоокеанском побережье штата Орегон в США, на полуостровах Восточной Камчатки и на берегу залива Терпения на О.Сахалине в России, а также на побережье Адриатического моря в Албании и Средиземного моря в Турции.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

В общем цикле геологического развития месторождения хромитов возникают дважды - на ранней стадии геосинклинального этапа и на стадии активизации платформенного этапа геологической истории.

На ранней стадии геосинклинального этапа, в связи с гипербазитами (дуниты, гарцбургиты), представляющими крайние дифференциаты перидотитовой формации, создаются магматические месторождения, среди которых наиболее существенны позднемагматические образования. Размещение рудоносных массивов ультраосновных пород и находящихся в них месторождений этой стадии контролируется глубинными разломами, проходящими по бортам эвгеосинклинальных трогов и формирующими протяженные хромитоносные пояса. Их примером могут служить хромитоносные пояса Урала, Балкан и Малой Азии.

На стадии активизации платформ создаются массивы расслоенных пород габбро-норитовой и пироксенитовой формаций, для которых типичны раннемагматические хромитовые месторождения.

Хромитовые месторождения формировались в различные циклы геологического развития: протерозойский (ЮАР, Индия, США); каледонский (Норвегия); герцинский (Урал, Казахстан, Средняя Азия, вероятно большая часть Балкан, Турции и Ирана); альпийский (Малый Кавказ, Сахалин, Камчатка, Албания, Куба, Филиппины, Новая Каледония). Наиболее крупные месторождения, связанные с дунит-перидотитовой формацией, образовались в палеозойских гипербазитовых массивах, а уникальные месторождения в расслоенных интрузивах сформировались в докембрии.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИТАНА

Открытый в 1791 г., титан лишь в середине XX в. нашел широкое применение благодаря своим уникальным свойствам. Температура его плавления (1725 °С) выше, чем у железа и никеля, а плотность - почти вдвое меньше. Титан отличается высокой прочностью и коррозионной стойкостью.

Титановые сплавы применяются как конструктивный металл в космической технике, авиационной, автомобильной, судостроительной, энергомашиностроительной, гидролизной, пищевой, медицинской отраслях промышленности, железнодорожном транспорте и отрасли цветной металлургии, где они надежно и длительно эксплуатируются во многих агрессивных средах в диапазоне температур от сверхнизких до +500-600 °С и выше. Главнейшее значение имеют титанованадиевые сплавы, отличающиеся высокой прочностью, ковкостью и свариваемостью; карбид титана применяется для изготовления сверхтвердых сплавов, двуокись титана - для производства стойких титановых белил, пластмасс и в целлюлозно-бумажной отрасли промышленности.

Общие запасы TiO_2 в 20 зарубежных странах оцениваются в 420 млн т. Около 90 % этих запасов сосредоточено на Украине, в Бразилии, ЮАР, Австралии, Индии, Китае, Норвегии и Канаде. Производство титановых концентратов (88 % ильменитового и 12 - рутилового) в зарубежных странах составляет 5,2 млн т. Основные производители концентрата - Австралия, ЮАР, Канада и Норвегия. Производство металлического титана налажено в России, США, Великобритании и Японии. Цены на ильменитовый концентрат составляют около 100, а на рутиловый - 800-900 дол/т.

Уникальные коренные месторождения обладают запасами более 50 млн т, крупные - от 30 до 50, средние - от 10 до 30, мелкие - менее 10 млн т двуокиси титана. Для россыпных месторождений порядок цифр вдвое меньше. Промышленными месторождениями считаются те, которые содержат в рудах более 10 % TiO_2 в коренных месторождениях и более 10 % ильменита или 1,5 % рутила - в россыпях. Вредные примеси в металлургическом сырье - сера и фосфор, для производства белил - хром.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Известно пять изотопов титана с массовыми числами 46-50, из них наиболее распространен ^{48}Ti . Кларк титана 0,45 %, повышенные концентрации титана отмечаются в основных (0,9 %) и средних (0,8 %) интрузивных породах. Коэффициент концентрации титана около 20.

В природных условиях титан четырехвалентен, встречается только в кислородных соединениях. Повышенные его концентрации характерны для габбро, горнблендитов, пироксенитов, а также щелочных пород агпайтового ряда. Минералы титана устойчивы к выветриванию и образуют значительные концентрации в россыпях.

В настоящее время известно около 70 минералов титана. Во многие из них титан входит в качестве примеси. Промышленное извлечение титана в основном производится из ильменита - $FeTiO_3$ (31,6 %) и рутила - TiO_2 (60 %). В ильмените и рутиле присутствуют ванадий, скандий, тантал и ниобий. Извлечение ильменита из титаномагнетита возможно, если поперечный размер зерен ильменита больше 0,3 мм. Частично титан извлекают из лейкоксена - конечного продукта изменения ильменита и сфена (в лейкоксене по ильмениту - 96 %, по сфену - 67 % TiO_2) и лопарита ($Na,Ce TiO_3$ (26,6 % Ti).

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Среди промышленных месторождений титана выделяются: магматические, выветривания, россыпные, вулканогенно-осадочные и метаморфические.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Наиболее значительные магматические месторождения титана приурочены к крупным массивам анортозитовой формации площадью в сотни и тысячи квадратных километров. В России к ним принадлежат месторождения Восточного Саяна (Мало-Тагульское, Лысанское, Кручининское), в Канаде - Лак-Тио, в США - Тегавус.

Мало-Тагульское месторождение ильменит-титаномагнетитовых руд приурочено к одноименному массиву габбро-анортозитов площадью более 200 км² (Иркутская область, Восточный Саян). На месторождении выявлено шесть рудных участков, в пределах которых встречены рудные тела с промышленным содержанием железа и титана. В плане рудные залежи имеют размеры от 50x100 до 130x850 м. Падение их крутое, прослежены до глубины 300 м. Содержание железа в рудах 20-33 %, TiO₂ в титаномагнетитовых концентратах - 12-16 %.

Месторождение Лак-Тио находится в провинции Квебек и обладает запасами в 125 млн т. Оно дает около 80 % добычи ильменитовых концентратов Канады, содержащих 35 % TiO₂ и 40 % железа. Месторождение залегает в анортозитовом массиве, имеющем овальную форму размером 150x50 км, и состоит из трех рудных тел пластообразной формы, полого падающих согласно со структурой массива. Главное рудное тело площадью 1 км² имеет мощность до 90 м. В рудных телах наблюдаются многочисленные ксенолиты анортозита. Богатые руды сложены ильменитом (75 %) и гематитом (25 %). Сопутствующие минералы представлены сульфидами (пиритом, халькопиритом, пирротинном), полевыми шпатами, пироксенами и местами биотитом. Содержание в богатых рудах TiO₂ - 32-36 %, Fe - 39-43 %. Месторождение относится к позднемагматическим образованиям, связанным с процессами накопления остаточного рудного расплава и его внедрением в тектонически ослабленные зоны анортозитовых пород (трещинные интрузии).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Современные и погребенные титаноносные коры выветривания образуются на габбро-анортозитах (Волынский массив) и метаморфических породах (Украинский щит; Казахстан). При выносе щелочных элементов и образовании глинистых минералов группы каолинита в коре происходит накопление более стойких акцессорных минералов, в том числе ильменита и рутила. При этом зерна рудных минералов сохраняют первоначальную форму кристаллов, не окатаны. Мощность кор выветривания достигает нескольких десятков метров. Содержание ильменита может достигать нескольких сотен, а рутила - нескольких десятков килограммов на кубический метр.

Минеральный состав коренных пород существенно влияет на качественный и количественный состав рудных минералов в корях выветривания. Для Волынского габбро-анортозитового массива Украины, например, характерны коры, обогащенные только ильменитом (300-500 кг/м³), что связано с отсутствием рутила в коренных породах. На Кундыбаевском месторождении в Казахстане в корях выветривания, образовавшихся на метаморфических породах, содержится до 180 кг/м³ ильменита и до 74 - рутила.

РОССЫПНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Среди россыпных месторождений титана различаются две разновидности: прибрежно-морские и континентальные. Главными являются прибрежно-морские комплексные ильменит-рутил-цирконовые россыпи; меньшее значение имеют континентальные аллювиально-делювиальные россыпи ильменита. Из современных прибрежно-морских россыпей рутил и ильменит добывают в Западной Австралии, Индии, Шри-Ланке, Сьерра-Леоне, частично в Бразилии и США. Крупные запасы ильменитовых песков выявлены у северного побережья Гренландии, на восточном побережье Мадагаскара, вдоль берегов озера Малави, на побережье Мозамбика и Новой Зеландии.

В России главное значение имеют древние прибрежно-морские россыпи, распространенные в отложениях неогена и палеогена Ставропольского поднятия, палеогена Зауралья, Северного Приаралья, Северного Устья, юго-западной части Западно-Сибирской плиты, палеогена и мезозоя Чулымо-Енисейской и Амуро-Зейской впадин, мезозойских депрессий Уральской складчатой системы, Приенисейской части Западно-Сибирской плиты, Иркутского угленосного бассейна, палеозоя Тиманского и Томь-Колыванского поднятий.

Прибрежно-морские ильменит-рутил-цирконовые комплексные россыпи отличаются большими размерами и крупными запасами. Для них характерны пласто- или линзообразные залежи, мощность которых достигает десятков метров, а протяженность - нескольких десятков километров при ширине до километра. Главный породообразующий минерал россыпи - кварц, меньшее значение имеет каолинит. Пески обычно тонко- и мелкозернистые.

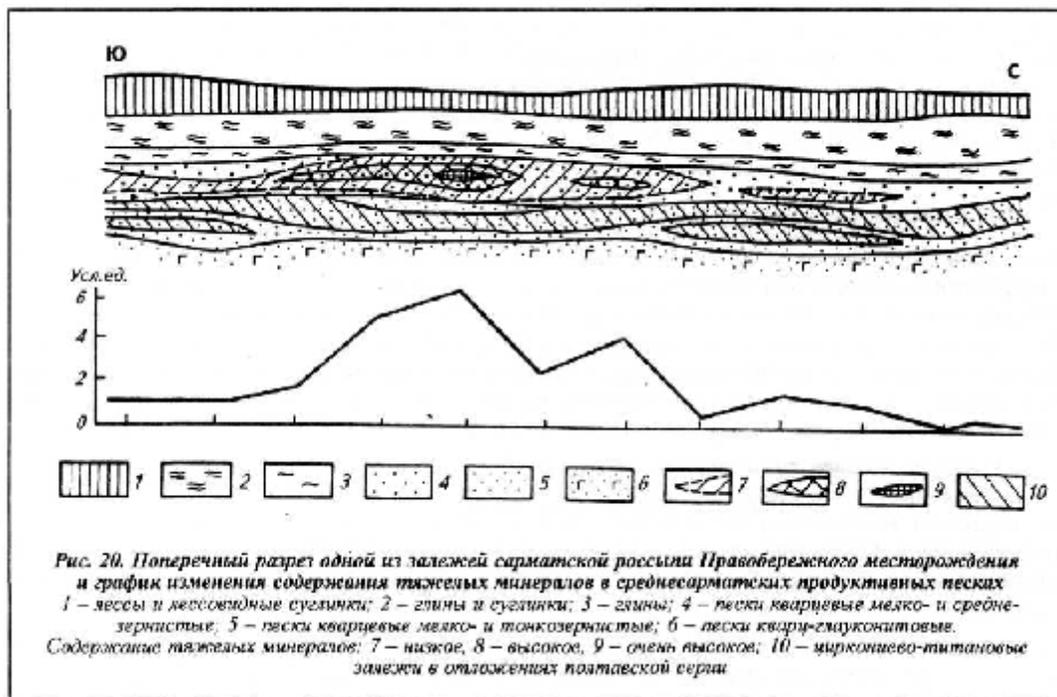
Промышленное содержание в россыпях ильменита и рутила - от десятков до сотен килограммов на кубический метр. Источником прибрежно-морских россыпей служили коры выветривания континентов - кристаллические породы, покровы эффузивов, массивы гранитных и других пород.

Континентальные россыпи ильменита распространены преимущественно в аллювии, элювии и пролювии четвертичных, палеогеновых и нижнемеловых отложений. Рудные тела аллювиальных россыпей имеют обычно лентовидную форму и приурочены к долинам рек. Рудные минералы накапливаются в нижних горизонтах, в наиболее грубообломочном материале, представленном крупнозернистым песком, гравием или мелким галечником. По минеральному составу континентальные россыпи обычно полимиктовые (кварц, полевой шпат, каолинит). Размеры зерен ильменита 0,1-0,25 мм и более; окатанность их слабая. Содержание ильменита в промышленных континентальных россыпях изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен килограммов на кубический метр.

Примером прибрежно-морской погребенной россыпи может служить Правобережное месторождение Приднестровского района, а континентальной - Иршинское месторождение Володарско-Волынского района.

Правобережное. Прибрежно-морские россыпи этого месторождения приурочены к полтавским и сарматским песчано-глинистым отложениям мощностью от 10 до 60 м, перекрытых лессами, лессовидными суглинками и глинами неогенового и четвертичного возраста. Рудные залежи имеют пластообразную форму при резком преобладании длины над шириной и отличаются значительной мощностью продуктивных песков. Отчетливо горизонтальная или пологонаклонная (2-10°) слоистость рудных песков подчеркивается скоплением тяжелых минералов (до 70-90 %), преимущественно титановых и цирконовых (рис. 20).

Рудоносные пески имеют следующий минеральный состав: лейкоксенизированный ильменит (44 %), рутил (16 %), циркон, дистен, силлиманит, турмалин (около 10 % каждого). В небольших количествах встречаются хромит, анатаз, брукит, корунд, ксенотим и др. Минералы, как правило, мелкие (0,1-0,2 %), хорошо окатанные.



ВУЛКАНОГЕННО-ОСАДОЧНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Нижний Мамон приурочено к титаноносным вулканогенно-осадочным образованиям на юге Воронежской области в районе с. Нижний Мамон. Месторождение сложено осадочными и вулканогенно-осадочными породами палеозоя, мезозоя и кайнозоя, согласно залегающими на докембрийском фундаменте. Отложения ястребовского горизонта девонского возраста имеют мощность от нескольких до 35 м. Глубина залегания 50-70 м. Общая протяженность находящихся в его составе вулканогенно-осадочных пород примерно 100 км при ширине 20-40 км. Основное направление их простираения совпадает с зоной разлома, с которой связана вулканическая деятельность. Наибольшее количество ильменита приурочено к грубообломочным туфам, туффитам и туфопесчаникам, в которых эффузивные обломки представлены преимущественно породами основного состава. Терригенного материала в туфах менее 10 %, в туфопесчаниках - около 90. Цементом служит магнезиально-железистый хлорит. Наиболее обогащены ильменитом (иногда до 50 % объема) грубообломочные разности туфогенных пород, размеры зерен ильменита в среднем 0,25-0,3 мм. Количество ильменита резко уменьшается с увеличением в толще терригенного материала. Образование вулканогенных пород, обогащенных ильменитом, вероятно, происходило в мелководном морском бассейне и явилось следствием подводной вулканической деятельности.

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Различают месторождения метаморфизованной и метаморфогенной групп.

Метаморфизованные месторождения титана образуются при метаморфизме древних россыпей и коренных первично-магматических руд. Верхнепротерозойские метаморфизованные россыпи в пределах Башкирского поднятия приурочены к песчаникам зильмердакской свиты, где встречены прослои мощностью до 2,5 м, обогащенные ильменитом (до 250-400 кг/т) и цирконом (до 30 кг/т).

Высококачественные ильменит-магнетитовые массивные и вкрапленные ильменитовые руды образуются при региональном метаморфизме первично-

магматических руд. Примером промышленных месторождений этого типа является **Отонмяки** в Финляндии, приуроченное к амфиболитам, образовавшимся в результате метаморфизма рудоносного габбро. Богатые руды этого месторождения в среднем содержат 12 % TiO_2 .

Ярегское месторождение лейкоксена (Южный Тиман) - необычный представитель этой группы; представляет собой погребенную метаморфизованную девонскую россыпь, приуроченную к песчаникам эйфельского и живетского ярусов. Продуктивные горизонты залегают на метаморфических сланцах рифея. Нижний рудный горизонт сложен грубо- и круп-нозернистыми кварцевыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов, верхний - полимиктовыми конгломератами и разнозернистыми кварцевыми песчаниками. Рудные минералы представлены полуокатанными зернами лейкоксена размером 0,2-1,5 мм и единичными зернами ильменита. В богатых пробах рудоносного песчаника содержится 8-10 % TiO_2 . Месторождение образовалось, очевидно, в результате размыва кор выветривания метаморфических сланцев рифея.

Метаморфогенные месторождения титана приурочены к древним кристаллическим сланцам, гнейсам, эклогитам и амфиболитам. Образуются в результате метаморфизма интрузивных, эффузивных и осадочных пород, обогащенных титатом. К этому типу относятся докембрийские хлоритовые сланцы, содержащие до 20 % рутила (месторождение Харворд, США) и докембрийские гнейсы с рутилом - до 25 % (месторождение Плюмо Идальго в Мексике).

На Кузнечихинском месторождении (Средний Урал) в амфиболитах содержится около 1,5 % рутила, а в эклогитах Шубинского месторождения (Южный Урал) - 4,5.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВАНАДИЯ

Открыт в 1801 г. мексиканским минералогом Дель Рио; используется с начала XX в. для легирования чугуна и стали, удаления из них кислорода и азота. Сплав железа с 35-80 % ванадия – феррованадий - используется для легирования черных металлов (90 % потребности в ванадии). Титано-ванадиевые сплавы (с содержанием V до 17 %) применяются для изготовления деталей реактивных самолетов и космической техники. Известны также сплавы ванадия с Cu, Ta, Nb, Zr, Ni, Co, Al и Mg.

Легированный ванадием чугун (0,1-0,35 % V) широко применяется в машиностроении для изготовления частей механизмов, работающих с повышенным напряжением. Стали, легированные ванадием (до 1-5 %), применяются для изготовления быстрорежущих инструментов. В химической отрасли промышленности ванадий применяется в качестве катализатора при крекинге нефти, производстве кислот, анилиновых красок, каучука, а также для окраски стекол и керамики, изготовления цветной пленки.

Общие запасы V_2O_5 ванадия в 19 странах мира 60 млн т, 90 % из них сосредоточено в России, ЮАР, Венесуэле, США и Китае. Производство ванадиевых продуктов (V_2O_5) достигло 52 тыс.т/год. Главными производителями являются ЮАР, Россия, Китай и США. Цена феррованадия в 2005 г составляла 35-40 дол/кг.

Большинство месторождений, из руд которых извлекают ванадий, комплексные. Ванадий получают попутно с добычей главных компонентов: Fe, Ti, U, Pb, Zn, P, а также нефти. В России сырьем для производства ванадия служат титаномагнетитовые руды. После доменной плавки этих руд почти весь ванадий переходит в чугун. В процессе передела чугуна на сталь остаются шлаки, содержащие до 25 % V_2O_5 . Эти шлаки подвергают обжигу с сильвинитом или содой и последующему выщелачиванию с выделением пентоксида ванадия; сплавляя его с железом, получают феррованадий.

В зарубежных странах около 90 % ванадия получают из титаномагнетитовых и ильменит-магнетитовых руд, остальные - из уран-ванадиевых (карнотитовых), ванадиевых (роскоэлитовых) руд и фосфоритов, бокситов, глин зоны аргиллитизации, окисленных полиметаллических руд и нефти. В США две трети производства ванадия связано с его получением из нефти, поставляемой из Венесуэлы.

К уникальным относят месторождения с запасами V_2O_5 в миллионы тонн, к крупным - сотни, средним - десятки и мелким - единицы тысячи тонн. Минимальные содержания ванадия в титаномагнетитовом концентрате 0,3 %, вредные примеси - Ca и P.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

В природе известно два стабильных изотопа ванадия - редкий ^{50}V и широко распространенный ^{51}V . Кларк ванадия 0,02 %. Повышенные содержания ванадия отмечаются в габбро и базальтах. Коэффициент концентрации ванадия равен 30.

В магматических образованиях известны соединения только трехвалентного ванадия. Близость ионных радиусов V^{3+} и широко распространенных в магматических породах Fe^{3+} и Ti^{4+} приводит к тому, что ванадий в гипогенных процессах находится в рассеянном состоянии. Концентраторами его являются минералы, содержащие железо и титан, - титаномагнетит, сфен, рутил, ильменит, пироксены, амфиболы и гранаты.

В гидротермальных образованиях встречаются минералы трех-, четырех- и пентавалентного ванадия. Склонность ванадия к образованию комплексных соединений с галоидами (хлор, фтор) способствует переносу ванадия гидротермальными растворами.

В экзогенных условиях ванадий переносится речными и морскими водами в виде взвесей и истинных растворов, а также в адсорбированном состоянии. В зоне

гипергенеза растворы, обогащенные ванадием, легко образуют ванадаты - соли ортованадиевой кислоты (H_3VO_4).

Известно около 90 минералов ванадия. Большинство из них - ванадаты, остальные относятся к оксидам, силикатам и сульфидам. Существуют также многочисленные ванадийсодержащие минералы с содержанием V не более 2-10 %.

Промышленные минералами ванадия: титаномагнетит (с содержанием 0,3-10 % V_2O_5), рос-коэлит $KV_2AlSiO_3O_{10} [OH]_2$ (19-29), карнотит $K_2U_2[VO_4]_2O_4 \cdot 3H_2O$ (20), ванадинит $Pb_5[VO_4] Cl$ (19), деклуазит $(Zn, Cu)Pb[VO_4]OH$ (20-23), кулсонит $Fe(Fe, V)_3O_4$ (5) и патронит VS_4 (29).

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

К промышленным месторождениям ванадия принадлежат: магматические, метасоматические, выветривания, россыпные, осадочные и метаморфогенные образования.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Наиболее крупные массивы ванадиеносных ультраосновных и основных пород, площади которых измеряются в несколько сотен и даже тысяч квадратных километров, приурочены к анортозитовой формации (Канадский щит) и формации дифференцированных габбровых и норитовых интрузий (бушвельдский комплекс). Несколько десятков квадратных километров достигают площади пород габбро-пироксенит-дунитовой формации, с которыми связаны месторождения ванадийсодержащих титаномагнетитов на Урале. Запасы ванадия на отдельных месторождениях указанных формаций составляют несколько миллионов тонн при содержании ванадия в рудах 0,1-1 %.

Главные минералы-концентраты ванадия - титаномагнетит и магнетит. В основном они кристаллизовались позднее силикатов, о чем свидетельствует сидеронитовая структура руды. Наиболее высокие концентрации ванадия наблюдаются в рудных минералах пород основного, меньшие - в породах ультраосновного состава.

Примерами уникальных месторождений ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд являются Качканарское железорудное месторождение на Урале и ильменит-магнетитовые месторождения бушвельдского комплекса в ЮАР.

МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В Онежском прогибе (Южная Карелия), выполненном углеродсодержащими вулканогенно-осадочными породами раннепротерозойского возраста, обнаружены месторождения уран-благороднометалльно-ванадиевых руд. В районе выявлено 11 рудоносных зон, представленных антиклинальными складками, ядра которых сложены доломитами и глинисто-карбонатными породами, а крылья - углеродистыми сланцами и алевритами. Рудные залежи, приуроченные к контакту этих пород, имеют сигарообразную, шнуровидную и ленточную форму и клиновидное сечение. Глубина их залегания 150-180 м, мощность до 40 м, протяженность до 2,5 км. Среднее содержание V_2O_5 в рудах 2,5-3,5 %, урана - 0,15-0,25 %, а также повышенное содержание золота, серебра, платины и других элементов.

Ванадий заключен в слюдах - роскоэлите, флогопите, а также в гематите и других минералах. Уран представлен настураном, коффинитом и частично уранинитом. Благородные металлы (Au, Ag, Pt и Pd) связаны с сульфидами и селенидами Pb, Bi и Cu.

Основной объем рудных тел приходится на карбонатно-роскоэлит-мусковитовые метасома-титы, являющиеся главными источниками V и U. Жильные и брекчиевые благороднометалльные руды тяготеют к осевым частям залежей, где они образуют системы кварц-карбонат-селенид-сульфидных жил и штокверков, содержащих платиноиды, золото, серебро, медь и молибден. Наиболее высокие концентрации этих элементов наблюдаются в зоне окисления-восстановления, развитой над жильно-штокверковым оруденением.

Прогнозные ресурсы V_2O_5 месторождений Онежского прогиба оцениваются в 300 тыс. т.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Месторождения зоны окисления полиметаллических месторождений широко распространены в Африке (Берг-Аунас, Тсумб, Абенаб в Намибии; Брокен-Хилл в Замбии), встречены в Австралии, Аргентине, Мексике, России, США. Как правило, это небольшие по запасам месторождения ванадия, который концентрируется только в окисленных рудах (до 5-6 %). Коренные сульфидные руды содержат ванадий в небольших количествах (0,00n-0,0n %). Рудные тела имеют трубообразную форму, верхняя часть их сложена окисленными рудами, содержащими церуссит, смитсонит, малахит, азурит, англезит и минералы ванадия - деклуазит, купродеклуазит и ванадинит. Глубина зон окисления обычно не превышает нескольких сот метров. Иногда они встречаются и на больших глубинах, что связано с циркуляцией подземных вод по глубинным структурам повышенной пористости.

Карнотитовые и роскоэлитовые месторождения в пестроцветных отложениях (алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты) мезозойского чехла (тип "плато Колорадо") распространены во многих странах, но наибольшее значение они имеют в США, где в них отмечается высокая концентрация ванадия (до 1,7 %), повышенные содержания урана (0,18-0,3 U_3O_8) и меди (0,5).

РОССЫПНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Крупные прибрежно-морские россыпи ванадийсодержащих титаномагнетитовых песков известны в Новой Зеландии (запасы 800 тыс. т с содержанием 0,7 % V_2O_5). Подобные россыпи обнаружены на побережье Черного и Каспийского морей, на восточном побережье Камчатки и на Курильских островах.

ОСАДОЧНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В пластовых фосфаритах Скалистых гор (США) пермского возраста отмечены наиболее высокие концентрации ванадия (до 0,22 %), который получают из отходов предприятий, перерабатывающей фосфориты.

Повышенной ванадиеносностью характеризуются высокосернистые сорта нефти Урало-Волжской провинции, Венесуэлы и Ирана. Патронит в асфальтитах успешно отработывался в единственном месторождении этого типа - **Минас Рагра (Перу)**, представленном жилообразной залежью асфальтита протяженностью до 1 км и мощностью 8-12 м, находящейся в глинистых сланцах, песчаниках и известняках мелового возраста. Содержание ванадия в рудной массе около 6 %, в золе - до 36, кроме того, руда содержала никель и молибден.

Значительное количество ванадия концентрируется в ряде осадочных месторождений железных руд, бокситов, углей и углеродисто-кремнистых сланцев. В бурых железняках Лотарингского и Керченского бассейнов содержится 0,05-0,1% V_2O_5 . Повышенные содержания (0,1-0,2 % V_2O_5) установлены в бокситах Италии, Югославии, Индии, в углях Великобритании, России и США, в углеродисто-кремнистых сланцах хребта Каратау (Казахстан).

МЕТАМОРФОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Отонмяки (Финляндия) - ильменит-магнетитовое месторождение, приуроченное к амфиболитам, залегающим в гранитогнейсах. В амфиболитах отмечены две зоны линзовидных рудных тел, сложенных ильменит-магнетитовыми рудами со средним содержанием ванадия 0,62 %. Из получаемого магнетитового концентрата ежегодно извлекают 1,3-1,5 тыс. т ванадия.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

В эндогенных условиях ванадий входит в состав титаномагнетитовых и ильменит-магнетитовых месторождений, возникающих на ранней стадии геосинклинального этапа в связи с интрузиями пород габбро-пироксенитовой формации. В экзогенных условиях он связывается с осадочными толщами углеродисто-кремнистых черных сланцев геосинклинального этапа, а также с осадочными рудами железа, бокситов, углей платформенного этапа и зонами окисления месторождений уран-ванадиевого и полиметаллического состава.

Главные эндогенные месторождения ванадия сосредоточены среди образований протерозойской и каледонской металлогенической эпох. Для экзогенных месторождений выделено восемь эпох формирования, из которых главнейшими являются глобальная раннепалеозойская эпоха распространения металлоносных углеродисто-кремнистых сланцев и мезозойско-кайнозойская эпоха формирования морских и речных оолитовых железных руд, являющихся концентраторами ванадия.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ

В чистом виде никель был получен в 1751 г., промышленное производство никеля началось в первой половине XIX в. Никель характеризуется высокой химической и термической стойкостью и используется для покрытия металлических изделий. Добавка его к сталям (от 0,5-7 до 35 %) повышает их вязкость, упругость. Большая часть Ni (около 60 %) используется в металлургии для производства нержавеющей сталей. Применяются также сплавы никеля с Cu, Zn, Al (латунь, нейзильбер, мельхиор, бронза), сплав никеля и хрома (нихром), а также монетный сплав (75 % Cu + 25 % Ni).

Общие запасы никеля в 35 зарубежных странах на начало 1994 г. оценивались в 116 млн т, из них разведанные запасы составляют более 66 млн т. Наиболее крупными запасами обладают Новая Каледония (около 25 % всех запасов зарубежных стран), Куба, Канада, ЮАР, Индонезия, Китай, Албания, Австралия, Греция. В России никелевые месторождения расположены на Кольском п-ове, в Красноярском крае, на Южном Урале. Уникальные месторождения содержат более 500 тыс. т металла, крупные - 500-250, мелкие - менее 100. Основу минерально-сырьевой базы никеля составляет относительно небольшое число месторождений: в 34 наиболее крупных сосредоточено 91 % мировых подтвержденных запасов, они обеспечивают 93 % мировой добычи. Добыча никелевых и никельсодержащих руд ведется в 26 странах мира, ежегодное производство металлического никеля превышает 850 тыс. т. Основными мировыми производителями металлического никеля являются Россия (почти 22 %), Канада (более 16) и Япония (более 12). Обеспеченность разведанными запасами современного уровня добычи и потребления составляет более 70 лет. Стоимость никеля в 2007 г составляла 35-37 тыс. дол/т. (London Metal Exchange)

Кларк никеля - $5,8 \cdot 10^{-3}$ %, повышается от кислых пород ($8 \cdot 10^{-4}$) к основным ($1,6 \cdot 10^{-2}$) и ультраосновным ($2,2 \cdot 10^{-1}$). Этим определяется связь промышленных концентраций никеля с базит-гипербазитовыми магмами подкоровых очагов. В ультраосновных породах Ni связан с оливином, в котором он изоморфно замещает железо и магний (до 0,4 %). Никель характеризуется большим сродством с серой, поэтому при достаточной концентрации ее в магматическом расплаве он обособляется в виде сульфидов вследствие ликвации расплава на силикатную и сульфидную фазы. Вместе с никелем в сульфидный расплав переходят медь, кобальт, платиноиды, часть железа. Вследствие этого образуются специфические по составу сульфидные медно-никелевые руды.

Из гранитоидов никель может иногда выноситься гидротермальными растворами вместе с Co, As, S, а также Bi, Ag, U и образовывать жильные месторождения арсенидов и сульфидов.

В гипергенных условиях никель накапливается в корках выветривания, формирующихся на массивах серпентинизированных гипербазитов.

Известно 45 минералов никеля, из них промышленное значение имеют в сульфидных рудах: пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ (22-42 % Ni), миллерит NiS (65), никелин NiAs (44), хлоантит NiAs_{2-3} (4,5-21,2), полидимит Ni_3S_4 (40-54), герсдорфит NiAsS (26-40); в силикатных рудах: гарниерит $\text{NiO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (NiO - 46 %), непуит $12\text{NiO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (20-46), ревденскит $3(\text{Ni}, \text{Mg})\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (46) и никельсодержащий нонтронит $\text{Fe}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. В зонах окисления мышьяковистых руд развивается аннабергит $\text{Ni}_3\text{As}_3\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (37 % NiO), имеющий в основном поисковое значение.

Основные типы никелевых руд - сульфидные медно-никелевые и силикатные никелевые.

Сульфидные медно-никелевые руды состоят из пирротина, халькопирита, пентландита. Среднее содержание никеля в них колеблется от 0,25 до 4 %, меди - от

0,2 до 7,5 % в зависимости как от типов месторождений, так и от типов руд - сплошных, брекчиевидных или вкрапленных. При содержании никеля более 2 % измельченные руды поступают в плавку без обогащения. При более низких содержаниях они обогащаются методом флотации с получением никелевых концентратов, содержание никеля в которых достигает 12 %. Помимо никеля концентраты содержат попутно извлекаемые медь, кобальт, золото, серебро, платину и платиноиды, селен и теллур.

Латеритные никелевые руды представляют собой рыхлые глинистые породы с обломками серпентинитов, кремнистых образований, бурого железняка. Среднее содержание никеля в латеритных рудах колеблется от 0,9 до 2,9 %. Выделяется две разновидности руд - оксидные (лимонитовые) и силикатные (гарниеритовые).

Оксидные руды сложены охрами и охристо-кремнистыми образованиями и отличаются высоким содержанием кобальта, присутствующего в форме асболанов. Никель содержится в гидроксидах железа. Руды после сушки и обжига перерабатываются гидрометаллургическим способом с извлечением никеля от 60 до 90 %.

Силикатные руды перерабатываются пирометаллургическим способом с прямым получением ферроникеля.

Продукция никелевого производства подразделяется на два класса: класс 1-й включает разнообразные продукты с чистотой металла не меньше 99,9 %, класс 2-й - оксид никеля (75-90 %), ферроникель (20-40 %) и другие продукты.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В настоящее время выделяют две группы промышленных типов месторождений – магматические и кор выветривания.

В магматических месторождениях сульфидных медно-никелевых руд сосредоточено около 29 % запасов никеля, в латеритных рудах месторождений кор выветривания - около 70 %. Кроме того, никель попутно извлекается из комплексных руд плутоногенных гидротермальных месторождений, в первую очередь принадлежащих рудным формациям - арсенопирит-глаукоdot-кобальтиновой, шмальтин-хлоантит-никелиновой, пятиэлементной (Ni-Co-Ag-Bi-U).

В России в сульфидных медно-никелевых месторождениях сосредоточено около 89 % разведанных запасов, 11 % - в силикатных никелевых, менее 0,1 % - в кобальтовых арсенидных и сульфоарсенидных.

В ближайшие годы, возможно, начнется промышленное освоение месторождений железо-марганцевых конкреций океанического дна - будет создан новый источник металлов, в том числе никеля (новый промышленный тип месторождений). Ресурсы никеля, заключенные в железо-марганцевых конкрециях на дне Мирового океана, достигают 73 млрд т, среднее содержание никеля в конкрециях - 1,3 %.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ликвационные магматические месторождения сульфидных медно-никелевых руд связаны с расслоенными интрузивами ультраосновного и основного состава. Рудоносные интрузивы располагаются исключительно в пределах зон активизации платформ. Они приурочены к архейским зеленокаменным поясам, протерозойским рифтогенным структурам, каледонским и герцинским зонам тектоно-магматической активизации древних платформ. Рудоносные массивы являются составными частями сложных и длительно формировавшихся магматических комплексов, включающих ранние лавовые излияния и толщи вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, следующие за ними пластовые рудоносные интрузии и поздние дайки основного состава. Интрузивные массивы, приуроченные обычно к пологим синклиналям, имеют

форму доломитов. В основании их обособляются более основные разновидности (до перидотитов), в верхних частях - более кислые (габбро, габбро-диориты). Нередко наблюдается послойное чередование основных и кислых дифференциатов.

Месторождения формируются в результате процесса ликвации, приводящего к обособлению сульфидного расплава. Выделившиеся каплевидные обособления вследствие гравитационной сепарации сливаются, образуя пластообразные скопления. Силикатный расплав кристаллизуется раньше сульфидного, поэтому последний в ряде случаев может отжиматься в трещины, зоны отслоения и даже во вмещающие породы на расстояние до 100-150 м. Таким образом, рудные тела обычно размещаются внутри рудоносных материнских массивов или в непосредственной близости от них. Они представлены зонами вкрапленных сингенетических руд и прожилково-вкрапленными рудами, имеющими секущие контакты и эпигенетический облик.

По морфологическим признакам выделяется четыре группы рудных тел: 1) пластовые "висячие" залежи вкрапленных руд; 2) пластовые и линзообразные залежи донных массивных "шлировых" и прожилково-вкрапленных руд, иногда проникающих в экзоконтактовую зону; 3) линзы и неправильные тела приконтактовых брекчиевых руд; 4) жилы.

Руды медно-никелевых месторождений характеризуются комплексным составом: помимо Cu и Ni из них извлекают Co, платиноиды, Au, Ag, Se, Te. Анализ связи состава руд с составом рудоносных формаций определил возможность выделения на этой основе в геолого-промышленном типе сульфидных медно-никелевых месторождений соответствующих подтипов (А.П.Лихачев). Среди магматических образований базит-гипербазитового ряда, с которыми связаны медно-никелевые месторождения, выделяется три серии: мафическая бессульфидная и слабосульфидная ($MgO < 8 \%$ мас), мезомафическая сульфидоносная (8-33) и ультрамафическая бессульфидная (> 33). Серии, в свою очередь, делятся на магматические группы, которым соответствуют определённые разновидности магм. Каждая из разновидностей магм при кристаллизационной дифференциации образует определённый набор магматических пород (магматические формации), которые выступают в качестве рудоносных для различных подтипов месторождений. Таким образом, выделено шесть рудоносных формаций мезомафической серии: габбро-троктолитовая с богатыми медью никелево-медными рудами; габбро-долеритовая с обогащенными медью никелево-медными рудами; габбро-норит-пироксенит-перидотитовая с медно-никелевыми рудами; габбро-пироксенит-перидотитовая с обедненными медью медно-никелевыми рудами; пироксенит-перидотитовая с бедными медью медно-никелевыми рудами; перидотит-дунитовая с весьма бедными медью медно-никелевыми рудами.

Особое место занимает долерит-норитовая формация с обедненными и бедными медью медно-никелевыми рудами, относящаяся к мафической первично-бессульфидной серии. Отчетливо видно, что соотношение главных ценных компонентов - Cu и Ni в рудах находится в прямой зависимости от уровня содержания MgO в породах формаций. Формационная принадлежность месторождений определяет и содержание попутных компонентов. Например, минералы платиновой группы в большей степени обогащают руды с высоким содержанием Cu (в частности, норильский, бушвельский типы) и в меньших количествах - руды, обогащенные Ni. При этом меняется и соотношение Pt и Pd. Например, в норильских рудах Pd в 3-5 раз больше, чем Pt, а в печенгских - их количество примерно одинаковое.

Медно-никелевые месторождения могут быть подразделены на две группы. В одну входят месторождения недислоцированных областей - палеозойские и мезозойские трапповые формации Сибирской, Китайской, Южно-Африканской платформ, в другую - месторождения дислоцированных областей, связанные с архейскими и протерозойскими магматическими формациями в зеленокаменных поясах, наложенных прогибах и т.д. Известно девять основных провинций

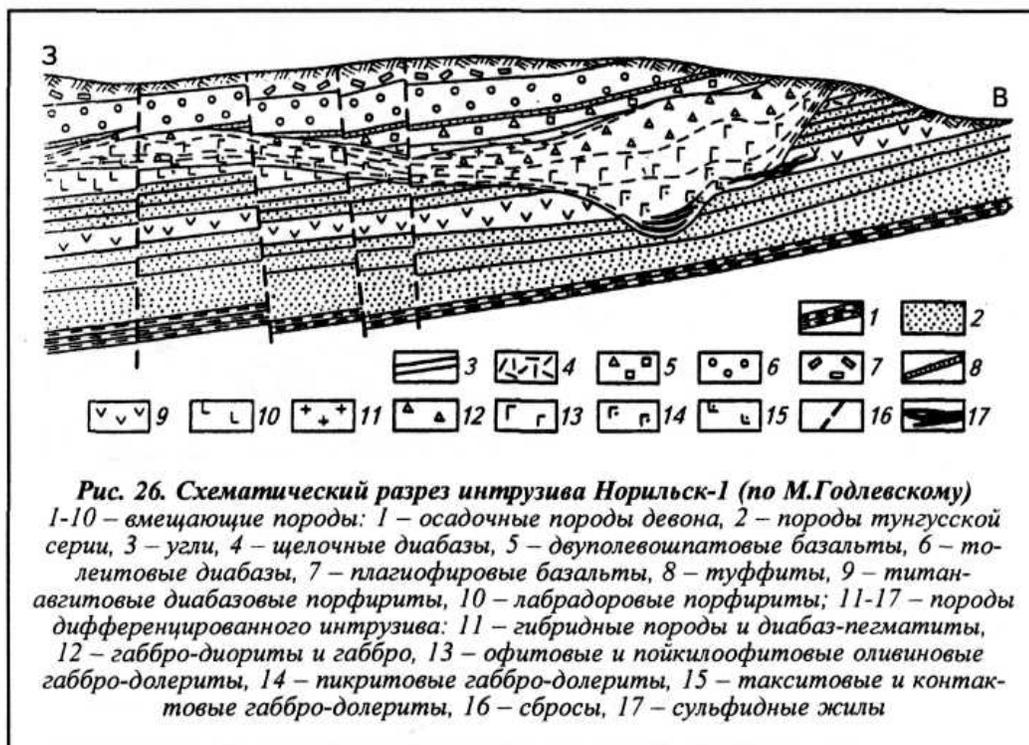
сульфидных медно-никелевых месторождений: Кольский п-ов (Печенга, Мончегорское, Аллареченское); Воронежский кристаллический массив (Нижнемамонское, Еланское); Норильский район (Норильск-1, Талнахское, Октябрьское); Северное Прибайкалье (Йоко-Давыденское); район Садбери в Канаде; район Томпсон в Канаде (Томпсон-Майн, Мистери-Лейк); район Бушвельда в ЮАР; провинция Карру в ЮАР (Инсизва); Западная Австралия (Камбалда, Маунт-Кейт). Отдельные небольшие месторождения известны в Норвегии, Швеции, Финляндии, на Аляске и в Японии.

Норильский тип представлен группой месторождений, среди которых наиболее известны Норильск-I, Норильск-II, Талнахское, Октябрьское. Норильский район приурочен к северо-западной окраине Сибирской платформы, испытавшей интенсивную активизацию, выразившуюся в формировании системы протяженных мульд и разделяющих их валов, осложненных разломами. Последние служили каналами для вывода трапповой магмы. В основании платформенного чехла залегают карбонатные и глинистые породы девона, выше – кон-тинентальная песчано-аргиллитовая формация пермо-карбона (тунгусская серия), которая, в свою очередь, перекрывается базальтами и туфами пермо-триаса. Норильская и Хараелах-ская мульды, разделенные небольшим поднятием, пересекаются Норильско-Хараелахским разломом субмеридионального простирания, проходящим вдоль осей мульд. Разлом контролирует положение всех главнейших месторождений района. Месторождения приурочены к межпластовым дифференцированным интрузивам, относящимся к габбро-долеритовой формации и локализованным в нижней части вулканогенной трапповой серии. Содержание NiO в расплавах коррелирует с их магнезиальностью. Одним из факторов рудоносности является обогащение расплавов серой при ассимиляции раннепалеозойских толщ

Талнахское и Октябрьское месторождения связаны с дифференцированными базит-ги-пербазитовыми интрузиями, залегающими в основании трапповой серии. Рудоносные ин-трузивы образуют ряд отдельных ветвей, часто соединяются между собой, имеют пластообразную, лентовидную форму с раздувами в прогибах подошвы. Протяженность интрузивных тел достигает многих километров, мощность составляет 200-250 м.

В расслоенных магматических телах снизу вверх наблюдается смена пород от ультраосновных до средних. Основная масса сульфидных медно-никелевых руд локализуется в области нижнего эндо- и экзоконтакта никеленосных массивов, отдельные тела вкрапленных руд отмечаются в кровле интрузива. Главные рудоносные дифференциаты - пикритовые, такситовые и контактовые долериты; иногда вкрапленность отмечается в габброидах. Прожилково-вкрапленные руды локализируются также в экзоконтактовой зоне среди измененных скарнированных, серпентинизированных осадочных пород (рис. 26).

На Талнахском и Октябрьском месторождениях известно пять рудных залежей, приуроченных к пяти ветвям интрузий. Тела имеют пластообразную и линзовидную форму, контуры их в плане повторяют контуры интрузии. Выделяются три типа руд: вкрапленные в материнских породах (77 % от общей массы руды), сплошные сульфидные руды в приподошвенной части интрузива (10), вкрапленно-прожилковые в породах экзоконтакта(13).



В составе руд преобладают пирротин, пентландит и халькопирит, широко развиты также кубанит, магнетит, титаномagnetит, ильменит. К числу относительно редких минералов руд относятся пирит, миллерит, борнит, талнахит, валлериит, хизлевудит, ковеллин, платиноиды и др. Рудам свойственны массивные, петельчатые, полосчатые, вкрапленные, прожилково-вкрапленные, брекчиевые и пятнистые текстуры, порфировидные, гипидиоморфно-зернистые, субграфические, каплевидные, сидеронитовые и другие структуры. Отношение $Ni:Cu=1:(2,5-1)$, $Ni:Co=16:1$.

Нередко фиксируется закономерная изменчивость состава руд, выраженная в смене от одного фланга залежи к другому пентландит-халькопиритовых руд пентландит-халькопирит-пирротин-кубанитовыми, а затем пентландит-кубанит-халькопиритовыми.

Отмечаются элементы вертикальной зональности: в экзоконтактных прожилково-вкрапленных рудах вверх и вниз от материнской интрузии существенно пирротиновые руды сменяются халькопиритовыми, а затем миллерит-борнит-халькопиритовыми и существенно пиритовыми. Кроме меди и никеля в рудах содержатся кобальт, платиноиды, золото, серебро, селен, теллур.

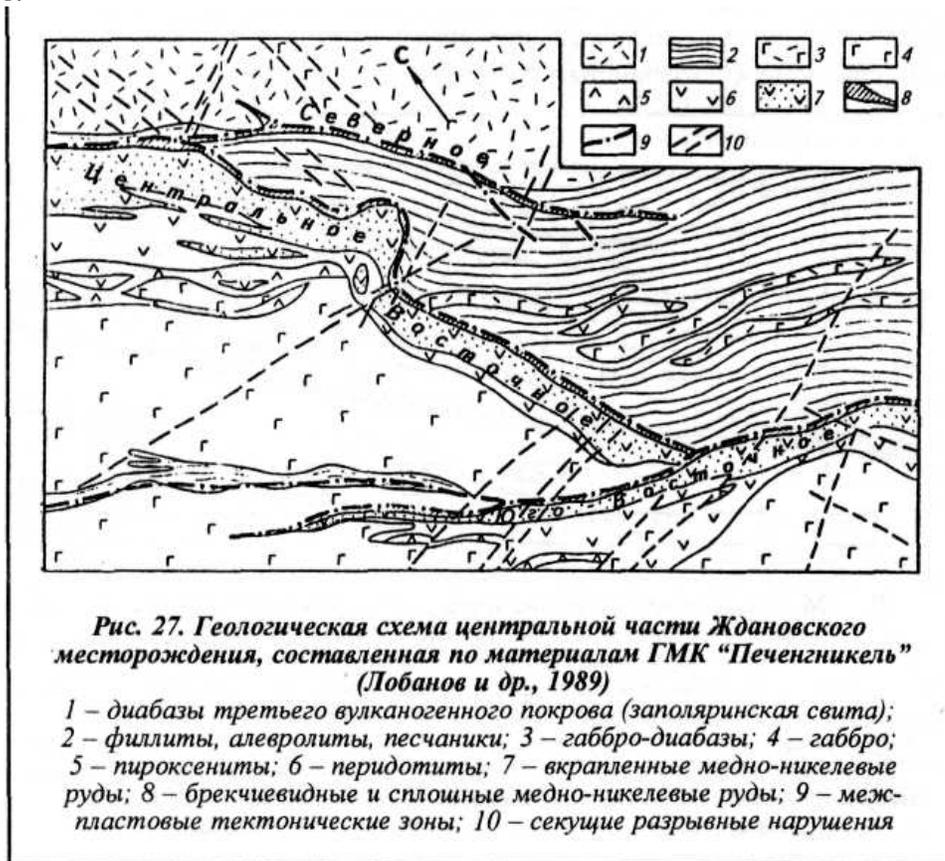
Печенгский тип месторождений представлен их группой, расположенной в одноименном рудном поле (Кольский п-ов). Печенгское рудное поле приурочено к центральной части прогиба, входящего в раннепротерозойскую систему рифтов. Месторождения размещены в дифференцированных интрузиях габбро-пироксенит-периодитовой формации.

Печенгское рудное поле представляет собой сложную вулканоплутоническую структуру. Комплекс осадочно-вулканогенных пород печенгской серии мощностью свыше 8 км образует крупный прогиб дугообразной формы. Мощные эффузивные покровы диабазов разделены пачками осадочных пород. В одной из таких толщ песчаников, филлитов, туффитов, мощностью около 1000 м, локализованы все никеленосные интрузивы рудного поля. Всего известно около 170 интрузивных тел. Интрузии имеют линзообразную форму и расположены согласно с вмещающими породами. Протяженность тел колеблется от 200 до 7000 м, мощность - от 2 до 700 м. Среди интрузивов имеются дифференцированные и недифференцированные раз-

ности; особенности их петрографического состава свидетельствуют о частичной дифференциации магмы на перидотитовую и габбровую еще до момента внедрения. Наибольшее количество рудоносных интрузивов и все известные промышленные медно-никелевые месторождения сосредоточены в центральной части рудного поля. Всего известно 13 месторождений. Рудные тела линзовидной, пластообразной, плитообразной формы локализуются в серпентинитах нижних частей интрузивов.

Наряду с этим встречаются жилкообразные, сплошные и брекчиевидные руды - апофизы основных рудных тел, залегающие среди филлитов. Небольшие послонные инъекции, мелкие прожилки и вкрапленность сопровождают рудные тела.

Ждановское месторождение - крупнейший объект Печенгского рудного поля - приурочено к расслоенному интрузиву, дифференцированному от оливинитов до эссектитового габбро. В придонной части массива среди аповерлитовых серпентинитов выявлено шесть рудных залежей, седьмая ответвляется от подошвы интрузива и прослеживается во вмещающих филлитах на расстояние более 400 м. Рудные залежи расположены согласно с расслоенностью вмещающих пород, имеют удлиненнолинзовидную и пластообразную форму (рис. 27). Рудные тела и интрузии метаморфизованы. Руды состоят из пирротина, халькопирита, пентландита и магнетита. Содержание никеля колеблется в пределах 0,1-11 %, меди - 0,3-13 %; отношение Ni:Cu в среднем по месторождению составляет 2,5:1. В бедных рудах содержание Ni менее 0,5, в рядовых - 0,5-1,5, в богатых - более 1,5 %; преобладают бедные и рядовые руды. Попутные компоненты - S, Co, Se, Te, Au и металлы платиновой группы. Месторождение разведано до глубины 1500 м; обрабатывается с 1959 г.



Месторождение **Камбалда** находится среди архейских пород Западно-Австралийского щита. Геотектоническая позиция Cu-Ni месторождений Западной Австралии определяется приуроченностью к зеленокаменным поясам.

Месторождения расположены в крыльях крупной купольной структуры. Ядерная часть купола (размером 6х3,5 км) сложена толщей базальтов мощностью более 2000 м. Преобладающим развитием пользуются массивные однородные толеитовые базальты с горизонтами подушечных лав и лавовых брекчий. Купол обрамляется толщей ультраосновных пород мощностью 240-600 м, относящейся к пироксенит-перидотитовой формации; в ее пределах локализованы рудные тела. Рудоносная формация перекрыта базальтами висячего бока - толеитовыми базальтами, вариолитами, шаровыми лавами с прослоями пиритизированных графитистых сланцев.

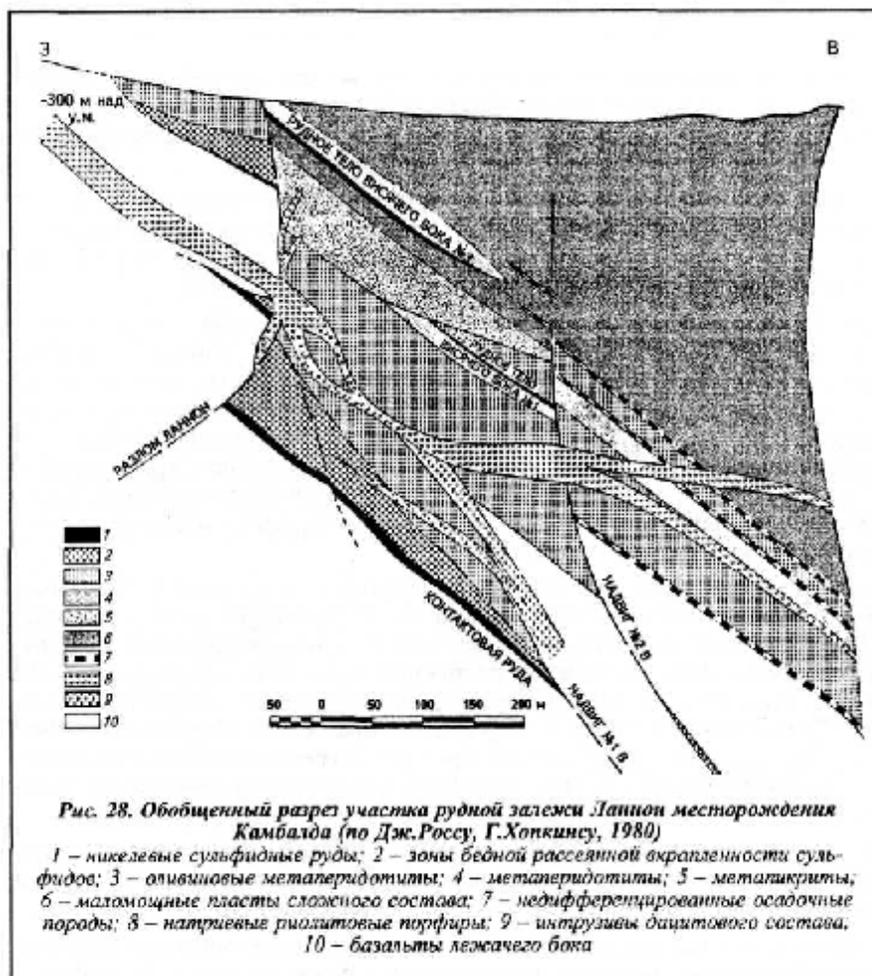
Рудоносная толща принадлежит к коматиитовой вулканической формации, развитой в основании зеленокаменного пояса. В ее составе выделяются лавовые потоки, в нижней части более мощные (от 10 до 30 м), в верхней - маломощные (0,3-7). Породы характеризуются повышенным содержанием MgO (от 20 до 45 %). В нижней части преобладают перидотиты, вверх по разрезу сменяющиеся пикритами. В пределах отдельных потоков также отмечаются признаки дифференциации, выраженные в увеличении содержания MgO от кровли к подошве.

Большая часть рудных тел (80 % запасов) располагается в основании ультраосновной толщи на контакте ее с подстилающими породами. Они представлены узкими удлиненными телами, приуроченными к грабенообразным депрессиям контакта. Обычная залежь состоит из пласта массивных сульфидов, которые перекрываются более мощным и протяженным пластом вкрапленных руд; содержание сульфидов в них варьирует от 20 до 65 %. Суммарная мощность руд обычно не превышает 3 м, известны залежи мощностью до 8 м.

Кроме того, на расстоянии около 100 м от подошвы внутри рудоносной толщи располагаются отдельные рудные тела, ориентированные параллельно нижнему контакту, согласно со слоистостью вмещающих пород. С большей частью контактовых рудных тел ассоциирует один или несколько горизонтов "висячих" сульфидов. Эти рудные тела по особенностям строения аналогичны контактовым. По зонам рассланцевания наблюдается локальное перемещение сульфидов в базальты лежащего бока и в тектонические контакты их с рудоносной толщей (рис. 28).

Среди минералов сульфидных руд преобладает моноклинный пирротин и пентландит. Пирит составляет менее 10 %, а халькопирит - менее 2 % рудных минералов. На долю шпинели, магнетита, хромита приходится не более 10 %. В некоторых рудных телах важную роль приобретает миллерит.

Содержание никеля в массивных рудах колеблется от 8,5 до 20 %, отношение никеля к меди и никеля к кобальту соответственно равны 13:1 и 54:1.



МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Месторождения силикатных никелевых руд формируются при латеритном выветривании ультрабазитов. Наиболее благоприятны для этого условия тропического климата. При химическом выветривании происходит разложение оливина и серпентина, в которых изоморфно с Mg находится Ni. Последний переходит в раствор в виде бикарбоната, перемещается совместно с Co в нижние горизонты коры выветривания и осаждаются в виде вторичных минералов - гарниерита, ревинскита, непюита, асболана, частично сорбируется глинами и входит в состав нонтронита, вермикулита, талька, хлорита. Ближе к поверхности - осаждаются гидроксиды Fe, а позже других и глубже - выпадает Mg в виде магнезита.

В корях выветривания ультраосновных пород выделяется два типа профилей: керолит-нонтронит-охристый (полный профиль) и керолит-охристый (сокращенный). В полном профиле сверху вниз формируются зоны: охристо-кремнистых образований; нонтронитизированных серпентинитов; выщелоченных серпентинитов. Сокращенный профиль отличается от полного отсутствием зоны нонтронитизированных серпентинитов.

В верхних частях кор выветривания в зоне охристо-кремнистых образований накапливаются гидроксиды Fe, минералы Co, Al и Cr. Ni концентрируется в средней части - в зоне нонтронитов, а также в низах зоны охристо-кремнистых образований и в виде инфильтрационных прожилков - в зоне выщелоченных серпентинитов.

По форме залегания и условиям образования выделяют три морфогенетических типа месторождений: площадные; линейные; линейно-площадные.

Месторождения площадного типа формируются в условиях равнинного рельефа. Рудные тела этих месторождений характеризуются пластообразной формой, мощность - 3-20 м. Нижний контакт имеет сложные очертания. Никелевые месторождения линейного типа более свойственны районам с расчлененным рельефом и развитыми зонами тектонических нарушений, определявшими глубокое проникновение подземных вод. Рудные тела имеют сложную морфологию, нередко образуют параллельные крутопадающие тела; мощность их колеблется от 1 до 50 м. Месторождения смешанного линейно-площадного типа образуются в условиях холмистого, низкорного, слабо расчлененного рельефа и объединяют в себе особенности площадных и линейных рудных тел.

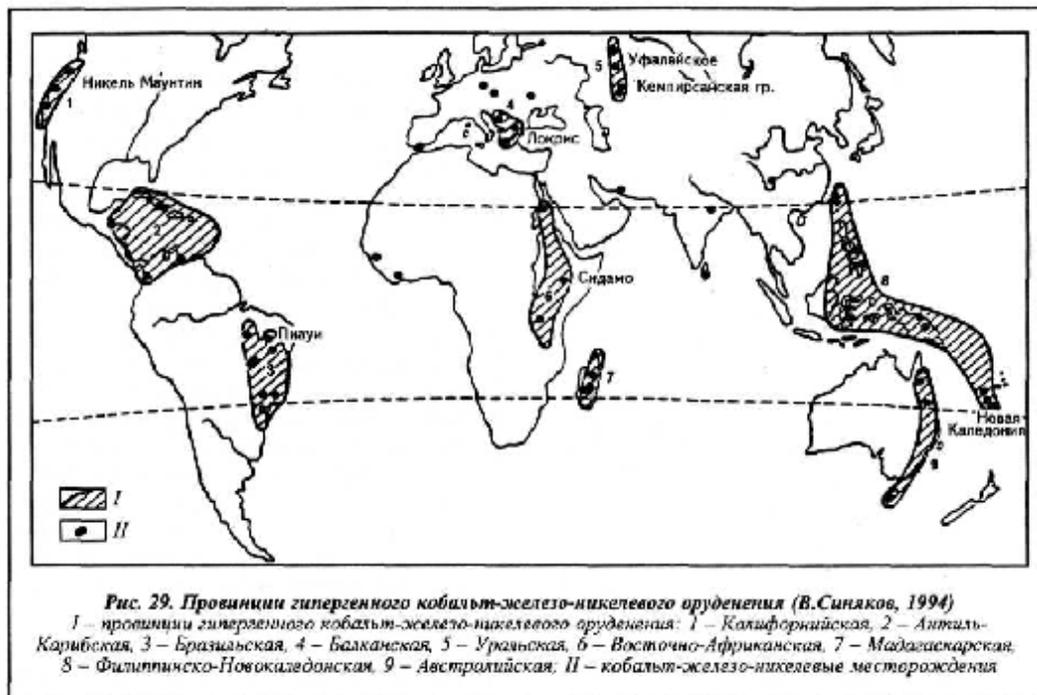
Определенным своеобразием характеризуются месторождения контактово-карстового подтипа линейного типа. Они формируются на контактах гипербазитов с карбонатными породами; преобладает залегание гипербазитов висячем боку контакта. Благодаря этому выщелачиваемые компоненты - Ni, Mg, SiO₂ попадают в карстовые полости карбонатных пород, образуя Ni- и Mg-Ni гидросиликаты. Кроме того, Ni сорбируется гидроксидами Fe, глинистыми минералами. Рудные тела располагаются в карстовых камерах, сложены карстовой брекчией, глинами, осадочными породами с примазками и прожилками гарниерита и ревдинскита. Наиболее богатые руды располагаются на дне карстовых полостей. Рудные тела характеризуются сложной морфологией, резкой изменчивостью, низкими содержаниями или отсутствием Co.

Рудные тела месторождений выветривания оконтуриваются по данным опробования, поскольку не имеют четких геологических границ. Полезными компонентами руд являются Ni и Co, соотношения между которыми колеблются от 10:1 до 30:1.

Размещение месторождений силикатных никелевых руд определяется сочетанием трех факторов: распространением ультраосновных пород, развитием кор выветривания, сохранением их от эрозии.

На территории России месторождения силикатных никелевых руд имеют ограниченное развитие и относятся к древним эпохам - палеозойской и мезозойской. Промышленные коры мелового возраста известны на Среднем и Южном Урале (Кемпирсайское, Серовское).

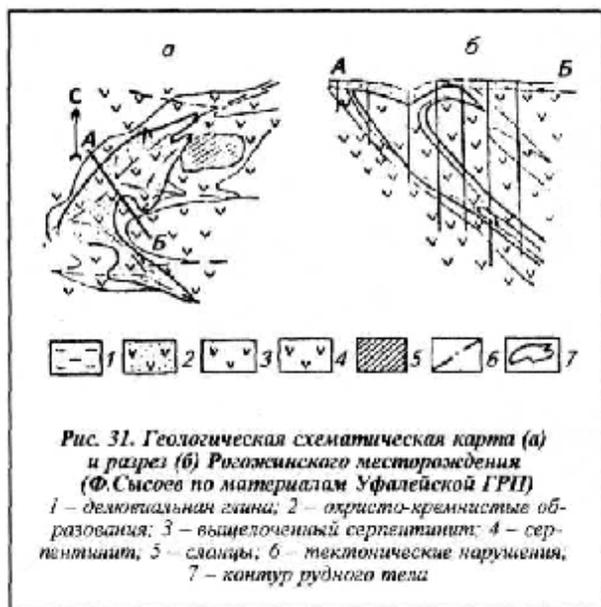
Наиболее крупные месторождения расположены в современной тропической зоне и относятся к олигоцен-четвертичному этапу формирования. Это всемирно известные месторождения Новой Каледонии, Филиппин, Австралии, Кубы, Бразилии и других стран (рис. 29).



Месторождения Новой Каледонии. Крупные массивы ультраосновных серпентинизиро-ванных пород занимают примерно треть площади острова. Здесь насчитывается около 1500 месторождений, образовавшихся в процессе латеритного выветривания. Месторождения относятся к площадному и линейному типу. Мощность латеритной коры выветривания достигает 40-50 м. В среднем вся зона содержит (в %): Fe_2O_3 - до 60; SiO_2 - 18; Al_2O_3 - 45; NiO - 1,64; Co - 0,1. Верхняя зона коры (до глубины 10-27 м) сложена латеритными охрами, обогащёнными в нижней части рассеянным гарниеритом. В этой же позиции отмечаются повышенные концентрации асболанов, образующих гнезда, конкреции, корки. Этот тип оксидных Co-Fe-Ni-руд характеризуется низким содержанием никеля (в среднем 1-7 %). Содержание кобальта достигает 3-4 %. Нижняя часть латеритной коры представлена выщелоченными и слабо измененными серпентинитами, рассеченными густой сетью прожилков гарниерита и непуита. Гарниерит образует также гнезда, цементирует брекчию серпентинитов (рис. 30). Содержание никеля в гарниеритовых рудах составляет в среднем 3-4 %, повышаясь в наиболее богатых участках до 9 %. Жилы гарниерита, некоторые из которых достигают мощности 45 м, прослеживаются на глубину до 150 м. Суммарные запасы руд оцениваются в 4-5 млрд т.



Рогожинское месторождение находится на Среднем Урале в Уфалейском районе и относится к линейному типу. Месторождение приурочено к северной части Уфалейского серпентинитового массива позднедевонского возраста, залегающего среди зеленокаменных пород раннего силура-девона в виде крупного межпластового тела мощностью от 3 до 7 км, вытянутого с севера на юг на 35 км. Кора выветривания развита по метаморфическим породам и серпентинитам. Выветрелые хлоритовые сланцы представлены безрудными глинами с обломками слабо измененных пород. Кора выветривания серпентинитов сложена охристо-кремнистыми образованиями, выщелоченными и дезинтегрированными серпентинитами. Никеленосные охристо-кремнистые образования состоят из гидрогётита, гётита, лимонита, гидрогематита, кварца, галлуазита и гидроокислов марганца. Мощность рудной залежи - от 2 до 28 м; падение – 50-55°, длина по простиранию 160 и глубина 120 м. Параллельно основной залежи располагается несколько более мелких линз (рис. 31). Наиболее высокие содержания никеля (0,86 %) фиксируются в охристо-кремнистых образованиях, составляющих 55 % руд. В обохренных и выщелоченных серпентинитах содержание никеля составляет 0,75-0,78 %. Содержание кобальта уменьшается от 0,098 % в охристо-кремнистых образованиях до 0,060-0,070 % - в обохренных и выщелоченных серпентинитах. Руды низкокачественные и рассматриваются как железистая добавка для подшихтовки никелевой руды других месторождений, поступающей в шахтную плавку.

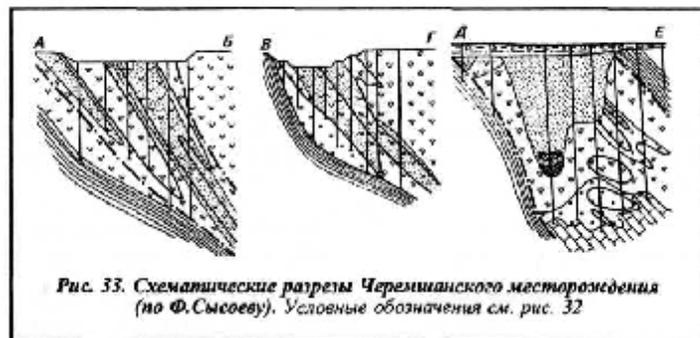
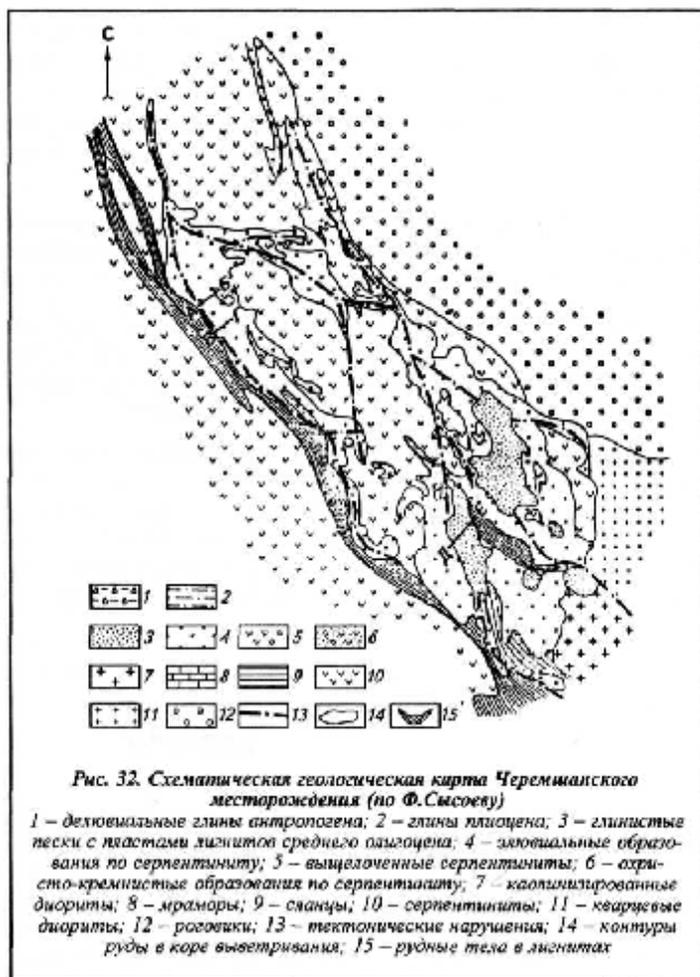


Черемшанское месторождение находится на Среднем Урале в Уфалейском районе, приурочено к Черемшанскому массиву серпентинитов и относится к контактово-карстовому подтипу. Массив (протяженность - 6,3 км, средняя мощность - 0,5 км) имеет пластообразную форму и залегает согласно с вмещающими сланцами и мраморами раннего силура. Вмещающие породы вместе с заключенными в них серпентинитами смяты в складки, контакты массива осложнены разломами, зонами дробления и милонитизации (рис. 32).

Кора выветривания, развивающаяся по раздробленным породам, имеет форму протяженных крутопадающих залежей. Глубина проникновения коры выветривания превышает 400 м (рис. 33). Остаточная кора выветривания, сложенная охристо-кремнистыми образованиями, образует параллельные клиновидные залежи мощностью 40-50 м, глубиной до 160-200 м; содержание никеля - 0,2-3,0 %. Охристо-кремнистые залежи сопровождаются зонами выщелоченных серпентинитов, концентрация Ni в которых также достигает промышленных значений - от 0,4 до 3,5 %.

Карстовые образования, подстилающие остаточную кору, имеют пластообразную и гнездообразную форму, мощность их изменяется от 1-2 до 80 м. Они имеют брекчиевидное сложение, вызванное просадками и обрушениями остаточной коры, сложены выщелоченным серпентинитом, обогащенным инфильтрационными минералами - гарниеритом, непунитом, никелевым керолитом, гидрогетитом, ферригаллуазитом и др. На закарстованной поверхности мраморов фиксируется обычно тонкий слой гарниерита или ревдинскита. Открытые глубокие карстовые впадины на мраморах часто заполняются глинистыми песками с линзами и пластами лигнита среднего олигоцена. Мощность этих образований составляет от 70 до 230 м. Пласты лигнита имеют мощность от долей метра до 28 м; вблизи серпентинитов они нередко обогащены никелем, содержание которого достигает 2-8 %. Отложения среднего олигоцена перекрыты глинами плиоцена (мощностью 5-30 м) и антропогена (1-8 м).

Большая часть запасов никеля (60 %) заключена в породах остаточной коры выветривания, руды карстовых образований составляют 37 %. Небольшое количество никеля (2,3 %) заключено в лигнитах, а также в делювии серпентинитов (0,7 %). Руды относятся к железисто-магнезиальному и кремнисто-магнезиальному типам.



МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Промышленные эндогенные месторождения никеля относятся к сульфидному Cu-Ni-типу и связаны с базит-гипербазитовыми формациями. Рудоносные расслоенные массивы являются частью дифференцированных комплексов интрузивных, субвулканических и эффузивных пород. Структурная позиция рудоносных комплексов определяется приуроченностью их к зеленокаменным поясам дуговых прогибов, зонам активизации платформ. Выделяется два типа провинций: архейские и протерозойские зеленокаменные пояса и осадочно-вулканогенные прогибы, в той или иной степени дислоцированные, и палеозойские и мезозойские трапповые образования Сибирской, Южно-Африканской и Китайской платформ. Состав руд месторождений, их геолого-структурные особенности определяются обстановками внедрения и локализации рудоносных массивов, процессами

дифференциации никеленосного расплава, петрохимическим типом рудоносной формации.

В истории развития Земли отмечены две главные эпохи образования сульфидных Cu-Ni месторождений: протерозойская и киммерийская. С первой связаны наиболее многочисленные и наиболее крупные месторождения Балтийского и Канадского щитов, Южной Африки, Австралии, со второй - трапповые месторождения Сибирской платформы.

Экзогенные месторождения силикатных никелевых руд сосредоточены в корях выветривания серпентинитов, формировавшихся в условиях тропического климата в олигоцен-четвертичный этап и продолжающих развиваться в настоящее время. На ограниченных площадях латеритообразование имело место и в более древние эпохи - средне-позднедевонскую, раннекаменноугольную, поздне триасовую и меловую. Промышленное значение имеют коры меловой эпохи на Среднем и Южном Урале, Украине и в Казахстане.

КОБАЛЬТ

Впервые получен в 1735 г. Назван по имени горного гнома Кобольда. Использовался в древнем Египте для приготовления синей краски. Резкое возрастание потребления - в начале XX в., когда были открыты твердые сплавы - стеллиты.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ

40 % используется для производства сплавов и суперсплавов (сверхтвердых сплавов кобальта с никелем, железом, хромом, вольфрамом, молибденом, карбидом кобальта),

11 - магнитных сплавов,

12 - химикатов,

8 - технической керамики.

Получение:

Из комплексных никель-кобальтовых, медно-кобальтовых, медно-никелевых руд и частично из руд кобальтовых месторождений.

Запасы: общие - свыше 7,9 млн т, подтвержденные - 5,3 млн т. Из них: Заир (37,5 % подтвержденных), Куба (22,5), Новая Каледония (7,5), Индонезия, Замбия, Филиппины, Китай, Канада. В уникальных месторождениях кобальта запасы превышают 50 тыс.т, в крупных - составляют 50-25, в средних -25-10, в мелких - менее 10 тыс.т.

Годовое производство - свыше 29 тыс. т, производство рафинированного кобальта - 20-21 тыс.т. К 2010 г. прогнозируется увеличение мирового потребления кобальта до 40,6 тыс.т. Мировые цены растут - с 16 в 1988 г. до 47,8 тыс. дол. за тонну в 1994 г.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк кобальта - $1,8 \cdot 10^{-3}$ %, в кислых породах - $5 \cdot 10^{-4}$ %, в ультраосновных - $2 \cdot 10^{-2}$. Образование:

1. При дифференциации ультраосновных и основных магм (с никелем).
2. При выносе из умеренно кислых интрузивов гидротермальными растворами (с железом и никелем) в форме сульфидных, галоидных и мышьяковых комплексных соединений.
3. Накопление в терригенных лагунно-дельтовых отложениях (с медью).
4. В корках выветривания гипербазитовых массивов, (крупные концентрации с силикатными рудами никеля
5. На дне Мирового океана в кобальтоносных корках и железомарганцевых конкрециях.
6. Концентрация кобальта в пиритах при метаморфических процессах.

Минералы кобальта:

кобальтистый пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co})_9\text{S}_8$ (до 3 % Co), линнеит Co_3S_4 (40-53), кобальтин CoAsS (до 35), глаукодот $(\text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$ (18), саффорит CoAs_2 (16-20), шмальтин CoAs_{3-2} (2-20), асболан $m(\text{Co}, \text{Ni})\text{O} \cdot n\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (до 19), эритрин $\text{Co}_3\text{As}_3\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

Кобальт извлекается как попутный компонент из руд латеритных никелевых, стратиформных Cu-Co и сульфидных Cu-Ni-никелевых месторождений. Небольшая часть металла поступает из руд кобальтово-арсенидных и колчеданно-полиметаллических месторождений.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1. Магматические,
2. Скарновые,
3. Плутоногенные гидротермальные,
4. Вулканогенные гидротермальные,
5. Стратиформные,
6. Кор выветривания.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сульфидные медно-никелевые месторождения заключают в себе почти 9 % запасов и составляют 32 % в производстве кобальта. Содержание кобальта в рудах - 0,06-0,11 %. Характеристика медно-никелевых кобальтсодержащих месторождений рассмотрена в лекции "Никель".

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Железорудные месторождения в известковых скарнах с кобальтоносными пиритами известны в Казахстане (Соколовское, Сарбайское), Азербайджане (Дашкесанское), Хакасии (Абаканское). В общем балансе запасов и производства кобальта роль их ничтожна. Характеристика месторождений рассмотрена в лекции "Железо".

ПЛУТОНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Связаны с гранитоидными интрузивами. Рудные тела в виде жил и штокверков локализованы среди осадочных, метаморфизованных пород, скарнов и серпентинитов. Руды этих месторождений наиболее богаты содержанием кобальта (достигает нескольких процентов), но их экономическое значение невелико (0,5 % запасов, 1,5 % добычи).

Рудные формации:

1. Шмальтин-хлоантит-никелин-аргентитовая (Ховуаксы, Тува);
2. Арсенопирит-глаукодот-кобальтиновая (Дашкесан-Кобальт, Азербайджан; Бу-Аззер, Марокко);
3. Пятиэлементная формация Co-Ni-Bi-Ag-U (Эльдорадо, Канада).

Месторождения последней формации охарактеризованы в лекциях "Серебро" и "Уран".

Месторождение Ховуаксы (Тува)

Возраст: конец раннего - начало среднего девона.

Вмещающие породы - вулканы кембрийского возраста, алевролиты и песчаники силура с горизонтами скарнированных известняков, нижнедевонские вулканогенные и осадочные породы, перекрытые живецкими осадочными образованиями. Породы образуют антиклиналь, прорванную каледонскими лейкократовыми биотитовыми гранитами (доскарновыми) и дайками основного, среднего и щелочного состава.

Контроль оруденения: субмеридиональный разлом, оперяющие его трещины скола, пересекающие горизонт скарнов в верхнесилурийских отложениях.

Рудные тела: жилы небольшой мощности; рудные столбы с богатыми содержаниями кобальта. Нередко оруденение проникает в осадочные породы. Строение жил зональное симметрично-полосчатое от скарновых кварц-хлорит-карбонатных парагенезисов (в зальбандах), через карбонатные рудные к позднему розовому кальциту в центре. Отношение $Co:Ni$ в рудах около единицы.

Минералы: главные - никелин, раммельсбергит, шмальтин, хлоантит, скуттерудит и саффорит; второстепенные - блеклая руда, халькопирит, сфалерит, галенит, самородный висмут, серебро, аргентит, сидерит, хлорит, кварц, барит; зона окисления - эритрин, аннабергит, арсенолит As_2O_3 и др

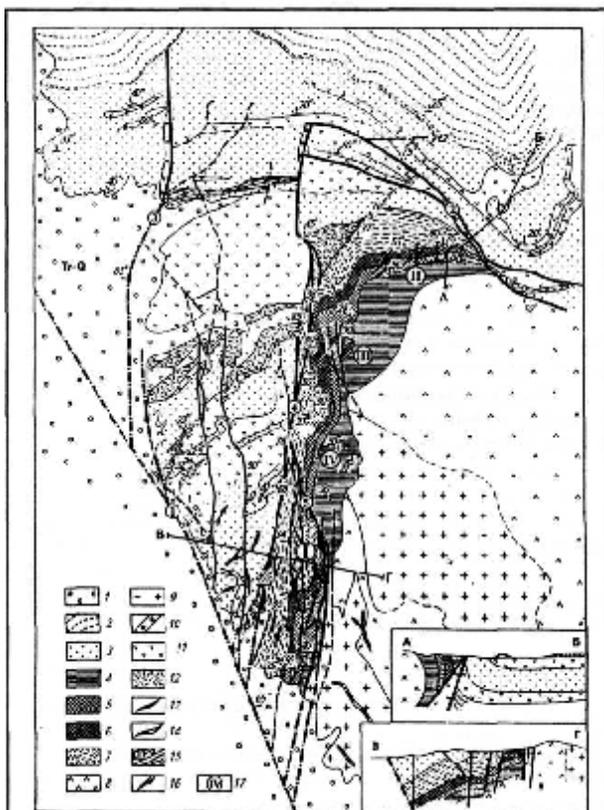


Рис. 34. Схема геологического строения Ховунского рудного поля (по А.Богдану)

1 - четвертичные и четвертичные отложения; 2 - юрские осадочные породы; 3 - нижесилурийские осадочно-вулканогенные породы; 4-7 - силурийские породы: 4 - конгломераты, кварциты, гнейсы; 5 - перекристалленные скарны и изверзититы; 6 - скарны; 7 - перекристалленные алмазитоносные и пегматитовые; 8 - докембрийские породы нижнего кембрия; 9 - граниты; 10-11 - субвулканогенные пелитовые залежи; 12 - диабазы; 13 - базальт-диабазы, диабазовых порфиритов; 14 - андезитовых порфиритов; 12-14 - дайки; 12 - трахитовых порфиритов; 13 - диабазов; 14 - кварцевых порфиритов; 15 - разрывные нарушения первого порядка (а), второго порядка (б); 16 - рудные жилы; 17 - участки восточного блока рудного поля: I - Южный, II - Северный, III - Средний, IV - Промежуточный

Хову-Аксы



Рис. 33. Геологическая схема района Бу-Аззер – Эль-Траира
 1 – герцинские дайки долеритов; 2 – осадочные отложения нижнего палеозоя; 3, 4 – инфракристаллы (кварциты); 3 – шисты микро-схистов (а), шисты Жиль-Бика (б); 4 – андезит-трахитовые лавы и их туфы (а), карбонатные породы (б); 5 – вулканические формации уарзат; 6 – гранитоидные интрузии; 7 – флисы и mica-литы; 8 – серпентиниты и сопутствующие им зеленосланцевые породы; 9 – гнейсы и кристаллические сланцы Африканской платформы; 10 – тектонические нарушения; 11 – крупные и средние месторождения (а), рудопроявления (б)

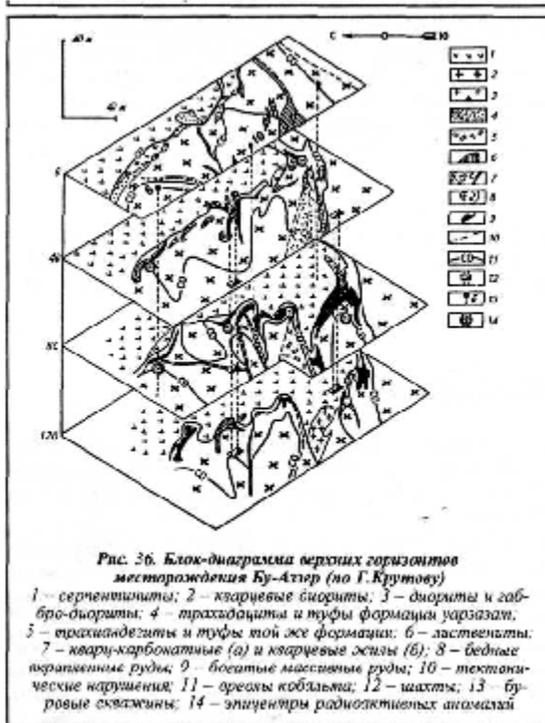


Рис. 36. Блок-диаграмма верхних горизонтов месторождения Бу-Аззер (по Г. Крутову)

1 – серпентиниты; 2 – кварцевые диориты; 3 – диориты и габбро-диориты; 4 – трахиандезиты и туфы формации уарзат; 5 – трахиандезиты и туфы той же формации; 6 – лавы; 7 – кварц-карбонатные (а) и кварцевые диориты (б); 8 – бедные железные руды; 9 – богатые массивные руды; 10 – тектонические нарушения; 11 – жилы кобальта; 12 – шахты; 13 – буровые скважины; 14 – эпицентры радиометрических аномалий

Бу-Аззер

Месторождение Бу-Аззер (Марокко)

Возраст: между поздним протерозоем и ранним палеозоем синхронно с проявлением вулканизма, приведшего к накоплению андезит-трахитовых эффузивов.

Вмещающие породы: архейские ортогнейсы, метаморфизованные вулканогенно-осадочные образования нижнего протерозоя, перекрывающий их платформенный чехол верхнего протерозоя - нижнего палеозоя. Породы нижнего структурного этажа рассечены крупным разломом, вдоль которого размещены серпентиниты, спилиты и кварцевые диориты офиолитового комплекса.

Контроль оруденения: зона брекчий, развитых вдоль контакта куполовидного выступа серпентинитов и вмещающих риолитов. В центральной части рудоносной

площади кобальт преобладает, к востоку и западу его концентрация неравномерно снижается, на восточном и западном флангах появляются существенно никелевые руды.

Рудные тела: линзы, жилы и столбообразные тела, длиной до 250-300 м при мощности от 10 до 30 м. Содержание кобальта в рудах 1-2 %, в концентрате - 10 %.

Месторождение Бу-Аззер (Марокко)

Минералы: главные - скуттерудит, саффорит, леллингит, раммельсбергит и никелин, жильные - доломит, кальцит, антигорит, хризотил-асбест, серпофит; второстепенные - халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин, магнетит, гематит, хромшпинелиды, тальк, хлорит, кварц; зона окисления - до глубины 30-50 м эритрин и аннабергит.

Стадии минералообразования:

1. Браннерит-молибденитовая,
2. Скуттерудит-саффоритовая,
3. Халькопирит-борнитовая.

Руды формировались на глубине не более 500 м, температурный интервал образования руд - от 500 до 1000°C. Кобальт и никель заимствовались гидротермальными растворами из серпентинитов.

ВУЛКАНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Содержат около 0,4 % мировых запасов кобальта и дают 1,1 % его добычи.

К этой группе относятся также месторождения серебро-арсенидной формации, примером которых могут служить Кобальт и Гоуганда в Канаде.

СТРАТИФОРМНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

1. Медно-кобальтовые месторождения Замбии, Заира и Уганды. Один из основных источников кобальта (более 44 % запасов, почти 43 % добычи). Высокие содержания кобальта в руде - 0,3 %.

2. Потенциальный промышленный тип - железо-марганцевые конкреции (ЖМК), кобальтоносные железо-марганцевые корки. Среднее содержание кобальта в ЖМК составляет 0,27 %. Промышленная разработка их может обеспечить до 14 % мирового производства кобальта. В железо-марганцевых корках содержание кобальта составляет 0,9 %; разработка их может ежегодно составить до 20 % современного уровня добычи кобальта.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Латеритные никелевые месторождения - более 46 % запасов кобальта и свыше 41 % его добычи. Наиболее крупные месторождения - в Новой Каледонии, Индонезии. Содержание кобальта в рудах не менее 0,1 %.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Промышленные концентрации кобальта связаны с магматическими, постмагматическими гидротермальными процессами, с процессами выветривания и осадконакопления.

Накопление кобальта происходит

1. На всех стадиях развития подвижных зон в месторождениях колчеданных, скарновых, плутоногенных гидротермальных.
2. На стадии активизации платформ (вместе с никелем) в сульфидных ликвационных месторождениях.

3. В платформенный этап в стратиформных месторождениях (с медью) руд, а также в месторождения кор выветривания.

Эпохи формирования кобальтсодержащих руд:

1. Протерозойская (месторождения Замбии, Заира и некоторые месторождения медно-никелевых руд).
2. Альпийская (месторождения коры выветривания).
3. Современная (железо-марганцевые конкреции и корки).

МЕДЬ

Один из первых металлов, освоенных человеком. Дала название периоду в истории человечества («бронзовый век»). Один из первых металлов для чеканки монет.

Свойства: высокая электропроводность, химическая устойчивость, пластичность, способность образовывать сплавы с различными металлами.

Применение: в электротехнике, средствах связи, транспорте, машиностроении, пищевой и химической отраслях промышленности. Применяется в виде сплавов с оловом (бронзы), с цинком (латуни), никелем (мельхиор) и алюминием (алюминиевые бронзы). По объему производства и потребления медь занимает третье место.

Запасы: свыше 800 млн т, подтвержденные - более 550 млн т. Наиболее крупными запасами владеют Чили, США, Китай, Польша, Перу, Замбия, Канада, Панама, Заир, Австралия. Россия занимает третье место, основные запасы сосредоточены на Урале, в Западной Сибири, Прибайкалье.

Добыча: свыше 9,3 млн т меди в год. Основные производители - Чили, США, Канада (более 50 %). Затем - Замбия, Перу, Китай, Польша и Австралия.

Производство: (включая выплавку вторичной меди) колеблется в пределах 8,7-9,4 млн т. Россия занимает 4-е место после США, Чили и Японии. Цена рафинированной меди в 1994 г. составила 2320 дол/т и имеет тенденцию к росту. Обеспеченность природными запасами уровня потребления составляет около 45 лет.

Размер месторождений: уникальные - более 5 млн т (их известно 18, четыре - в России), крупные - от 1 до 5, средние - от 0,2 до 1, мелкие - менее 0,2 млн т.

Богатые руды содержат более 2 % меди, рядовые - 1-2, бедные - менее 1. Среднее содержание меди в добываемых рудах 1-0,8 %.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк меди $4,7 \cdot 10^{-3}$ %; в основных породах он несколько выше ($1 \cdot 10^{-2}$), чем в кислых ($1 \cdot 10^{-3}$). Промышленные концентрации связаны как с основным (сульфидные медно-никелевые и колчеданные), так и с кислым (скарновые, медно-порфиновые) магматизмом.

В экзогенных условиях легко мигрирует, переносится в форме комплексных соединений. Концентрируется в зонах вторичного сульфидного обогащения, терригенных осадках лагунных и дельтовых фаций.

Минералы меди: самородная медь Cu (92 %), халькопирит CuFeS_2 (34,5), борнит Cu_3FeS_4 (63,3), халькозин Cu_2S (79,8), кубанит CuFe_2S_3 (22-24), ковеллин CuS (66,5), теннантит $3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{As}_2\text{S}_3$ (57,5), тетраэдрит $3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$ (52,3), куприт Cu_2O (88,8), тенорит CuO (79,9), малахит $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (57,4), азурит $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (55,3).

Основные промышленные типы месторождений меди:

1. Медно-порфиновые,
2. Медистые песчаники и сланцы,
3. Медноколчеданные.

Медно-порфиновые руды имеют прожилково-вкрапленные текстуры. Рудные минералы - пирит, халькопирит, халькозин, борнит, молибденит. Руды комплексные, содержание меди - от 0,4 до 1,2, среднее - 0,6-0,7 %. Попутные компоненты - рений, золото, серебро.

Месторождения медистых песчаников и сланцев. Осадочные породы, содержащие в цементе халькозин, борнит, халькопирит, пирит. Содержание меди - от

1 до 10, среднее - 3,5 %. Попутные компоненты - свинец, цинк, серебро, рений, в африканских месторождениях - кобальт, уран, серебро, кадмий, германий.

Медноколчеданные руды массивные, вкрапленные и прожилково-вкрапленные. Рудные минералы: пирит с примесью халькопирита, сфалерита; иногда галенит, блеклые руды и другие сульфиды. Нерудные - кварц, хлорит, серицит, карбонаты. Типы руд выделяют по соотношению преобладающих сульфидов. Содержание меди - от десятых долей процента до 2-3, в среднем около 1,4 %. Попутно из руд извлекают цинк, серу, золото, серебро, кадмий, селен, теллур/

На всех типах сульфидных месторождений в приповерхностных условиях формируются зоны окисления, выщелачивания, вторичного сульфидного, обогащения, в которых развиты самородная медь, хризоколла, куприт, азурит, малахит, халькозин, ковеллин и др.

По составу медные руды подразделяются на простые и сложные, на сульфидные, окисленные и смешанные.

Богатые руды поступают в плавку без обогащения, рядовые и бедные - обогащаются методами флотации. Концентраты содержат 10-20 % меди. Обогащаемость руд зависит от их минерального состава и текстурно-структурных особенностей.

Из руд меди извлекается более 13 попутных компонентов.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1. Магматические (2-2,5 % мировых запасов)
2. Карбонатитовые (0,5-0,7 %)
3. Скарновые (2-4 %)
4. Гидротермальные плутоногенные (меднопорфировые) (65-70 %)
5. Колчеданные (от 5-8 %)
6. Стратиформные (медистые песчаники и сланцы) (15-20 %)

Основные типы в России: медно-никелевые, меднопорфировые, медноколчеданные и медистых песчаников и сланцев.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

1. Сульфидные медно-никелевые месторождения базит-гипербазитовых формаций;
2. Медно-титановые (или ванадиево-железо-медные) месторождения в габброидах.

Сульфидные медно-никелевые месторождения содержат 1,8 % запасов меди зарубежных стран и почти 45 % запасов России. Два из этих месторождений — Талнахское и Октябрьское - относятся к числу уникальных по запасам меди.

Медно-титановые месторождения немногочисленны и невелики по запасам меди. Пример таких месторождений: Енжелс в Калифорнии (США) и крупное Волковское месторождение в России (Урал).

Волковское месторождение приурочено к габбро-перидотитовому массиву в пределах платиноносного пояса в западной части Тагильского синклиория.

Геологическая обстановка: расслоенный габбро-перидотитовый массив в базальтоидах ордовика - нижнего девона. Кварцевые диориты и диориты расположены в верхней части массива, пироксеновые габбро - в средней, оливин- и гиперстенсодержащие - в нижней.

Контроль оруденения: сводовая часть антиклинальной складки, пироксеновые габбро. Оруденение располагается несколько выше титаномагнетитовых руд, частично совмещаясь с ними.

Форма рудных тел: медные руды - зона параллельных линзовидных залежей, согласных с расслоенностью вмещающих пород (свыше 3 км длиной);

титаномагнетитовые апатитсодержащие руды – зоны вкрапленности и шлировые зоны. Свыше 200 рудных тел.

Рудные минералы: борнит, халькопирит, немного халькозина, ванадийсодержащий титаномагнетит, апатит, второстепенные минералы - пирротин, пирит, сфалерит, галенит.

Среднее содержание меди в руде: 0,65 %.

Типы руд: ванадиево-железо-медные (преобладающие) и ванадийсодержащие железные.

Попутные компоненты: железо, ванадий, титан и фосфор. Отмечены примеси золота, серебра, палладия, селена и теллура.

На месторождении развита зона окисления, частично отработанная еще в прошлом столетии.



КАРБОНАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Единственный представитель - уникальное по запасам месторождение Палабора (ЮАР) (содержит 0,9 % запасов зарубежных стран).

Месторождение Палабора

Геологическая обстановка: массив ультраосновных щелочных пород, прорывающий архейские граниты. Трубообразное тело диаметром 0,5-0,7 км, в центральной части – карбонатиты, по периферии - магнетит-оливин-апатитовые породы.

Рудные тела: карбонатиты центральной части массива с прожилками и зонами вкрапленности руды. Рудное тело прослежено до глубины 900 м.

Рудообразование протекало в две стадии. В первую возникли руды, связанные с ранними карбонатитами, приуроченные к периферии тела, состоят из кальцита, магнетита, оливина, флогопита с акцессорными апатитом, бадделеитом, торианитом, основной медный минерал - борнит. Во вторую возникли руды, ассоциированные с поздними карбонатитами, слагающими ядро массива и радиальные дайки. В составе руд - анкерит (50-60 %), магнетит (25 %), флогопит, оливин, апатит, валлериит; медные минералы - халькопирит, борнита и кубанита мало; второстепенные - торианит, бадделеит, шпинель, сульфиды.

Среднее содержание меди: 0,68 %.

Запасы: 1,5 млн т.

Производство: 80 тыс. т. в год.

Попутные компоненты: магнетит, апатит, уран, торий, золото, серебро.

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геологическая позиция: известковые гранат-пироксеновые скарны в экзоконтакте гранитоидных интрузий с известняками или известково-терригенными породами, на небольшом удалении от контакта.

Особенности рудных тел: сложная форма, небольшие размеры, комплексный состав.

Свойства руд: руды прожилково-вкрапленные двух типов - борнит-халькопиритовые и магнетитовые, содержание меди неравномерное, в среднем 1,5-3 %. Минерализация имеет наложенный характер и формируется в течение многостадийного процесса.

Попутные компоненты: железо, золото, кобальт, серебро, селен, теллур, молибден.

Доля в мировых запасах: около 0,6 % от запасов меди, в России их роль более существенна. Многочисленны, но невелики.

Примеры: месторождения Турьинской группы на Урале, Юлия в Хакасии, Саякское, Ирису в Казахстане, Клифтон, Бисби в США, Долорес в Мексике, Тинтайя в Перу, Мазрасх, Санган, Анджерг в Иране и другие.

Вадимо-Александровское месторождение, входящее в состав Турьинской группы,

находится на восточном склоне Среднего Урала.

Геологическая позиция: мелкие штоки и дайки гранодиоритов, габбро-диоритов и диоритовых порфиритов, прорывающие толщу рифогенных известняков.

Контроль оруденения: контакт скарнов и известняков, пироксен-гранатовые и гранатовые скарны, на которые наложены поздние пироксеновые скарны.

Форма рудных тел: сложная линзовидная, штокообразная, иногда пластообразная в апофизах скарновой зоны, руды массивные и вкрапленные.

Рудные минералы: главные - пирит, халькопирит, магнетит; второстепенные - ковеллин, борнит, кобальтсодержащий пирротин, сфалерит, молибденит.

Типы руд: халькопирит-магнетитовый, халькопирит-пирротинный, халькопирит-пиритовый и сфалерит-халькопиритовый.

Содержания меди: 1-2 %, в наиболее богатых - от 3 до 28 %.

Сопутствующие компоненты: железо, сера; второстепенные - золото, серебро, кобальт, молибден.

В известняках, примыкающих к рудоносным скарнам, развиты скаполит, гранат, диопсид, волластонит, а также непромышленная борная минерализация в виде послойных скоплений датолита и жил боратов.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПЛУТОНОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Основными типами гидротермальных месторождений являются меднопорфировые (почти 62 % мировых запасов меди) и жильные (около 1 % мировых запасов).

Меднопорфировые месторождения

Особенностями медно-порфировых месторождений являются связь оруденения с порфировыми интрузивами гранитоидов; прожилково-вкрапленная штокверковая минерализация; устойчивый минеральный состав руд, выдержанная зональность; низкие содержания меди; очень мелкая вкрапленность, большие запасы.

Типы меднопорфировых месторождений:

1. Собственно меднопорфировые и золото-меднопорфировые,
2. Молибден-меднопорфировые,
3. Медно-молибденпорфировые,
4. Собственно молибденпорфировые.

Геологическая позиция:

1. В базальтоидных вулканоплутонических поясах (внешние зоны островных дуг) позднегеосинклинальных стадий развития эвгеосинклиналией.
2. В андезитовидных вулканоплутонических поясах, стадии орогенной активизации.

Метальный тип медно-порфирового месторождения определяется палеотектонической обстановкой. Источник металла - магматические массы рудоносных комплексов.

Модели месторождений:

1. Диоритовая с золото-меднопорфировой минерализацией связанная с габбро-диорит-тоналитами эвгеосинклинальных поясов;
2. Гранодиоритовая с молибден-меднопорфировой минерализацией, связанная с диорит-гранодиоритами эпизэвгеосинклинальных поясов;
3. Монцитовая с медно-молибденпорфировыми рудами, связанная с диорит-монцитодиорит-монцититами эпимиеосинклинальных поясов;
4. Гранитная с собственно молибденовой минерализацией и повышенными содержаниями олова и вольфрама, связанная диорит-гранодиорит-гранитами эпикратонных поясов.

Контроль оруденения: апикальные части рудоносных штоков. В эндоконтактных зонах материнских плутонов - 65 % рудных тел, в ближайшем экзоконтакте - 25 %, в далеком экзоконтакте - 10 %. Глубина распространения оруденения - 800-1000 м от кровли интрузива.

Характерный элемент структуры месторождений - тела взрывных брекчий, проникающие из кровли интрузива во вмещающие породы и часто оруденелые.

Форма рудных тел: система пересекающихся прожилков и рассеянной рудной вкрапленности среди гидротермально измененных пород рудоносного штока и вмещающих образований. Штокверки имеют столбообразную, конусообразную, иногда трубообразную форму, реже - пластообразную. Размеры залежей – квадратные километры, объем – до 1 куб. км. Распределение руды неравномерное, рудные тела не имеют четких границ.

Попутные компоненты: молибден, золото, серебро, мышьяк, селен, теллур, рений.

Минералы руд: главные - пирит, халькопирит, молибденит, второстепенные - сфалерит, галенит, магнетит, борнит, энаргит, блеклая руда, халькозин, нерудные - кварц, серицит, ортоклаз, биотит, минералы группы каолина, вторичные - цеолиты, карбонаты, сульфаты.

Размер месторождений: средние - 1-3 млн. т, крупные - более 4 млн т., уникальные - (Чукикамата, Эль-Тениенте) свыше 20 млн т.

Первичная зональность: в центральной части месторождений располагается т.н. «кварцевое ядро» со слабым прожилково-вкрапленным медно-молибденовым оруденением и, иногда оловянной и вольфрамовой минерализацией. Ядро окружено зоной калишпатизации, биотитизации, окварцевания, серицитизации, хлоритизации в виде своеобразного колпака над ядром. Тут сосредоточены основные промышленные концентрации медных руд. Над этой зоной и вокруг развиты внешние надрудные и фланговые зоны аргиллизации, алунитизации, пропилитизации вмещающих пород. В этих зонах локализована в основном жильная полиметаллическая минерализация.

Месторождения этого типа часто содержат зону окисления руд. Строение этой зоны сверху вниз выглядит следующим образом:

выщелачивания, глубиной от 0,5 до 80 м;
 окисления, мощностью от первых метров до 50-60, иногда 100-200 м, сложенная малахитом, азуритом, купритом, теноритом, хризоколлой, самородной медью;
 смешанных руд переменной мощности;
 вторичного сульфидного обогащения, мощность которой иногда достигает 200-300 м, сложенная халькозином, ковеллином.

Меднопорфировые месторождения широко распространены. В мире их известно около 150. Как правило, они сгруппированы в протяжённые пояса.

Планетарные пояса распространения меднопорфировых месторождений:

1. Тихоокеанский мезо-кайнозойский (Чили, Перу, Мексика, США, Канада). Тут сосредоточена преобладающая часть запасов;
2. Средиземноморский кайнозойский (Югославия, Болгария, Армения, Турция, Иран, Афганистан, Зап. Пакистан, Сев. Индия);
3. Казахстанско-Монгольский герцинского и частично каледонского возраста (Казахстан, Узбекистан, Тува, Монголия, Китай).

Примеры меднопорфировых месторождений: Коунрад (Казахстан), Каджаран (Армения), Кальмакыр (Узбекистан), Песчанка (Чукотка), Чукикамата, Эль-Тениенте (Чили), Бингем, Сан-Мануэль (США), Вэлли-Коппер (Канада), Майданпек (Югославия) и др.

КОЛЧЕДАНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения связаны с вулканогенными и вулканогенно-осадочными базальтоидными формациями раннегеосинклинальных этапов развития складчатых поясов. Особенности месторождений обусловлены типом рудоносных формаций, а последние - палеовулканической и геотектонической позицией колчеданоносных провинций.

Типы меденосных колчеданных провинций:

1. Кипрский тип - первичные геосинклинали, океанические рифтогенные структуры, выполненные натровыми недифференцированными базальтовыми формациями. Преобладают серно- и медноколчеданные руды.
2. Уральский тип - островодужные вулканические пояса первичных эвгеосинклиналей с контрастными (риолит-базальтовыми) и непрерывными (базальт-андезит-дацит-риолитовыми) формациями. Состав руд серно-, медноколчеданный, цинк-медноколчеданный.
3. Малокавказский тип - островодужные окраинно-континентальные системы с непрерывными в основном андезитовидными формациями. Оруденение представлено свинцово-цинково-медноколчеданными рудами.

Геологическая позиция колчеданных месторождений: верхние части разреза рудоносных формаций, в вулканогенно-осадочных, вулканомиктовых или терригенных породах, фиксирующих прекращение или затухание очередного этапа активного вулканизма.

Контроль оруденения: размещение рудных полей и месторождений контролируется положением вулканических центров, рудные тела, приурочены к локальным вулканическим структурам.

Форма рудных тел: линзовидные, нередко пластообразные залежи, согласные с вмещающими породами. Протяженность рудных тел - 3-5 км при мощности до 100 м.

Особенности руд: пластообразные и линзовидные согласные залежи сложены сплошными массивными и полосчатыми рудами. На флангах наблюдаются участки переслаивания сульфидов с вмещающими породами. Отмечены реликты придонных гидротермальных построек (аналог «черных курильщиков»). Встречаются рудокласты в перекрывающих породах, иногда формирующие так называемые перемещенные залежи промышленного масштаба.

Минералы руд: главные - сульфиды железа (90-95 %), иногда халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, нерудные - кварц, серицит, хлорит, барит, карбонаты.

Содержания: меди в среднем - 1,4 %, цинка - 2 %.

Попутные компоненты: цинк, сера, золото (0,2-10 г/т), серебро (30-40 г/т), кадмий, селен, теллур, кобальт.

Околорудные гидротермально-метасоматические породы:

1. Зональные ореолы гидротермального изменения пород кварцево-серицитового типа, развитыми вдоль рудоподводящих зон;
2. Подстилающие рудные тела согласные залежи гидротермально-осадочного генезиса, имеющие зональное строение: микрокварциты, залегающие в основании, сменяются вверх хлоритолитами и серицитолитами.

Вертикальная зональность оруденения: от серно- и медноколчеданных в основании до колчеданно-полиметаллических и барит-полиметаллических в верхних частях.

Колчеданные месторождения широко распространены, они присутствуют в провинциях развития базальтоидного вулканизма от докембрийских до современных; в них содержится 8,4 % запасов меди. В России разведано 55 медноколчеданных месторождений, содержащих 28 % общероссийских запасов меди. Одно из них - Гайское - относится к разряду уникальных по запасам.

Максимальные концентрации колчеданных руд фиксируются в докембрии и среднем-позднем палеозое. Наибольшей известностью пользуются месторождения Южного и Среднего Урала (Гайское, Сибайское, Блявинское, Учалинское, Подольское и др.), Северного Кавказа (Урупское, Худесское), Канады (Кидд-Крик,

Вайз, Норбек, Флин-Флон и др.), Кипра (Скуриотисса), Испании (Рио-Тинто), Японии (Бесси), Турции, Норвегии, Швеции и другие.

СТРАТИФОРМНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ И СЛАНЦЕВ

Особенности:

1. Приуроченность к пестроцветным терригенным толщам, сформированным в платформенных условиях и на заключительных стадиях геосинклинального режима;
2. Согласно с вмещающими породами залегание рудных тел (пласты, линзы, лентовидные залежи);
3. Выдержанность рудных тел, значительная их протяженность (до нескольких километров) при относительно малой мощности (от десятков сантиметров до первых метров);
4. Наличие многоярусных залежей;
5. Отсутствие окolorудных изменений;
6. Относительно простой минеральный состав руд;
7. Проявление минеральной зональности, выраженной в смене сульфидов (снизу вверх) и к флангам в последовательности: халькозин - борнит - халькопирит - пирит;
8. Зависимость минеральной зональности от фациальных особенностей вмещающих пород;
8. Присутствие в промышленных количествах попутных компонентов - свинца, цинка, серебра, рассеянных элементов, иногда кобальта, урана.

Стратиформные месторождения часто крупные или уникальные по запасам.

Содержания меди: от 1 до 6 %. Главные рудообразующие элементы - мед, свинец и цинк - с ведущей ролью меди (Pb:Zn:Cu = 1:0,5:10).

Попутные компоненты: серебро, платиноиды, полиметаллы, рений, селен, теллур, в месторождениях Замбии и Заира - кобальт и уран.

Типы руд: халькопирит-борнит-халькозиновый; галенит-халькопирит-борнит-халькозиновый (первичный); брошантит-куприт-самородная медь-малахитовый смешанный (вторичный и окисленный).

Образование: первичные руды имеют осадочное происхождение, но позднее, в результате процессов диа- и катагенеза и под воздействием подземных горячих минерализованных вод, испытали в ряде случаев заметные преобразования.

Геологическая позиция: внутриплатформенные прогибы и краевые части платформ, миогеосинклинальные, краевые и предгорные прогибы, прогибы складчатых областей. Всегда приурочены к сочленению областей сноса обломочного и рудного вещества и участков накопления и захоронения этих веществ.

Типы стратиформных месторождений

Джесказганский - в орогенных впадинах, в пестроцветных молассовых формациях с характерными типами рудовмещающих фаций: песчано-алевритовых заливно-мелководных, песчаных дельтовых, песчано-глинистых континентально-лагунных.

Замбийский - во внутриплатформенных прогибах. Грубообломочные континентальные и прибрежно-морские, песчано-глинистые прибрежно-морские, глинисто-карбонатные и карбонатные морские мелководные отложения.

Мансфельдский - в краевых частях платформ. Представлен меденосными битуминозными глинисто-песчано-карбонатными отложениями мелководного внутриконтинентального бассейна. Терригенно-карбонатные, карбонатные заливно-лагунные и прибрежно-морские отложения.

Каргалинский - (приуральский) в межгорных и наложенных впадинах, внутриплатформенных прогибах, формируется в обстановке приморских наземных равнин (аллювиально-озерные отложения).

Минусинский - (сеттедабанский) отличается от остальных присутствием в разрезе эффузивов. Пестроцветные вулканогенно-осадочные и эффузивно-осадочные толщи, выполняющие межгорные впадины, грабены, а также миогеосинклинали. Речные и дельтовые конгломераты, косослоистые песчаники, озерно-лагунные волнисто-слоистые алевролиты, песчаники, дельтовые и прибрежно-морские песчано-конгломератовые толщи.

Месторождения формировались на всем протяжении геологической истории, наиболее крупные скопления были сформированы в протерозое и верхнем палеозое. Всего в них заключено более 22 % мировых запасов меди.

Типы меденосных поясов: планетарные (полузамкнутые и линейно вытянутые на древних платформах), региональные (полудуговые и вытянутые на молодых платформах и во внутренних впадинах складчатых областей), миогеосинклинальные и локальные.

Меденосные формации: молассовые и молассоидные, флишевые, аспидные, терригенно-карбонатные и другие виды.

Источник металла: вулканогенные и вулканогенно-осадочные формации основного состава, вмещающие разнообразные, в первую очередь, колчеданные месторождения, возможно массивы основного и ультраосновного состава с медной, медно-никелевой и другой минерализацией и месторождениями.

Одним из необходимых условий накопления медных осадков является климатическая зональность, выражающаяся в постепенной смене гумидного климата области денудации аридным или близким ему в акватории седиментации.

Минеральные парагенезисы рудных тел формируются на всех стадиях - седиментогенеза, диагенеза, катагенеза и метаморфизма.

Локализация рудных тел в пределах рудоносных формаций контролируется литолого-фациальными особенностями рудоносных пачек.

Минеральный состав и текстурно-структурные особенности руд зависят от характера и степени постседиментационных преобразований.

Состав и концентрации попутных компонентов определяются характером источников рудного вещества. Не исключается, что источником редких и второстепенных компонентов могли служить седиментационно-диагенетические, а в некоторых случаях и постмагматические растворы.

Примеры: Джезказган (Казахстан), Легнице-Глогувское рудное поле (Польша), Нчанга, Муфугир, Нкана (Замбия), Камото, Мусоши (Заир), Айнак (Афганистан). Из российских месторождений наибольший интерес представляет Удокан.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Формировались практически во все геологические эпохи вплоть до настоящего времени в разнообразных геологических обстановках. Характеризуются широкими вариациями состава, образуя своеобразные эволюционные ряды.

1. В ранние стадии геосинклинального развития возникали колчеданные месторождения. Они формировались в архее и протерозое и размещаются в вулканогенно-осадочных комплексах зеленокаменных поясов древних щитов и платформ. В каледонскую и особенно герцинскую эпохи играли ведущую роль, в киммерийскую и альпийскую эпохи - занимают более скромное положение.

2. С комплексами плагиогранитов, нередко завершающими раннегеосинклинальные этапы базальтоидного магматизма, связаны скарновые месторождения меди.

3. К позднегеосинклинальным и орогенным стадиям приурочены меднопорфировые месторождения. Они возникали в более поздние этапы и связаны с умеренно кислыми интрузивами вулканоплутонических ассоциаций, свойственных складчатым системам. Наиболее древние образовались в девоне, карбоне и перми, основная масса - в позднем мелу, раннем палеогене и позднем неогене .

4. С этапами формирования краевых, предгорных и межгорных прогибов, внутриплатформенных мульд связаны стратиформные месторождения. Главные пики накопления медистых песчаников приходятся на протерозойскую и герцинскую эпохи.

5. В периоды активизации платформ формировались сульфидные медно-никелевые месторождения, связанные с расслоенными базальтоидными комплексами. Основная масса медно-никелевых руд была образована в архее, протерозое и в киммерийскую эпоху.

МОЛИБДЕН

Открыт в 1773 г., впервые выделен в металлическом виде в 1882 г., широкое применение в промышленности он нашел только в XX в. Интенсивное развитие мирового производства молибдена началось с 1875 г. после открытия крупнейшего месторождения Клаймакс в США. Свыше 80 % всего добываемого молибдена используется в металлургической промышленности в основном для легирования сталей, чугунных отливок, суперсплавов, металлического молибдена. Молибден вводится в сталь вместе с Ni, Cr, V, W в количествах 0,2-0,5, реже до 1-3 %. При этом молибденовые стали приобретают высокую твердость, вязкость, тугоплавкость, самозакаливаемость, кислотоупорность и ряд других ценных свойств. Жаростойкие и кислотоупорные сплавы содержат 1-7 % молибдена. Металлический молибден используется в производстве электроламп, электровакуумных приборов. Кроме того, он употребляется в химической, нефтеперерабатывающей, керамической, стекольной и других отраслях промышленности, а также в качестве микроэлемента удобрений.

Общие запасы молибдена в 25 странах мира (без России) оцениваются в 12 млн т, подтвержденные - 8 млн т. Уникальные месторождения включают в себе более 500 тыс. т металла, мелкие промышленные месторождения - менее 25 тыс. т. Половина запасов сосредоточена в небольшом числе крупных штокверковых месторождений. Наиболее крупные запасы (84,3 %) находятся в США, Чили, Казахстане, Армении, Китае, Канаде, Перу. Добыча молибденовых руд осуществляется в 17 странах, пять из которых - США, Китай, Чили, Россия и Канада обеспечивают почти 90 % мирового производства. Цена за 1 кг молибдена в концентрате и техническом триоксиде составляет 6,5-7,5 дол. С 1989 г. отмечается некоторое сокращение производства молибдена (до 101 тыс. т) в связи с ухудшением конъюнктуры рынка.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк молибдена $1,7 \cdot 10^{-4}$ %, в гипербазитах и карбонатных породах он составляет $2 \cdot 10^{-5}$, в гранитах - $2 \cdot 10^{-4}$. Промышленные концентрации его связаны с кислыми щелочными магмами, из которых он выносится постмагматическими гидротермальными растворами. При этом концентрация молибдена в магматических породах повышается от более древних к молодым массивам по мере увеличения в них кремнезема и щелочей. Молибден отличается большим сродством к сере и значительно меньшим к кислороду.

Известно около 20 молибденовых минералов. Главное промышленное значение имеет молибденит - MoS_2 (Mo - 60 %), на него приходится 95 % всего добываемого молибдена. Второстепенную роль играет молибдошеелит $\text{Ca}(\text{Mo}, \text{W})\text{O}_4$ (0,5-15 %), совсем незначительную - повеллит CaMoO_4 (48), ферримолибдит $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MoO}_3 \cdot 7,5\text{H}_2\text{O}$ (60) и вульфенит PbMoO_4 (46), распространенные в зоне окисления.

Молибден получают из молибденовых (молибденитовых), медно-молибденовых (халько-пирит-молибденитовых), молибден-вольфрамовых (кварц-вольфрамит-молибденитовых и молибденит-шеелитовых) и уран-молибденовых (настуран-молибденитовых) руд. В бога-тых рудах содержание молибдена превышает 0,5 %, рядовые содержат 0,5-0,2, бедные - 0,2-0,1, убогие - 0,1-0,02 % (в комплексных рудах). В рудах в промышленных количествах содержатся Au, Ag, Re, Bi, Se, Te, Pb, Zn. Молибденитовые руды обогащаются методом флотации. Извлечение молибденита из собственно молибденовых руд составляет 87-91 %, из медно-молибденовых - 30-82 %, концентраты содержат 45-58 % молибдена. Окисленные руды, содержащие повеллит и молибдит, почти не имеют промышленного значения. В настоящее время разработана технология получения только повеллитовых концентратов.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Проявления молибденовой минерализации известны в месторождениях практически всех генетических типов, однако среди промышленных месторождений выделяются: скарновые, грейзеновые, плутоногенные гидротермальные. В них содержится 94 % суммарных подтвержденных запасов молибдена. В качестве самостоятельного промышленного типа иногда выделяют вулканогенные гидротермальные месторождения. Однако в этих месторождениях, относящихся к уранинит-молибденитовому типу, молибден является попутным компонентом; большого практического значения для извлечения молибдена эта группа месторождений не имеет. Как попутный полезный компонент молибден присутствует в некоторых пегматитовых, карбонатитовых, альбититовых, колчеданных месторождениях.

Кроме того, известны концентрации молибдена, сформированного в ходе осадочного процесса: молибден накапливается в углисто-кремнистых сланцах и углях. Месторождения подобного типа характеризуются значительными скоплениями молибдена, адсорбированного углстым веществом. Убогое содержание и трудность извлечения препятствуют вовлечению этих достаточно широко развитых месторождений в промышленное освоение. Однако при благоприятном комплексе попутных компонентов (обычно уран, ванадий, редкие земли, германий, селен и др.) они могут считаться резервом сырьевой базы молибдена.

Все промышленные месторождения молибдена разделяются на три рудные формации: молибденовую, медно-молибденовую и вольфрам-молибденовую. Наряду с этим важная роль при характеристике промышленных типов отводится структурно-морфологическим особенностям оруденения; наиболее обычными для молибденовых месторождений всех типов являются штокверковые, жильные и брекчиевые рудные тела.

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На долю скарновых месторождений приходится 2,1 % суммарных подтвержденных запасов зарубежных стран. Для России значимость месторождений этого типа значительно выше - 10 % запасов и 20 % добычи.

Скарновые месторождения молибдена образуются в экзоконтактовых зонах гранитоидных массивов среди пород карбонатного или алюмосиликатного состава. Рудоносными являются крупные орогенные гранитоидные многофазные плутоны сложного строения. Состав руд молибденовых месторождений обусловлен составом и особенностями формирования (ассимиляцией и др.) рудоносных плутонов: с калиевыми лейкократовыми гранитами связаны вольфрам-молибденовые руды; с амфибол-биотитовыми гранитами и гранодиоритами ассоциируют месторождения собственно молибденовых руд, с плутонами пёстрого цвета - медно-молибденовые месторождения. Наиболее распространены молибденово-вольфра-молибденовые скарновые месторождения.

Скарновые залежи, локализованные в непосредственном контакте гранитоидных пород с «рамой», характеризуются обычно небольшими размерами, сложной морфологией. В отличие от них залежи, образованные при замещении отдельных пластов карбонатных и других пород, более крупные, выдержанные, нередко повторяющие складчатый рисунок вмещающих пород. Крупные рудные залежи бывают приурочены также к зонам дробления карбонатных и алюмосиликатных пород. Размеры и мощность рудных тел колеблются в широких пределах - от нескольких десятков до сотен метров и даже километров по простиранию и от десятков сантиметров до десятков метров по мощности.

Рудные тела представлены гранат-пироксеновыми скарнами, сложенными гранатами рядаgrossуляр-андрадит, геденберgitом, диопсидом, плагиоклазом,

эпидотом, везувианом. Прогнозами поздних стадий окварцевания являются кварц, мусковит, хлорит, флюорит, карбонаты. Главные рудные минералы - молибденит, шеелит, молибдошеелит, халькопирит, пирит, магнетит, второстепенные - сфалерит, галенит, блеклая руда, редкие - самородные висмут, золото, серебро. Рудообразование происходит в интервале температур 500-200°C. На ранних стадиях, завершающих формирование скарнов, образуются шеелит, молибдошеелит. Затем образуются кварцево-молибденитовые прожилки и вкрапленность молибденита. Завершается рудный процесс формированием наложенной сульфидной минерализации.

Содержание молибдена в скарновых рудах колеблется на уровне 0,2-0,5 %, содержание WO₃ достигает 0,5 %. Руды, как правило, легко обогатимы.

Наиболее известным скарновым месторождением в России является Тырнауз на Северном Кавказе. Подобные месторождения известны также в Хакасии (Киялых-Узень), Казахстане (Каратас-1), Китае (Янцзы-Чжанзы), Средней Азии (Лянгар, Ингичке, Койташ), США (Пайн-Крик), Турции (Тахталы-даг), Бразилии (Куихаба).

Тырнаузское W-Mo месторождение расположено на северном склоне Главного Кавказского хребта. Его формирование связано с процессами тектономагматической активизации южной окраины эпигерцинской Скифской платформы, происходившей в мезозое и кайнозое. Рудное поле приурочено к Пшекиш-Тырнаузской тектонической зоне, в пределах которой развиты вулканогенные, терригенные и карбонатные породы среднего палеозоя и нижнего лейаса, разделенные несколькими перерывами и смятые в сложную складчатую структуру. Наиболее крупным интрузивом является эльджуртинский массив порфировидных биотитовых гранитов мел-палеогенового возраста.

Массив окружён ореолом роговиков и скарнов. Молибден-вольфрамовые рудные тела локализованы в скарнах; Главный рудный скарн образует крупную седловидную залежь с мощным раздувом в центральной части, приуроченным к замку антиклинальной складки. С Главным скарном сопряжены другие тела, преимущественно пластообразной формы, локализованные вдоль крыльев складок (рис. 68).

Среди скарнов преобладают (60-80 %) пироксен-гранатовые и гранат-пироксеновые, развитые по роговикам и сопровождающиеся амфибол-плагиоклазовыми и пироксен-плагиоклазовыми скарноидами. Скарны, образованные по мраморам, представлены агрегатом лейстовидных зерен волластонита с примесью рассеянных зерен пироксена, граната и везувиана. Скарновые тела характеризуются сложным полосчатым строением. Оруденение наложено на скарны. Основными рудными минералами скарновых тел являются шеелит, молибденит и молибдошеелит. Вольфрам и молибден распределены неравномерно, отношение трехоксида вольфрама к молибдену изменяется от 4:1 до 8:1. В скарнах шеелит обычно тяготеет к пироксену, а молибденит - к гранату.

С глубиной количество молибденита и шеелита уменьшается, возрастает роль молибдо-шеелита, увеличивается содержание в нем молибдена. Второстепенные минералы руд - магнетит, пирротин, халькопирит, сфалерит, висмутин. Рудная минерализация локализована не только в скарнах, но наложена также на роговики и гранитоиды. Текстуры руд массивные, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные.

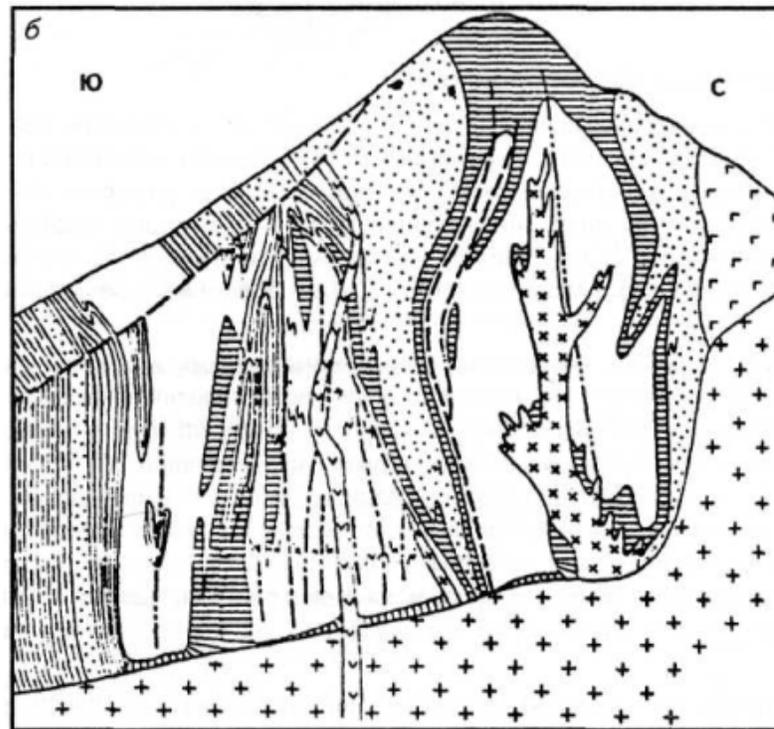
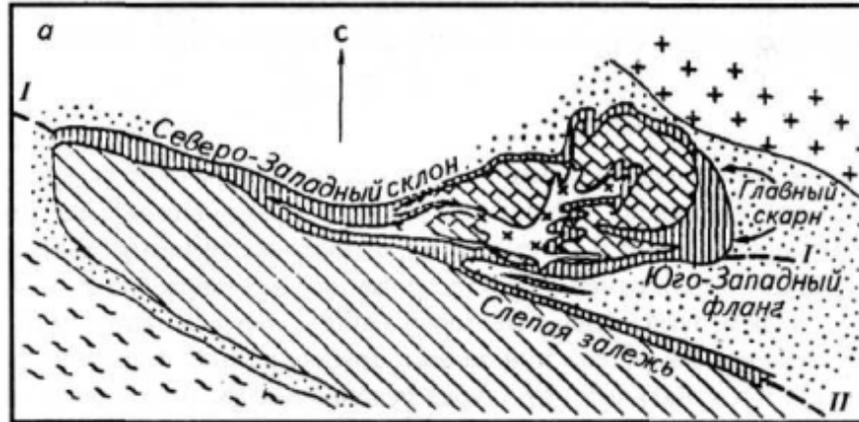


Рис. 68. Схематический геологический план одного из верхних горизонтов (а) и вертикальный разрез (б) месторождения Тырыnyaуз (по А.В.Пэку и др.)

1 – биотитовые роговики; 2 – мраморы слоистые; 3 – мраморы массивные; 4 – сланцы и конгломераты мукуланской свиты; 5 – скарны; 6 – лейкократовые граниты; 7 – эльджуртинские граниты; 8 – зоны разломов (I – Скарнового, II – Слепой залежи); 9 – пироксен-плаггиоклазовые и известково-силикатные роговики, местами скарнированные; 10 – скарны и пироксен-плаггиоклазовые породы; 11 – сланцы, песчаники и конгломераты раннеюрского возраста; 12 – кварцевые плаггиопорфиры; 13 – разломы; 14 – липариты; 15 – 17 – осевые линии шарниров: 15 – ранних антиклинальных изоклинальных складок, 16 – синклинальных, 17 – поздних наложенных складок; 18 – схематическое изображение складок волочения

ПЛУТОНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Составляют основу минерально-сырьевой базы молибдена. Среди них выделяется два главных типа: штокверковые медно-молибден-порфиновые (67,8 % запасов молибдена в зарубежных месторождениях) и штокверковые, собственно молибден-порфиновые месторождения (24 % запасов). Оба типа характеризуются высокой степенью концентрации запасов. Месторождения обладают всеми основными свойствами меднопорфировых месторождений. Оруденение связано со штоками порфировых интрузий и локализовано в эндо- и экзоконтактных зонах. Рудные тела представлены штокверками изометричной, трубообразной, линейно-вытянутой или опрокинутой чашеобразной формы. Границы рудных тел проводятся по данным опробования, внутреннее строение их осложняется наличием безрудных или слабооруденелых участков. В месторождениях отчетливо проявлена метасоматическая и рудная зональность. Концентрические штокверки имеют в поперечнике размеры от сотен метров до первых километров. В них развиты кварц-молибденитовые и кварц-сульфидные прожилки мощностью от 1-2 мм до 2-3 см, а также вкрапленность сульфидов.

Минеральный состав руд собственно молибденовых месторождений определяется наличием молибденита, ассоциирующего с пиритом. Медные минералы практически отсутствуют (иногда Cu – попутный компонент). Более характерен для этих месторождений вольфрамит, много флюорита. Медно-молибденовые месторождения отличаются более сложным минеральным составом руд: в них развиты халькопирит, борнит, блеклые руды, галенит, сфалерит.

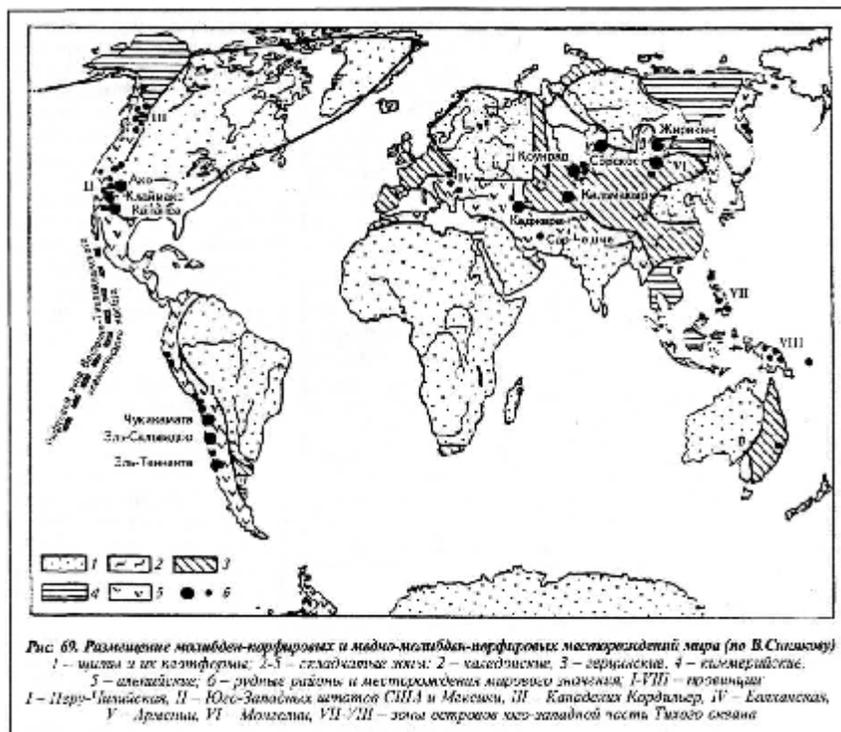
Главные жильные минералы - кварц и серицит. Кроме них в гидротермально измененных породах широко развиты полевые шпаты, биотит, эпидот, хлорит, каолинит. В заключительную стадию рудного процесса развиваются цеолиты, карбонаты.

Среднее содержание молибдена в молибден-порфиновых месторождениях колеблется от 0,05 до 0,5, в медно-молибден-порфиновых - от 0,005 до 0,025 %. В рудах в промышленных количествах содержатся золото, серебро, рений, селен, теллур, висмут.

Молибден-порфиновые месторождения распространены на Дальнем Востоке, в Забайкалье (Жирекен и др). Крупнейшие месторождения находятся в США (Кляймакс.); крупные запасы известны в Канаде, Китае, Монголии. Cu-Мо-порфиновые месторождения также широко распространены. В России наиболее крупным является Сорское месторождение (Кузнецкий Алатау). Известны месторождения в Армении, Казахстане. Наиболее крупными являются месторождения Чили, а также месторождения Канады, США, Мексики, Китая (рис. 69).

МОЛИБДЕН-ПОРФИРОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение Жирекен находится в пределах золото-молибденового пояса в Восточном Забайкалье. Оно связано с формацией плутонов умеренно кислых гранитоидов и приурочено к северному обрамлению эпиплатформенной впадины. Впадина выполнена континентальными терригенными и вулканогенными отложениями верхней юры и нижнего мела, залегающими на палеозойских гранитах. Месторождение расположено в апикальной части массива биотит-роговообманковых гранитов средне-позднеюрского возраста.



Кровля плутона разбита многочисленными разноориентированными нарушениями, трещинами, нередко развиты участки брекчирования. Некоторые из этих нарушений контролируют положение даек гранит-порфиров и диоритовых порфиров, имеющих протяженность 400-500 м при мощности 20-30 м. (рис. 70). Трещины и участки брекчирования служили также путями движения рудоносных гидротермальных растворов. Взаимоотношения даек и оруденения довольно сложны. С одной стороны, дайки пересекают рудные прожилки и оруденелые породы, с другой - сами подвергаются оруденению, в том числе прожилковому.

Рудный штокверк имеет в плане изометричные очертания. Оруденение сопровождается дорудной калишпатизацией и послерудной аргиллизацией вмещающих пород. Первая развита в центральной части месторождения на площади около 0,5 км² и прослежена на глубину до 500 м. Развитие калиевого полевого шпата по плагиоклазу, темноцветным минералам и кварцу, сопровождается выносом большей части компонентов и относительным обогащением только Al и K. При этом процессе увеличивается пористость пород, что способствует развитию в них вкрапленного оруденения.

Послерудная аргиллиция проявлена значительно шире и выражена в развитии каолинита, диккита и карбоната, среди которых на глубоких горизонтах появляются микрозерна гематита.

Молибденовое оруденение, крайне неравномерное, представлено кварцевыми прожилками с молибденитом и вкрапленностью его во вмещающих породах. В соответствии с этим выделяются вкрапленные, прожилковые и брекчиевые руды, в различных комбинациях развитые в пределах штокверка. Изредка встречаются гнезда молибдошеелита с вкрапленностью молибденита. К более поздним стадиям рудного процесса относится формирование прожилков с кварцем, сульфидами и сульфосолями.

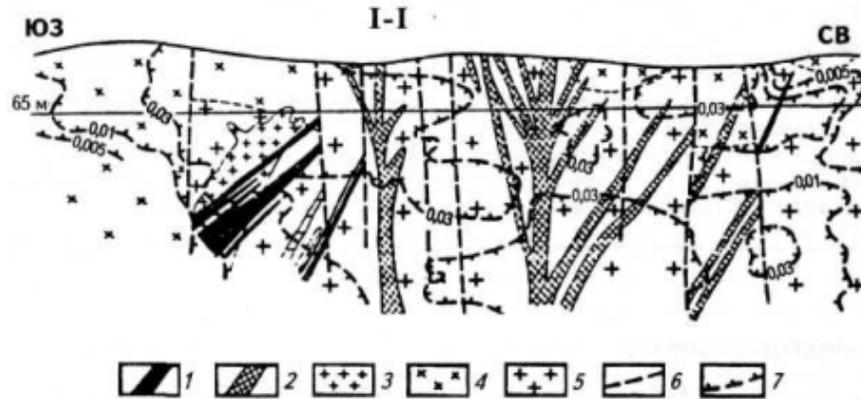
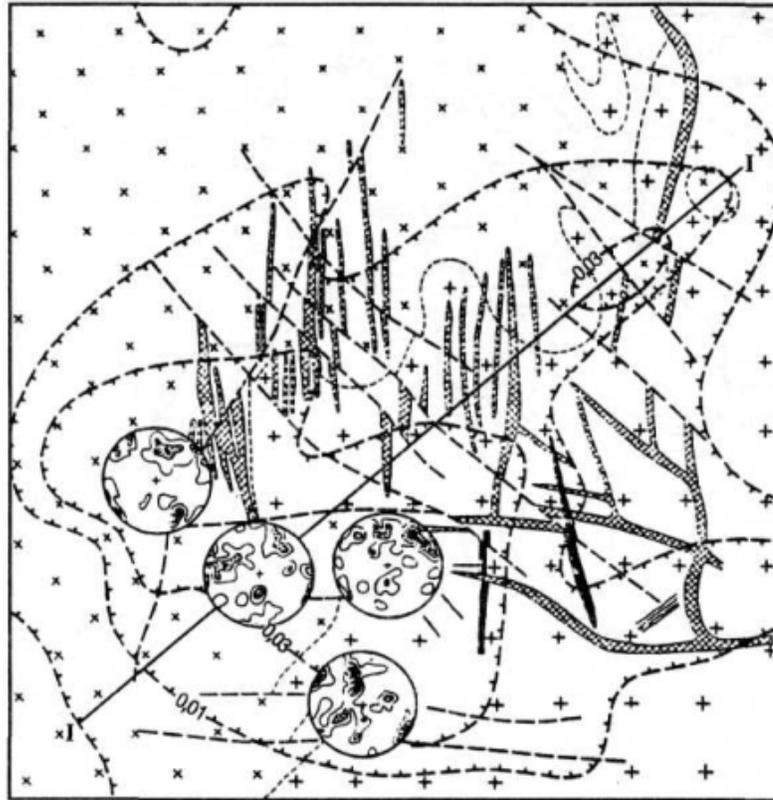
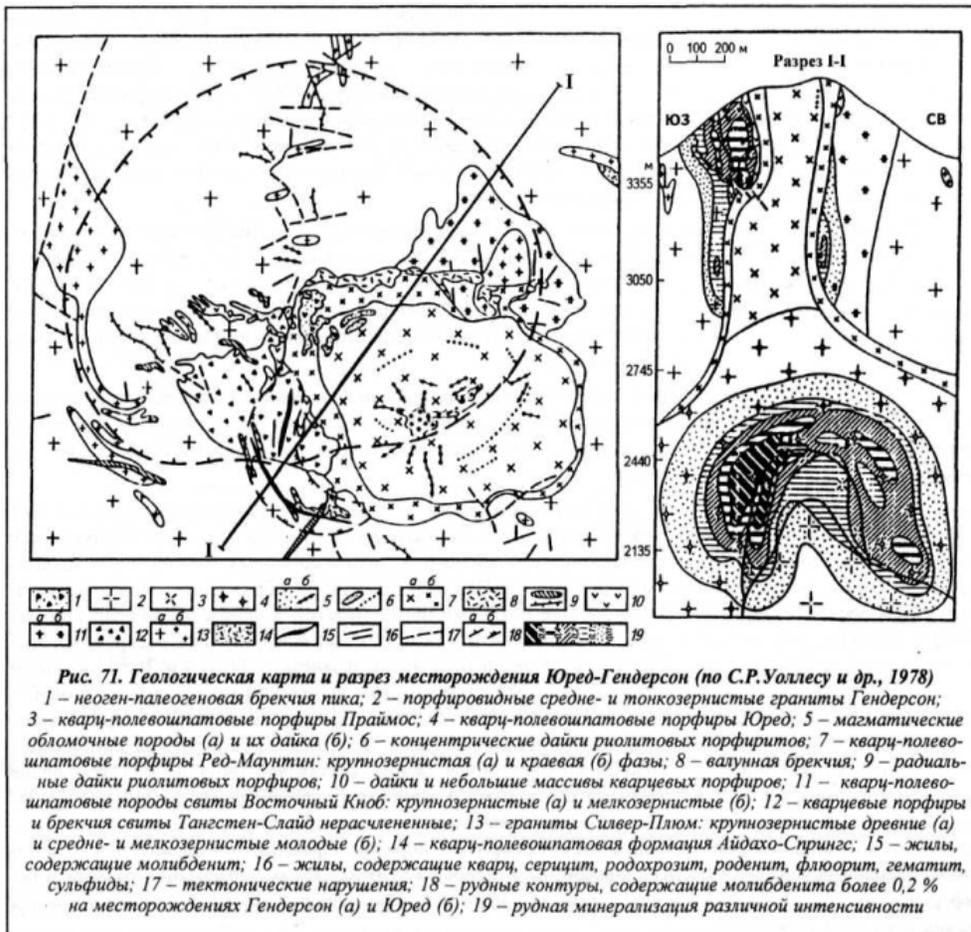


Рис. 70. Схематическая геологическая карта и разрез Жирекенского месторождения (по В.Т.Покалову, 1983)
 1 – дайки диоритовых порфиров; 2 – дайки гранит-порфиров; 3 – мелкозернистые лейкократовые граниты; 4 – мелкозернистые порфировидные биотитовые и биотит-роговообманковые граниты; 5 – средне-крупнозернистые биотитовые и биотит-роговообманковые граниты; 6 – разрывные тектонические нарушения; 7 – изолинии содержания молибдена; в кружках показаны диаграммы трещиноватости (200 измерений 1-3-6 %)

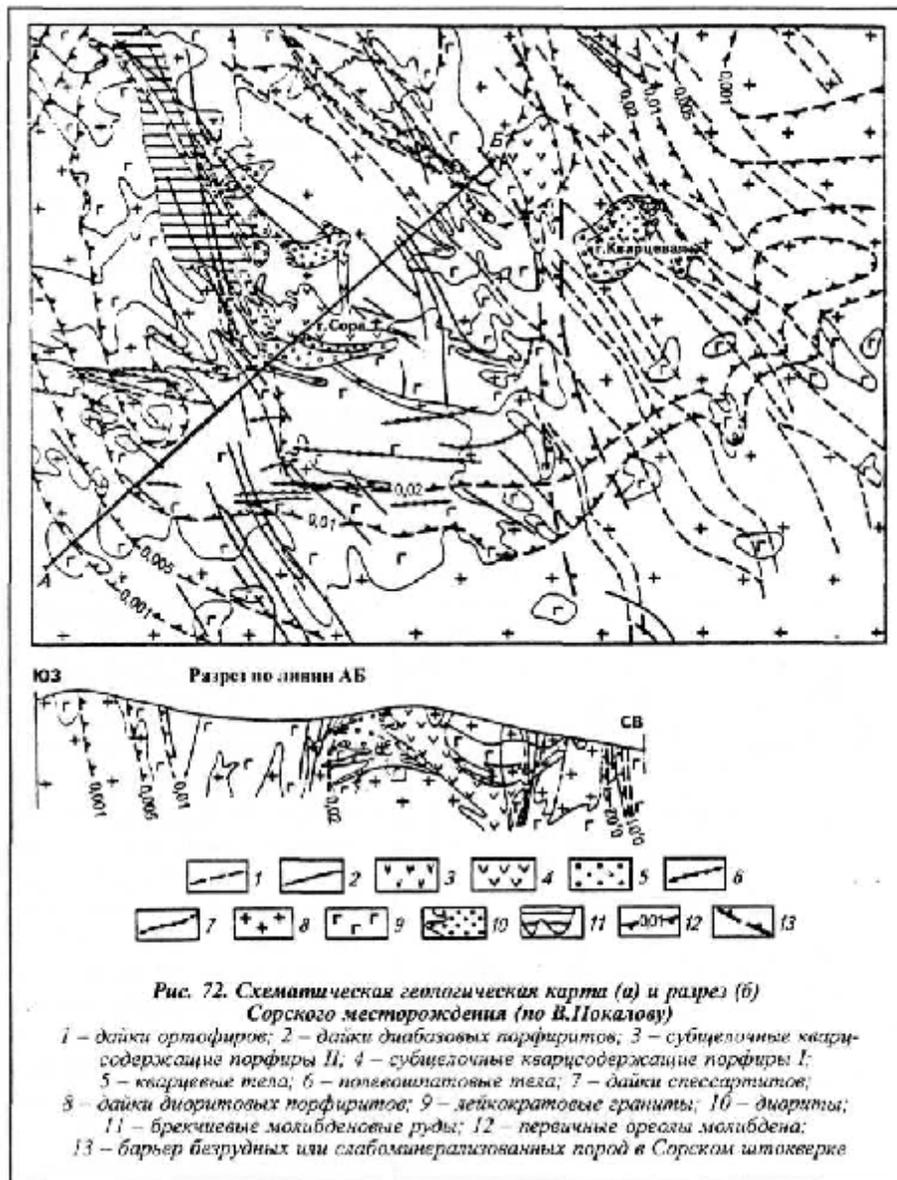
Месторождение Юред-Гендерсон – одно из крупнейших молибденовых месторождений мира. Месторождение приурочено к многофазному плутону (комплекс Ред-Маунтин), прорывающему докембрийские сланцы, гнейсы и граниты батолита Силвер-Плюм. Рудоносный интрузивный комплекс датируется поздним олигоценом. В его составе выделяется восемь разновозрастных групп пород, включающих несколько фаз внедрения (риолитовые порфиры, пирокластика и брекчии), образующие сложный некк. На поверхности породы некка образуют тело размером 720х(240-360) м; на глубине 1200 м диаметр некка составляет 1350 м. Центральная часть вулканического аппарата окружена системой радиальных и кольцевых риолитовых даек. В нижней части некка расположено тело порфиroidных гранитов Примос. На месторождении выявлено два рудных тела. Рудное тело Юред расположено в юго-западной части некка. Оно представлено дугообразным в плане штокверком протяженностью около 360 м при максимальной ширине 150 м и глубине распространения 285 м. Оруденение охватывает как кварцевые порфиры некка, так и докембрийские граниты (рис. 71). Рудное тело Гендерсон приурочено к апикальной части штока Примос и представляет собой эллипсообразный штокверк размером 900х690 м, имеющий форму опрокинутой асимметричной чаши. Мощность рудного тела - 120-240 м. Руды прожилково-вкрапленные; запасы молибдена составляют 1 млн т, среднее содержание молибдена в руде 0,24 %, бортовое - 0,12 %. Единственным извлекаемым минералом является молибденит в тонких (от 0,3 до 2,0 мм) прожилках, выполненных кварцем, серицитом, калиевым полевым шпатом, флюоритом, пиритом. В нижней части рудного тела мощность прожилков увеличивается до 5-25 мм, в их составе появляются мусковит, топаз, иногда биотит, крупночешуйчатый и розетковидный молибденит.



МЕДНО-МОЛИБДЕН-ПОРФИРОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сорское месторождение находится на восточном склоне Кузнецкого Алатау и располагается в приосевой, апикальной части Уйбатского плутона (476 млн лет). Массив прорывает рифей-ские и нижнекембрийские карбонатные и вулканогенные формации. Рудное поле сложено различными магматическими породами - диоритами, сиенито-диоритами, сиенитами, плагио-гранитами. Основная масса руды сосредоточена в плагиогранитах и в меньшей степени в меланократовых породах их кровли (рис. 72).

Рудный штокверк локализован в узле пересечения широтной и северо-западной тектонических зон. Также рудные жилы и прожилки контролируются трещинами других направлений, в том числе пологими контракционными трещинами. Мощности жил и прожилков колеблются от долей сантиметра до одного метра, преобладают - 5-20 см.



Рудный штокверк состоит из двух (западной и восточной) относительно обособленных частей, каждая из которых имеет северо-западную ориентировку и содержит в центре практически безрудное ядро, состоящее из штокообразных тел

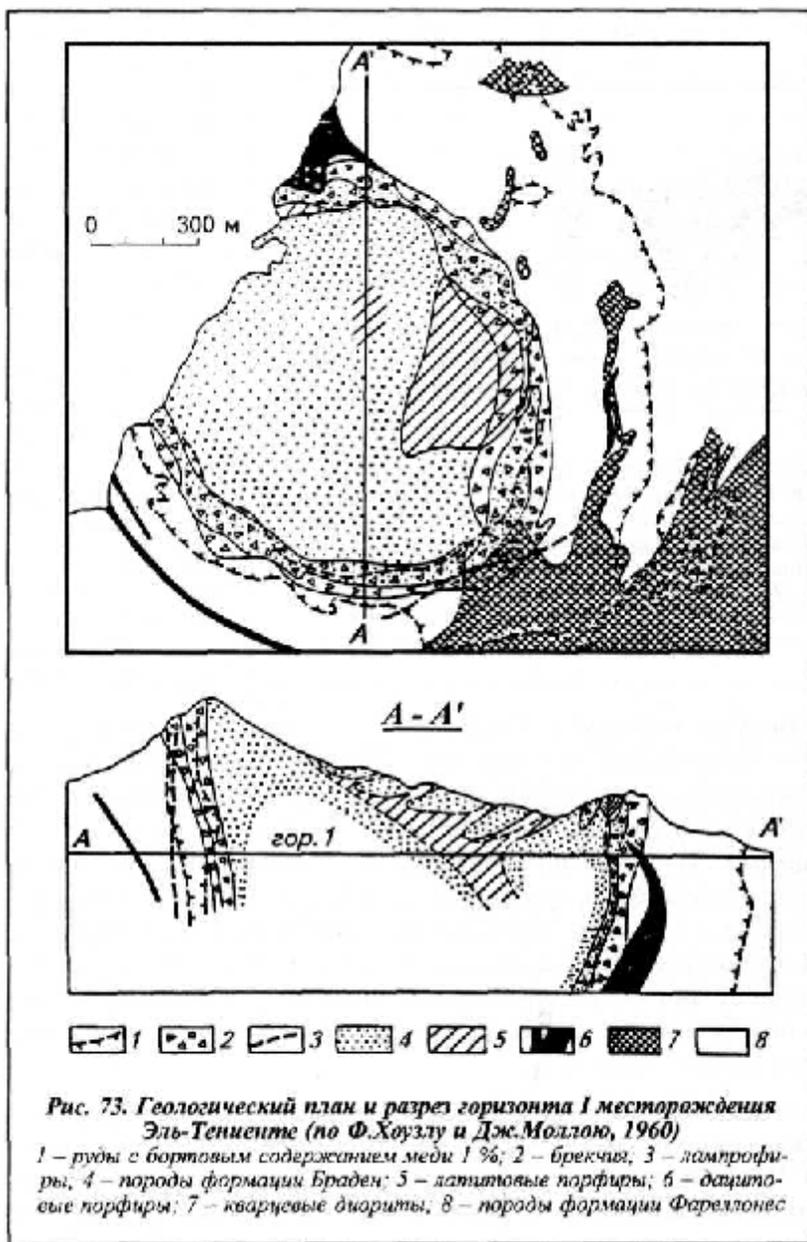
кварцевых, полевошпатовых и кварц-полевошпатовых образований с бедной медной минерализацией. Эти наиболее ранние образования сменяются зонами богатых брекчиевых руд и окружены более поздними прожилковыми и прожилково-вкрапленными рудами, содержащими основные запасы молибдена и меди. Максимальная глубина распространения штокверкового оруденения составляет в центре около 1000 м, а на флангах - 300-500 м. Вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды состоят из крупных сферолитовых выделений молибдена, мелкозернистого пирита, борнита и халькопирита, изредка - рутила. Жильные минералы – кварц, флюорит, немного мусковита с реликтами калиевого полевого шпата.

Рудная зональность на месторождении проявлена слабо и выражена в приуроченности максимальных концентраций меди, а также сопутствующих серебра и цинка к центральным частям штокверковых тел; к флангам содержание меди уменьшается, а молибдена остается практически постоянным. Вольфрам не характерен для Сорского месторождения, но в верхних горизонтах отмечаются несколько повышенные его содержания. Содержание рения в молибдените с глубиной уменьшается - от 80-100 на верхних горизонтах до 10-25 г/т на глубине 800-900 м.

Месторождение Эль-Тениенте расположено в восточной зоне Главной Кордильеры Чили, в южной части палеоцен-плиоценового вулканоплутонического пояса. На площади месторождения горизонтально залегающие андезиты формации Фарольонес прорваны небольшим массивом и мелкими телами кварцевых диоритов (плиоцен). Вслед за этим образовалось крупное дайкообразное тело дацитовых порфиров. С кварцевыми диоритами и дацитовыми порфирами, являющимися предположительно выступами Андского батолита, генетически связаны руды Эль-Тениенте - типичные представители меднопорфировых месторождений. И, наконец, плиоценовый импульс магматической активности завершился формированием сложно построенной брекчиевой трубки, получившей название трубки Браден. Наличие именно этого элемента отличает месторождение от других медно-молибден-порфировых месторождений. Округлая в плане трубка с диаметром на поверхности 1300 м сужается книзу, благодаря чему напоминает по форме воронку, выполненную брекчированными породами (андезиты, кварцевые диориты, дацитовые порфиры с небольшим количеством туфов). Трубка окаймляется кольцом брекчий. В цементе брекчий вместе с туфогенным материалом, а также кварцем, турмалином, небольшим количеством гипса, карбонатов содержатся сульфиды и сульфо-соли меди, молибденит и другие минералы. Промышленные руды месторождения, оконтуренные по бортовому содержанию меди 0,5 %, образуют в плане овальную зону, охватывающую вмещающие андезиты, дацитовые порфириты, мелкие тела и часть штока кварцевых диоритов и брекчии краевого пояса. При этом до 80 % руд локализовано в андезитах, менее 20 % приходится на кварцевые диориты и дацитовые порфириты. В брекчиях внутренней части трубки рудная минерализация отсутствует. Таким образом, рудное тело имеет в плане форму деформированного кольца (рис. 73).

В рудном штокверке первичные минералы представлены халькопиритом, пиритом, борнитом, молибденитом, теннантитом-тетраэдритом, более редкими - магнетитом, спекуляритом и энаргитом. Встречаются жилы с галенитом и сфалеритом. Промышленные руды развиты в пределах зоны калиевых изменений с участками окварцевания и серицитизации. Внешнюю зону образуют пропилитизированные породы. На месторождении развита зона окисления мощностью от 30 до 120 м (в брекчированных участках до 450 м); среднее содержание меди около 0,25 % (в отдельных участках - до 5 %). В первичных рудах среднее содержание меди около 2 %, молибдена - 0,048 %. Кроме того, огромные запасы сосредоточены в бедных рудах с содержаниями меди 0,5-1,0 %.

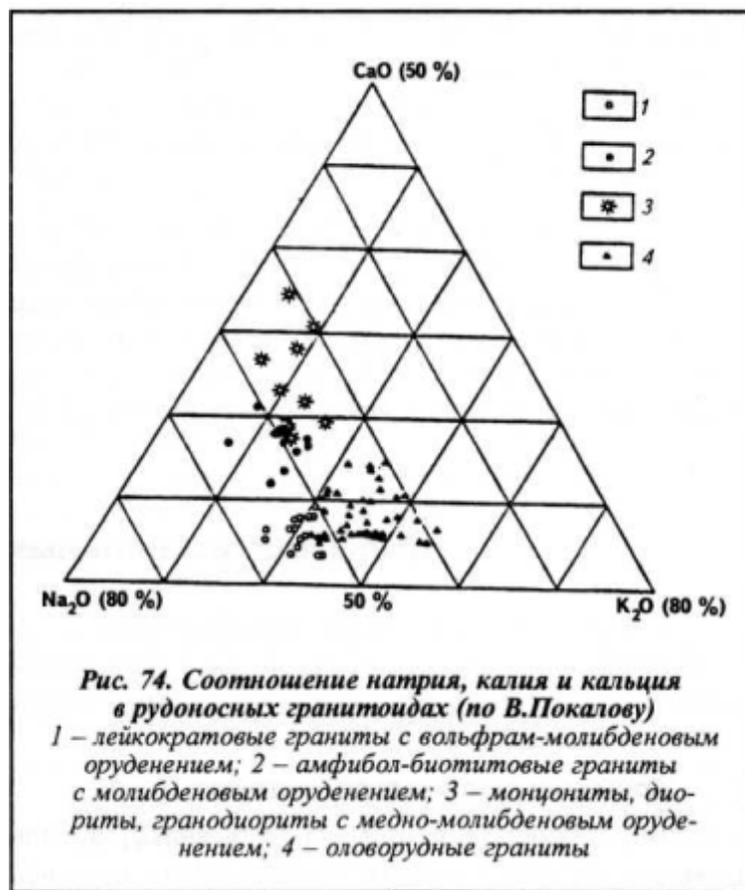
В рудном теле отчетливо проявлена зональность: в центральных частях развита молибденово-медная минерализация, по периферии – низко-температурная, сульфидная (галенит, сфалерит, стибнит).



МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Эндогенные месторождения молибдена связаны с крупными гранитоидными плутонами, формировавшимися в завершающие этапы развития складчатых областей, а также в связи с процессами тектоно-магматической активизации древних консолидированных областей. Распределение запасов молибдена по металлогеническим эпохам подчиняется той же закономерности, которая отмечена для Sn и W - от древних к молодым эпохам они увеличиваются. Состав руд месторождений обусловлен составом и петрологией рудоносных комплексов.

По особенностям состава руд, условиям локализации и закономерностям размещения молибденовые месторождения обнаруживают большое сходство с оловянными и вольфрамовыми. Основные геолого-промышленные типы месторождений этих трех металлов образуют своеобразные эволюционные ряды. Скарновые, грейзеновые, гидротермальные плутоногенные месторождения в большинстве своем являются комплексными и разделяются на оловянные, молибденовые и вольфрамовые довольно условно - по относительному преобладанию того или иного компонента. А это, в свою очередь, определяется особенностями состава рудо-производящих комплексов. Интрузивные и вулканоплутонические рудоносные комплексы в общем имеют известково-щелочной характер, отличаются пересыщенностью глиноземом, многофазностью, повышением щелочности и активности калия к концу магматического процесса. Отчетливо проявлена связь металлогенической специализации рудоносных гранитоидов с их петрохимическими особенностями, в частности, Мо-носные плутоны характеризуются повышенной щелочностью, а оловорудные - более высоким содержанием К (рис. 74).



Большей специфичностью отличаются вулканогенные гидротермальные месторождения этих металлов. Если оловянные и вольфрамовые руды могут быть объединены в один ряд, то молибденовые резко отличаются от них, ассоциируясь с ураном. Вообще ряды основных типов месторождений олово-вольфрама-молибдена характеризуются определенной направленностью, которая в известной степени согласуется с порядком чередования зон в геохимических колонках комплексных месторождений. А именно, в направлении от оловянных месторождений, обычно более высокотемпературных и характеризующихся развитием редкометальных и редкоземельных ассоциаций, к вольфрамовым и далее к молибденовым - постепенно увеличивается роль сначала Ве, затем Vi, полиметаллов и меди.

Для экзогенных месторождений соответствующая направленность выражается в том, что для олова основным промышленным типом являются россыпные месторождения, в структуре запасов вольфрама россыпи занимают одно из последних мест, но вольфрам концентрируется в осадочном процессе, молибден вообще не образует россыпных месторождений, но для него характерны крупные скопления в некоторых типах осадочных пород, хотя и убогие по содержанию металла.

СВИНЕЦ И ЦИНК

Свинец и цинк в большинстве случаев образуют промышленные скопления в комплексных месторождениях, поэтому они традиционно рассматриваются совместно. Свинец известен с древнейших времен. В Месопотамии и Египте он использовался за 6-7 тыс. лет до н.э. Серебро-свинцовые месторождения в Средиземноморье, Аравии, Иране, Индии, Китае разрабатывались за 10-20 веков до н.э. При раскопках Помпеи найдены свинцовые водопроводные трубы. В Китае более чем за 2000 лет до н.э. свинец использовался для чеканки монет и изготовления монетного сплава. Свинец в древности употреблялся для украшений, производства бронз, пайки и т.д. Позднее интенсивно разрабатывались месторождения в Испании, Греции, Пиренеях, Гарце и Силезии.

Металлический цинк был открыт в 1520 г., однако наиболее ранние изделия из него относятся к VI-V в. до н.э., а греки и римляне, не зная цинка, использовали его для производства латуни. Добыча цинка в Европе началась с 1740 г., а до этого он поступал из Индии и Китая.

В настоящее время большая часть производимого свинца используется для изготовления аккумуляторных батарей (63 %); другие сферы использования свинца (в %): производство красителей и химикатов - 13, проката и штампованных изделий - 7, оболочек кабеля - 5, сплавов - 3, боеприпасов - 3, прочих изделий - 6. Использование цинка по отраслям промышленности распределяется следующим образом (в %): производство оцинкованной стали - 47, латуни, бронзы и других сплавов - 19, литья под давлением - 14, оксида цинка - 8, проката - 7, прочей продукции - 5.

Свинец и цинк извлекают в основном из комплексных руд, содержащих медь, золото, серебро и другие металлы. Общие запасы свинца в 1994 г. в 70 зарубежных странах оценивались в 212 млн т, разведанные запасы составили около 129 млн т. Общие запасы цинка превышают 491, а разведанные - 294 млн т. Россия занимает второе место в мире по запасам свинца и первое по запасам цинка. Наиболее крупными запасами свинца и цинка обладают также США, Австралия, Казахстан, Канада, Китай. Обеспеченность уровня добычи подтвержденными запасами свинца и цинка оценивается в 38-39 лет. Суммарные запасы свинца и цинка в уникальных месторождениях превышают 5 млн т, в крупных - колеблются от 5 млн т до 600 тыс. т, в средних - от 600 до 200 тыс. т, в мелких - менее 200 тыс. т. По масштабам использования в промышленности свинец и цинк каждый в отдельности уступают меди, а в сумме превосходят ее. Ежегодное производство в концентратах составляет (в млн т): свинца - 2,8-3,0; цинка - 6,2-7,3; рафинированного свинца - 4,9-5,4 (при этом, 40-45 % его получают из вторичного сырья); металлического цинка - 6,3-6,9. Цена рафинированного свинца в 1994 г. составила 550, а цинка - 1000 дол/т.

В России месторождения свинца и цинка сосредоточены на Урале, Северном Кавказе, Рудном Алтае, Енисейском крае, Забайкалье, Приморье.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк свинца $1,6 \cdot 10^{-8}$ %; он увеличивается от ультраосновных ($1 \cdot 10^{-6}$) и основных ($8 \cdot 10^{-4}$) к кислым магматическим породам ($2 \cdot 10^{-3}$). Кларк цинка несколько выше - $8,3 \cdot 10^{-2}$ %, при этом наиболее высокое содержание его наблюдается в основных породах ($1,3 \cdot 10^{-2}$ %) по сравнению со средними ($7,2 \cdot 10^{-3}$) и кислыми ($6 \cdot 10^{-3}$) породами. По химическим характеристикам свинец и цинк существенно различаются между собой, однако отчетливо выраженные халькофильные свойства обуславливают совместное накопление их в месторождениях, генезис которых связан с эндогенными процессами. Эти элементы накапливаются в остаточных дифференциатах магматических очагов и выносятся гидротермальными растворами в

виде комплексных соединений. Они осаждаются в форме сульфидов при температурах ниже 300 °С в обстановке нейтрализации растворов и присутствия серы. Подавляющая часть промышленных свинцово-цинковых месторождений принадлежит к эндогенно-экзогенному типу, формирование которого обусловлено осадочными, осадочно-метасоматическими процессами, происходящими в областях разгрузки эндогенных гидротермальных растворов на морском дне, в придонных осадках, в трещинных зонах рудоподводящих структур. Различные условия кристаллизации сульфидов цинка (более высокотемпературные) и свинца являются одной из причин рудной зональности залежей, в которых сфалерит концентрируется в нижних частях, а галенит ближе к поверхности.

В экзогенных условиях пути свинца и цинка расходятся. В зоне выветривания свинец слабо мигрирует и накапливается в форме малорастворимых англезита, церуссита, тогда как цинк, переходящий в хорошо растворимый сульфат, выносится на значительные расстояния и может накапливаться в карбонатной среде в виде смитсонита.

Главные минералы свинца - галенит PbS (86,6 %) - обычно содержит примеси Ag , Bi , Sb ; джемсонит $Pb_4FeSb_6S_{14}$ (50,8), буланжерит $Pb_5Sb_4S_{11}$ (55,4), бурнонит $PbCuSbS_3$ (42,6); в зоне окисления - церуссит $PbCO_3$ (77,6) и англезит $PbSO_4$ (68,3). Основные минералы цинка - сфалерит ZnS (67 % - Zn), содержащий примеси Cd , In , Ga , Ge ; вюртцит ZnS (63); в зоне окисления - смитсонит $ZnCO_3$ (52) и каламин $Zn_4[Si_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$ (53,7). Главные промышленные минералы свинцово-цинковых руд - галенит и сфалерит.

Руды свинцово-цинковых месторождений всех типов являются комплексными и характеризуются сложным минеральным составом. Помимо двух главных металлов в рудах в том или ином количестве могут присутствовать медь, сурьма, висмут, олово. Почти во всех случаях цинк в большей или меньшей степени преобладает над свинцом. Попутные компоненты руд - кадмий, серебро, золото, селен, теллур, германий, таллий, галлий, индий. В свинцово-цинковых рудах сосредоточено более 80 % мировых запасов кадмия, 40-50 - таллия, 25-30 - германия, 20-25 — селена, теллура, индия, 15-20 - галлия и висмута. Эти руды дают 50 % мировой продукции серебра. Свинцово-цинковые руды относятся к богатым при содержании свинца свыше 4 % или суммы свинца и цинка свыше 7 %; руды среднего качества содержат свинца 2-4 или 4-7 % суммы свинца и цинка; бедные руды характеризуются содержанием свинца 1,2-2 % или суммы свинца и цинка не ниже 4 %. Технологические свойства свинцово-цинковых руд определяются, в первую очередь, их структурными особенностями, поскольку крупнозернистые легко обогащаются и разделяются, а для селективной флотации тонкозернистых руд требуется их очень тонкое измельчение.

Среди промышленных месторождений свинца и цинка выделяются: скарновые, плутоногенные гидротермальные, месторождения экзогенно-эндогенной серии. Последние могут быть подразделены на три типа: колчеданно-полиметаллические месторождения в вулканогенных формациях; колчеданно-полиметаллические месторождения в терригенных формациях; стратиформные месторождения в карбонатных формациях

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Свинцово-цинковые скарновые месторождения приурочены к складчатым поясам, сформировавшимся в поздние стадии развития подвижных зон. Характерной особенностью месторождений этой группы является связь их с вулканоплутоническими ассоциациями и формирование в периоды завершения вулканической деятельности, локализация в пределах вулканотектонических структур. Рудные тела

ассоциируют с известковыми скарнами, развивающимися в известняках и вдоль контактов их с терригенными и вулканогенными породами. Они располагаются на удалении от контактов с интрузивами, характеризуются сложной морфологией, обусловленной особенностями рудоносных контактов, сочетанием дорудных тектонических структур.

Состав скарнов определяется преобладанием геденбергита, в меньших количествах присутствуют гранаты, волластонит, аксинит. Руды обычно богатые сплошные и вкрапленные. Соотношение свинца и цинка близко 1:1. Содержание свинца колеблется в пределах 6-12, цинка-6-14 %. Содержание меди незначительно, серебра - 30-300 г/т. Типичные элементы-примеси - железо, кадмий, марганец, олово, медь, индий, висмут, серебро, сурьма. В процессе минералообразования обычно выделяется несколько стадий: предрудная скарновая, одна или несколько продуктивных и поздние безрудные. Месторождениям свойственна горизонтальная и вертикальная зональность: в верхних частях и по периферии развиты галенитовые руды, с глубиной увеличивается роль сфалерита, а затем преобладает арсенопиритовая и пирротино-вая минерализация. Вертикальный размах сульфидного оруденения достигает 1000 м.

К группе скарновых относятся также месторождения так называемого приаргунского типа в юго-восточном Забайкалье. Месторождения располагаются в пределах мезозойского вулканоплутонического пояса, сформировавшегося на фундаменте Аргунского эпигерцинского массива. Особенность этих месторождений заключается в том, что они размещаются преимущественно в фундаменте, сложенном породами углисто-кремнисто-карбонатной формации, и в меньшей степени в вулканитах позднеюрской трахириолит-трахиандезитовой формации. Учитывая имеющиеся данные о том, что рудные тела локализованы не только в скарнированных контактах известняков фундамента и гранитов вулканоплутонической ассоциации, но и среди чистых известняков, а также свидетельства об имевшейся в карбонатных породах фундамента минерализации стратиформного типа, Е.Филатов высказал предположение о регенерированном характере этих месторождений. По его мнению, фактором рудоносности для месторождений приаргунского типа является взаимодействие двух формаций - углисто-кремнисто-карбонатной и трахириолит-трахиандезитовой. В ряде случаев эти и подобные им месторождения выделяются в самостоятельную группу метасоматических залежей свинцово-цинковых руд в карбонатных породах.

Свинцово-цинковые скарновые месторождения в мировом балансе запасов имеют подчиненное значение, обеспечивая 6 % запасов и 9-14 % добычи. Для России роль этих месторождений более существенна.

Скарновые месторождения, обычно средние и мелкие по масштабу запасов, распространены достаточно широко. Они известны в Приморье (Николаевское, Верхнее и др.), Забайкалье (Кадаинское, Смирновское, Алгачинское и др.), Казахстане (Кызыл-Эспе, Аскоран), Средней Азии (Алтын-Топкан, Кансай), Швеции (Сала, Аммаберг), Югославии (Стари Трг), США (Франклин-Фернас, Лоуренс), Перу (Серро-де-Паско), Мексике (Эль-Потоси), Аргентине (Агилар), Китае (Тембушань).

Николаевское месторождение находится в Приморье, в Дальнегорском рудном районе. В геологическом строении района участвуют складчатые мезозойские комплексы вулканических пород, перекрытые сеноман-туронскими конгломератами, алевролитами, туфами. Выше залегают игнимбриты, лавы и спекшиеся туфы приморского вулканоплутонического комплекса турон-кампанского возраста. Далее следуют андезиты и дациты дальнегорского маастрихт-датского комплекса, к которому относятся и крупные интрузивы гранитоидов повышенной основности. Завершается разрез спекшимися туфами и игнимбритами ультракислого состава богопольского вулканоплутонического комплекса датского возраста. Помимо этого в районе широко развиты самостоятельные дайковые комплексы.

Николаевское месторождение расположено в борту вулcano-тектонической депрессии. Как и другие месторождения в Дальнегорском районе оно приурочено к телу триасовых известняков, заключенному в раннемеловую олистострому. Рудное тело расположено на контакте известняков с позднемеловыми вулканитами и имеет форму пологой пластообразной залежи, осложненной трубообразными ответвлениями (рис. 45).

Руда сложена скарновыми силикатами, сульфидами и кварцем, в перекрывающих вулканитах распространены кварцево-сульфидные жилы. По данным В.Раткина, в формировании дальнегорских скарновых месторождений выделяется два этапа - скарново-полиметаллический и реребро-сульфосольный. Первый этап состоит из ряда последовательных, не прерывавшихся стадий:

- § прерудной скарновой (500- 400 °С),
- § рудодопродуктивной арсенопиритовой,
- § продуктивной галенит-сфалеритовой (430-275 °С), в течение которой был образован весь объем полиметаллических руд,
- § постпродуктивной феррофильной (пирит-пирротин-марказит-халькопиритовая ассоциация).

В серебро-сульфосольный этап, проявившийся после структурной перестройки, сформировалась низкотемпературная (180 °С) ассоциация (галенит, халькопирит, блеклые руды, антимонит, сульфосоли серебра, самородная сурьма, мышьяк и др.), развитая в рудном теле и за его пределами. Скарны характеризуются ильваит-гранат-геденбергитовым составом с аксинитом, флюоритом, кварцем. Ниже скарновой зоны породы грейзенизированы.

Руды помимо галенита и сфалерита содержат халькопирит, арсенопирит, тетраэдрит, бурнонит, самородный висмут, сульфосоли висмута. Нижние части рудных тел обогащены цинком и висмутом, верхние - свинцом, серебром и сурьмой.

Николаевское относится к числу средних разрабатываемых месторождений. Содержание цинка -1,36-10,5, свинца - 1,5-8,7 %, серебра - 62 г/т.

Возраст Николаевского месторождения оценивается в 68-66 млн лет. Геологические и радиометрические данные свидетельствуют, что скарновые месторождения Дальнегорского района не проявляют связи с конкретными интрузивными телами, они были образованы в период завершения вулканической деятельности, сформировавшей дальнегорский вулcano-плутонический комплекс. Глубина формирования месторождений не превышает 1 км, и они, таким образом, должны относиться к ряду типичных вулcanoгенных образований. Предполагается, что рудогенерирующими служили промежуточные вулканические очаги, образовавшие локальные вулcano-тектонические сооружения.

ПЛУТОНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения этой группы представлены жильными рудными телами. В некоторых случаях это одиночные жилы, в других - системы трещин, образующие значительные по площади жильные поля. Месторождения обычно размещаются в складчатых областях, на срединных массивах и в других структурах. Вмещающие породы весьма разнообразны - гранитоиды, известняки, песчано-сланцевые отложения и др. Морфология рудных тел определяется трещинной структурой. В составе руд преобладают галенит и сфалерит, в меньших количествах содержатся халькопирит, пирит, пирротин, иногда блеклые руды, минералы серебра, нерудные - кварц, карбонаты, барит. Нередко на месторождениях фиксируется вертикальная зональность, обусловленная преобладанием галенита на верхних горизонтах, сфалерита, а также пирита и пирротина на нижних.

В некоторых случаях установлена связь жильных месторождений с процессами вулканизма (Садон, Згид), в других - они относятся к плутоногенным образованиям (месторождения Гарца, Рудных гор и др.).

Масштаб месторождений мелкий, средний, редко крупный. Промышленное значение этой группы скромное: в них заключено 3 % запасов свинца и 9 % - цинка; они обеспечивают 4 % добычи.

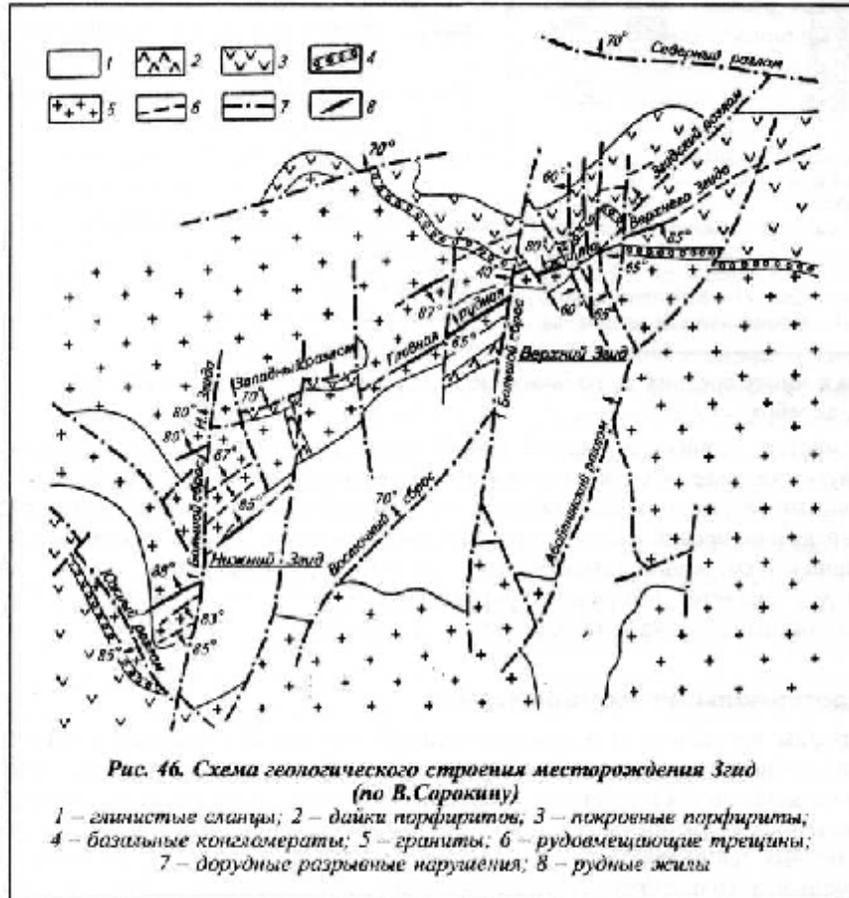
Жильные месторождения многочисленны. Они распространены на Северном Кавказе (Садонское, Згидское, Холстинское), в Средней Азии (Замбарак, Тары-Экан), в Гарце, Рудных горах, Чешском массиве, в США (Кер-д'Ален), Канаде (Кен-Хилл) и других странах.

Месторождение Згид находится на территории Северной Осетии. В числе других жильных месторождений рудного района оно приурочено к Садонно-Унальской антиклинали. Ядро этой структуры сложено палеозойскими гранитами, крылья - осадочными и вулканогенными породами нижней и средней юры. В основании разреза юрских отложений залегают базальные конгломераты, выше - андезиты, дациты, туфы, туфо-песчаники среднего лейаса. С эффузивами вулканогенного комплекса связаны субвулканические образования в виде штоков и даек, пересекающие граниты.

Мощность вулканогенной толщи в сводовой части антиклинали около 30 м, на крыльях увеличивается до 700-900 м. Вулканыты перекрыты несогласно залегающим комплексом осадочных пород - песчаников, алевролитов, аргиллитов среднего, верхнего лейаса и доггера - мощностью до 1700 м. Антиклиналь вытянута в общекавказском направлении, осложнена многочисленными сбросами, сбросо-сдвигами, системами трещин. Рудные тела месторождений и рудопроявлений района приурочены к трещинам скола и отрыва и представлены кварцевыми, кварцево-карбонатными жилами с сульфидами, образованными путем выполнения свободных полостей. Зональность в размещении оруденения (по К.Давыдову и С.Тибилу) связана с центрами ранне-среднеюрского вулканизма.

Главное рудное тело Згидского месторождения представляет собой жилу, приуроченную к сбросо-сдвигу северо-восточного простирания и крутого падения, меняющегося от северо-западного к юго-восточному падению. Горизонтальная амплитуда смещения вдоль рудоносного разлома оценивается в 100 м, вертикальная - в 70 м. Мощность жилы от 0,1 до 5 м.

Жила в основном локализована в гранитах и лишь частично проникает в слоистые породы юры. Второстепенные рудные тела представлены почти параллельными жилами. Рудовмещающее нарушение (по В.Сорокину) пересечено дорудными разрывами, смещения по которым происходили и в послерудный этап. Главные рудообразующие минералы - галенит, сфалерит, кварц, мангансидерит и кальцит. Вертикальная зональность (по данным И.Златогурской, Ю.Ляхова и др.) выражена в приуроченности высоких концентраций свинца к верхним горизонтам месторождения, тогда как богатые цинком руды распространены на периферии и в нижних частях жилы. На нижних горизонтах месторождения развиты зоны прожилково-вкрапленной минерализации с преобладанием ранних сульфидов - пирита, пирротина, халькопирита. Отношение содержаний свинца и цинка изменяется от 6 на верхних горизонтах до 0,5 на нижних. Среднее содержание свинца составляет 2,97 %. В процессе рудообразования выделено три стадии: допродуктивная кварцево-пиритовая, продуктивная кварц-галенит-сфалеритовая, послепродуктивная кварцево-карбонатная. Методом гомогенизации флюидных включений температурный диапазон формирования руд определен в 415-65°C. Гидротермальные изменения гранитов выражены в преимущественном окварцевании и серицитизации на верхних горизонтах, карбонатизации и хлоритизации - на нижних.



МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЭКЗОГЕННО-ЭНДОГЕННОЙ СЕРИИ

Выделяют три группы, отвечающие промышленным типам: колчеданно-полиметаллические месторождения в вулканогенных формациях; колчеданно-полиметаллические месторождения в терригенных формациях; стратиформные месторождения в карбонатных формациях.

Промышленная значимость этих типов весьма существенна: в первых двух сосредоточено более 60 % подтвержденных запасов, и они обеспечивают более 45 % добычи свинца и цинка; третий тип содержит почти 30 % запасов и дает почти треть добычи. Характерная особенность каждой из этих групп месторождений - образование эволюционных рядов, в которых закономерно меняются соотношения основных рудообразующих металлов - Cu, Zn, Pb, а также Ba и Ag. Установлено, что это связано с изменчивостью состава и строения рудоносных формаций. Очевидно, колчеданные, колчеданно-полиметаллические и стратиформные свинцово-цинковые месторождения образуют единый эволюционный ряд. Смена составов руд месторождений в этом ряду от серно- и медноколчеданных до свинцово-цинковых происходит в соответствии со сменой состава рудоносных формаций и эволюцией их петрохимических особенностей. В пределах почти каждого конкретного месторождения присутствуют руды разного состава, также образующие свой ряд, совпадающий с одной из частей общего эволюционного ряда. Таким образом, эволюция состава руд обусловлена не только сменой типов месторождений в пределах рудных провинций, но и изменением состава руд в пределах одного тела. Это можно рассматривать как проявление принципа онтогенеза и филогенеза: эволюция процесса рудообразования, реализующаяся на каждом конкретном месторождении в виде последовательно

формирующихся типов руд, отражает в микромасштабе общую эволюцию процесса колчеданообразования.

КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ВУЛКАНОГЕННЫХ ФОРМАЦИЯХ

Месторождения этой группы представлены широко известными рудно-алтайским типом, близким к нему типом куроко, хандизинским типом и другими. Они связаны с контрастно- и последовательно дифференцированными базальтоидными формациями - базальт-риоли-товой, базальт-андезито-дацито-риолитовой и др, развивающимися в пределах островодуж-ных систем, заложенных на коре сиалического типа или на раздробленной переработанной континентальной коре. Среди пород, слагающих рудоносные формации, преобладают кис-лые вулканыты (лавы, лавобрекчии, туфы, игнимбриты), составляющие до 45-50 % от общего объема. Базальты, их туфы значительно уступают кислым разностям, составляя 10-15 %. На долю осадочных пород - песчаников, алевролитов, известковистых сланцев, известняков приходится до 35-40 %. Месторождения размещаются среди пород рудоносных формаций, при этом их основные особенности находятся в прямой зависимости от состава, строения, эволюции рудоносной формации: региональная позиция месторождений определяется реги-ональными вулcano-тектоническими структурами, состав руд месторождений – петрохимичес-кими особенностями рудоносных комплексов, положение и морфология рудных тел – харак-тером локальных вулканических структур и их элементов. Формирование рудных залежей происходило на куполообразных поднятиях и в депрессионных структурах.

Месторождения первого типа, приуроченным к экструзивным риолитовым куполам, свойст-венны: линзовидная форма согласных рудных тел; хорошо развитые подрудные штокверковые зоны, совпадение магмо- и рудоподводящих каналов, обусловленное почти одновремен-ным проявлением вулканических извержений и процессов рудообразования; наличие рудо-кластов в перекрывающих толщах; признаки оползания рудного материала.

Месторождения второго типа приурочены к локальным депрессионным структурам – вершин-ным депрессиям, кальдерообразным впадинам, осложнявшим вулканические сооружения и межвулканические зоны. Формирование месторождений происходило после завершения ак-тивной вулканической деятельности, для них характерны пластообразная форма выдержан-ных по мощности рудных тел; сравнительно слабое развитие подрудных зон прожилково-вкрапленной минерализации или их полное отсутствие; позиция рудных тел в основании раз-реза мелкообломочных терригенных пород внутрика-льдерного комплекса; тонкое пересла-ивание в составе рудных тел рудных и безрудных прослоев, преобладание слоистых текстур руд; широкое развитие подрудных гидротермально-осадочных пород. Пластовые и пласто-образные залежи простираются нередко на сотни метров, иногда на 1-2 км; мощность их колеблется от нескольких метров до 15-20, иногда до 50 м.

Рудные тела сложены в основном Cu-Pb-Zn- и Pb-Zn-рудами, реже присутствуют меднокол-чеданные, барит-полиметаллические, свинцовые руды.

Зональность рудных залежей проявлена в последовательной смене (снизу вверх) сернокол-чеданных, медноколчеданных, медно-цинково-колчеданных, полиметаллических и барит-полиметаллических руд. Латеральная зональность выражена значительно слабее.

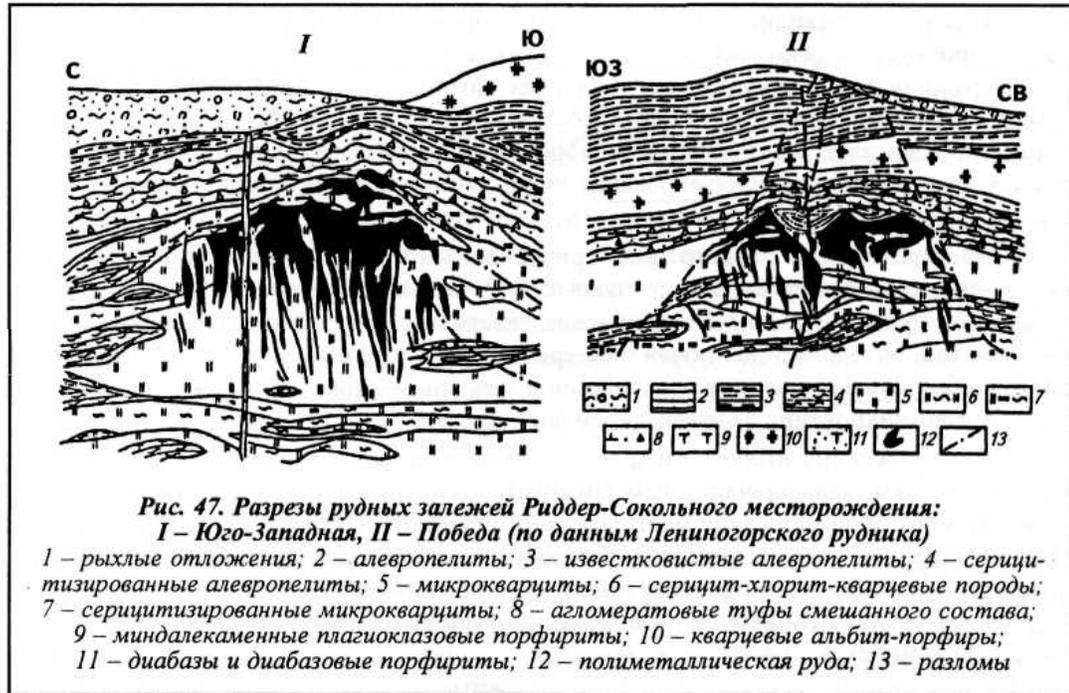
Вулканогенные колчеданно-полиметаллические месторождения представлены объектами различного масштаба, в том числе весьма крупными. Они широко распространены в палео-вулканических провинциях на Рудном Алтае, Салаирском кряже, в Западном Забайкалье, Юго-Западном Гиссаре. Представителями этого типа являются месторождения Куроко в Японии и такие известные объекты, как Кидд-

Крик, Фаро, Бранеуик в Канаде, Рио-Тинто в Испании, Ред-Дог в США, Фалун в Швеции, Ангуран в Иране и многие другие.

Риддер-Сокольное месторождение находится на Рудном Алтае, на территории Казахстана. Месторождение связано с девонской базальт-риолитовой формацией и размещается в пределах региональной вулканогенно-осадочной депрессии. Рудовмещающие эмско-эйфельские вулканогенно-осадочные породы залегают на метаморфических сланцах нижнего палеозоя. Подрудная часть разреза сложена эффузивно-пирокластической толщей риолитового состава мощностью от 600 до 1100 м. Рудные залежи перекрыты толщей лав, туфов андезито-базальтового состава, туфогенных конгломератов и песчаников (мощностью 100 м), выше которых залегают пачка аргиллитов и алевролитов с линзовидными телами риолитов экструзивной фации (мощностью более 400 м).

Все рудные залежи Риддер-Сокольного месторождения приурочены к сводовым частям купольных структур, сложенных в основном гидротермально-осадочными кварцитами, которые в верхних частях сменяются пластами хлоритолитов и серицитолитов (рис. 47). Куполообразные структуры в момент рудообразования представляли собой холмы, достигавшие в поперечнике 500-700 м и высоты 100-200 м. Сложенные в различной степени литифицированными гидротермально-осадочными породами они до начала рудоотложения и в течение этого процесса подвергались разрушению, у их подножий образовывались оползневые брекчии. Рудные залежи локализованы в сводовых частях куполов. Они обычно имеют весьма выразительную медузообразную форму: верхняя часть залежи представляет собой пластообразное, линзовидное тело сплошных гидротермально-осадочных руд, согласно залегающее на поверхности купола, подстилаемое и перекрываемое хлоритолитами и серицитолитами; вниз от согласной залежи отходят многочисленные апофизы, представленные жильными телами и минерализованными штокверковыми зонами. Эта корневая система локализована в трещинных рудоподводящих зонах. На склонах куполов фиксируются многочисленные шлейфы рудокластов. Главные рудообразующие минералы - сфалерит, галенит, халькопирит и пирит, второстепенные - тетраэдрит, теннантит, марказит, арсенопирит, золото, серебро, электрум. Среди нерудных преобладают кварц, карбонаты, серицит, хлорит, барит. Зональность отчетливо выражена в смене (снизу вверх) серноколчеданных, медноколчеданных, медно-цинковых, свинцово-цинковых и барит-свинцово-цинковых руд; первые три типа локализованы в корневой жильно-штокверковой зоне. В пластовой части рудных тел преобладают массивные, слоистые, полосчатые, колломорфные и брекчиевые текстуры; жильно-штокверковые руды характеризуются прожилково-вкрапленными, прожилково-полосчатыми, пятнистыми текстурами.

По В.В.Попову, в пластовых телах отмечаются такие средние содержания металлов: Pb - 4,0, Zn - 6,0, Cu - 0,3 %, Au - 3 г/т, Ag - 8 г/т. Ниже залегающие прожилковые руды содержат: Pb - 0,9, Zn - 2,2, Cu — 0,4 %, Au - 5 г/т, Ag - 20 г/т. Штокверковые медно-цинковые руды корневых частей включают: Pb - 0,3, Zn - 1,0, Cu - 2,3 %, Au - 1,3 г/т, Ag - 1,5 г/т.

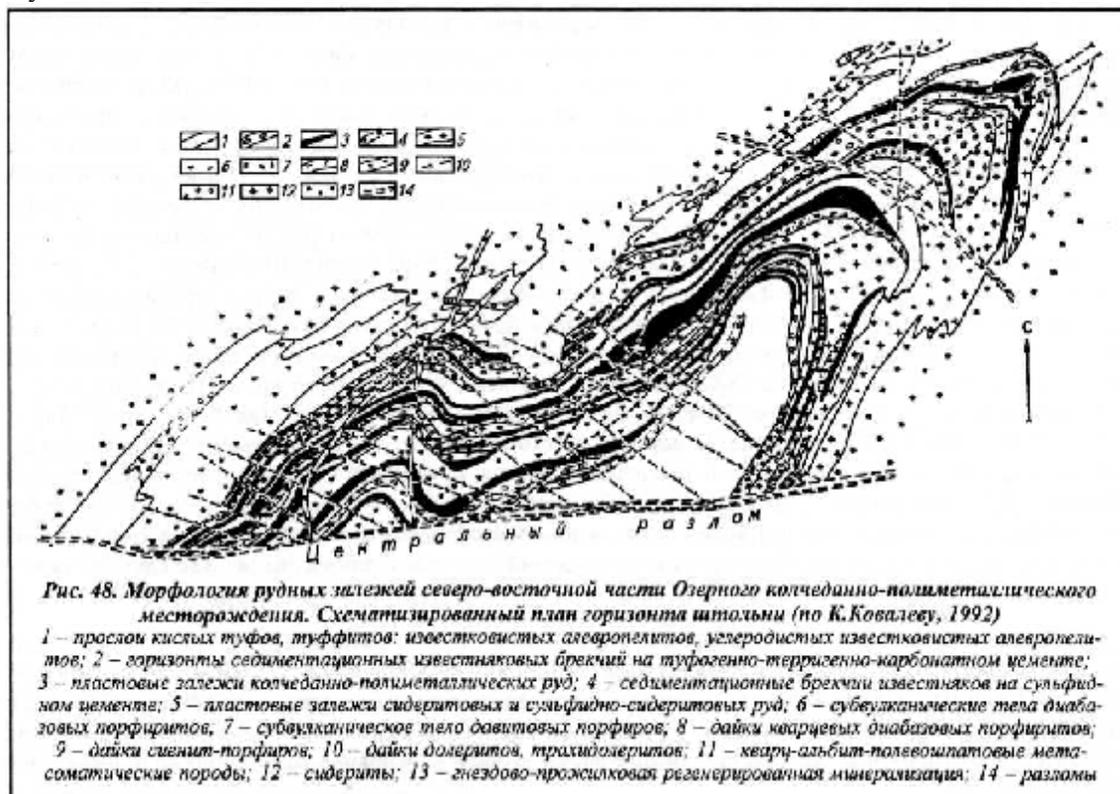


Озерное месторождение находится в Западном Забайкалье. Месторождение приурочено к останцу нижнекембрийских вулканогенно-осадочных пород, расположенному среди гранито-идов среднепалеозойского возраста. Район является частью Удино-Витимской островодужной системы окраинно-океанического типа. Рудоносная формация образовалась в результате проявления дифференцированного базальт-андезит-дацит-риолитового вулканизма; преобладающая роль принадлежит андезитам и дацитам. В составе формации развиты разнообломочные туфы, турбидиты, граувакки, брекчии, пестроцветные обломочные и хемогенные породы. Выделяются реликты вулканических построек центрального типа. В рудовмещающей толще преобладают нормальные осадочные породы, что позволяет отнести месторождение к переходному типу от колчеданно-полиметаллических в вулканогенных толщах к следующей группе — к месторождениям в терригенных формациях. Этим обусловлена характерная колчеданно-свинцово-цинковая специализация руд при почти полном отсутствии меди и, кроме того, ассоциация сульфидных полиметаллических руд с сульфидно-железоокисными и железокarbonатными рудами с марганцем.

Гидротермально-осадочные руды месторождения формировались в локальной депрессии размером 0,8x25 км. Сульфидные и сидерит-сульфидные руды залегают в ритмично-слоистых туфогенно-терригенно-карбонатных породах турбидитового строения. В наиболее продуктивном горизонте месторождения в пачке туфогенно-карбонатных пород мощностью 360 м располагается 12 сближенных пластовых залежей максимальной мощностью до 40 м и протяженностью до первых километров. Под ярусными пластовыми рудными телами рудоподводящие зоны не встречены (рис. 48).

Главные рудные минералы - пирит, сфалерит и галенит, в незначительных количествах - халькопирит, арсенопирит, пирротин, тетраэдрит, бурнонит. Отношение свинца и цинка близко 1:6. Элементы-примеси - кадмий, сурьма, мышьяк, серебро, таллий. В рудах широко представлены барий и баритовая минерализация. Из нерудных минералов присутствуют сидерит, кальцит, анкерит, немного кварца, гипс, хлорит, гидрослюда. Типичны слоистые, ритмично-слоистые, градиционно слоистые текстуры. Вертикальная зональность выражена в увеличении сидеритовой

составляющей в верхних пластовых телах; свинец и цинк отлагаются преимущественно в подошве рудных залежей, а пирит - в кровле. Латеральная зональность проявлена в повышенных концентрациях цинка в осевой части рудолокализирующей струк-туры, а свинца и бария - по ее флангам. По запасам свинца (1,6 млн т) и цинка (8,3 млн т) при их средних содержаниях 1,2 и 6,2 % Озерное месторождение относится к уникальным.



КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ТЕРРИГЕННЫХ ФОРМАЦИЯХ

Месторождения этой группы связаны с углеродистыми терригенно-флишоидными формациями, в состав которых нередко входят вулканогенные комплексы базальтового или риолито-базальтового субщелочного ряда, сильно редуцированные по сравнению с формациями предшествующей группы. Рудоносные формации накапливаются в различных палеотектонических обстановках - в рифтогенных структурах палеоконтинентов, авлакогенах, терригенных эвгеосинклиналиях. Выделяется несколько типов, отличающихся особенностями состава руд и приуроченностью к рудовмещающим толщам различного формационного и литолого-фациального состава. К таким типам относятся филизчайский, маунтайза, атасуйский и др. Общим для них является формирование в застойных обстановках осадконакопления окраинных и внутриконтинентальных морей. Рудоконтролирующими структурами служат локальные палеодепрессии высоких порядков. Рудные тела, как правило, локализованы среди углеродистых черносланцевых комплексов, приуроченных к средним частям формаций. При этом отмечается, что рудовмещающие углеродистые толщи (иногда их выделяют в качестве самостоятельных формаций) пространственно связаны с карбонатными и вулканогенными толщами. В ряде случаев наблюдаются закономерные латеральные ряды формаций: вулканогенная риолито-базальтовая (базальтовая - андезито-базальтовая) - карбонатная (известняковая или известняково-доломитовая) - черносланцевая.

Предполагается, что именно вулканогенные комплексы или формации, локализованные на одном стратиграфическом уровне с черно-сланцевыми или карбонатными толщами, служат основным источником рудообразующих растворов, формирующих заключенные в них месторождения. Вследствие этого группа колчеданно-полиметаллических месторождений в терригенных формациях также может быть представлена в виде эволюционного ряда, в котором изменчивости рудоносных формаций - от углеродисто-кремнистых бескарбонатных, содержащих вулканиты, до углеродистых карбо-натных и даже карбонатных рифогенных - соответствует ряд месторождений: от медно-цинково-колчеданных до свинцово-цинково-колчеданных и барит-свинцово-цинковых. Конкретные реализации этого ряда или его фрагментов установлены в ряде регионов в виде латеральных рядов месторождений, расположенных в сопряженных разновозрастных структурах. Примерами таких рядов могут служить месторождения Большого Кавказа (Кацдаг, Филлизчайское, Катехское), Олоkitского прогиба (Холоднинское, Овгольское), Енисейского кряжа (Горевское и др.), Джунгарского Алатау (Яблоновое, Текели), австралийские месторождения Мак-Артур-Ривер, Ридж, Кули, Маунт-Айза, Хилтон и другие. Некоторые из отнесенных в эту группу месторождений локализованы в древних протерозойских и нижнепалеозойских комплексах и вместе с ними подверглись метаморфизму (Брокен -Хилл в Австралии, Салливан в Канаде). Вмещающие породы испытали складчатые деформации и метаморфизм эпидот-амфиболитовой, биотит-гранатовой, гранат-амфиболитовой и грану-литовой фаций. Руды этих месторождений перекристаллизованы, в ряде случаев характеризуются признаками регенерации.

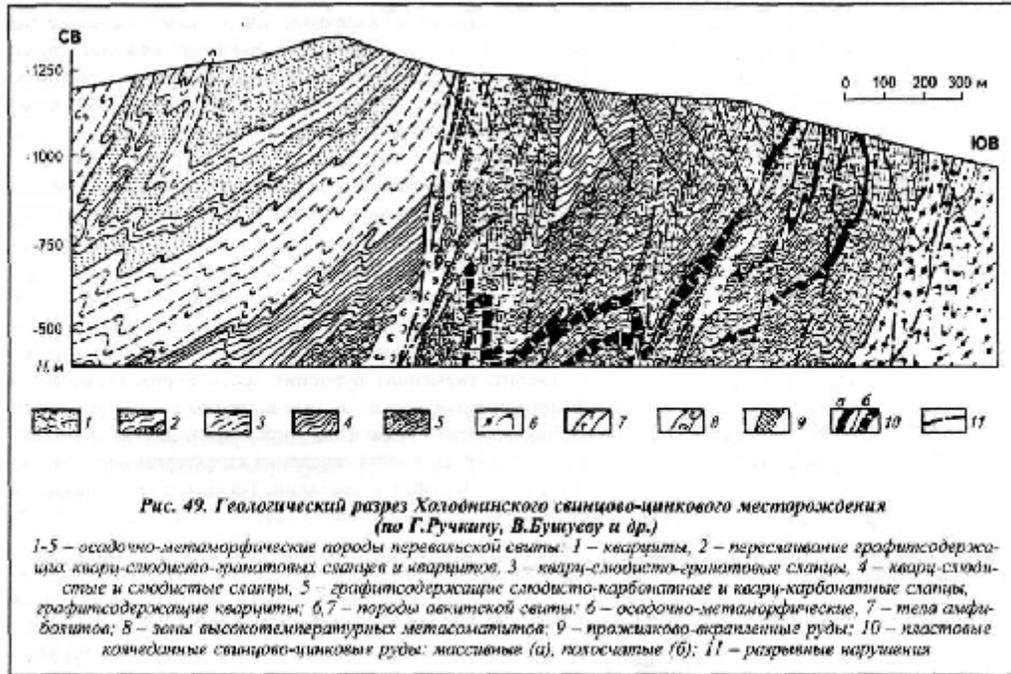
Холоднинское месторождение в Северном Прибайкалье расположено в Олоkitской трого-вой структуре. Прогиб выполнен рифейскими вулканогенно-осадочными толщами. Выделяют три цикла вулканизма, проявленного формированием толщ, недифференцированных низко-щелочных толеитовых базальтов, прорванных базит-гипербазитовыми интрузиями. С первым этапом связаны горизонты железистых кварцитов, со вторым - основное колчеданно-полиметаллическое оруденение.

Месторождение сформировалось в пределах узкой приразломной палеодепрессии протяженностью около 40 км, расположенной в юго-восточном борту Олоkitского прогиба. Структура выполнена черносланцевыми пачками, ритмично чередующимися с пачками терригенно-кар-бонатно-туфогенных пород и метабазитов, метаморфизованных в условиях эпидот-амфибо-литовой фации. Породы рудного поля, превращены в сланцы, кварциты, амфиболиты, смяты в складки, рассечены серией разломов. В разрезе рудовмещающей терригенно-кремнисто-кар-бонатно-углеродистой формации руды располагаются на трех стратиграфических уровнях, обнаруживая приуроченность к кремнистым и графитисто-кремнистым пачкам. В нижнем наиболее продуктивном горизонте выделяются многоярусные пластовые залежи протяженностью 5-7 км и мощностью до сотни метров (рис. 49).

Руды сложены пиритом, сфалеритом, галенитом, в меньших количествах присутствуют пирротин и халькопирит. Среди нерудных минералов преобладают кварц, кальцит, доломит, графит, мусковит. Содержание свинца в рудах изменяется от 0,4 до 1,2, цинка - от 3,5 до 6,5 %. Отношение свинца к цинку примерно 1:5, барит в рудах практически отсутствует. Элементы-примеси представлены серебром (10-15 г/т), золотом (0,1 г/т), медью, кадмием, мышьяком, сурьмой, таллием. Вертикальная зональность типична для колчеданно-полиметаллических месторождений: медь приурочена к лежащему боку залежей, обогащенному пиритом; в кровле увеличиваются содержания галенита и сфалерита. В формировании руд выделяется два этапа - дометаморфический (гидротермально-осадочный) и метаморфический. Основные этапы формирования запечатлены в текстурно-структурных особенностях

руд. В первичных рудах сохраняются реликты грубослоистых, ритмично-слоистых, градиционно-слоистых текстур.

Перекристаллизованным метаморфогенно-метасоматическим рудам свойственна массивная, пятнистая, вкрапленная и другие текстуры, регенерированные руды характеризуются прожилковой, гнездово- и послонно-прожилковой текстурами. Месторождение уникально по запасам



Горевское месторождение расположено в Енисейском крае. Рудовмещающая кремнисто-карбонатная толща верхнего рифея сложена ритмично-слоистыми известняками с прослоями кварц-серицит-известковистых и кварц-хлорит-известковистых сланцев. Толща интен-сивно дислоцирована и метаморфизована. Мощность рудовмещающей толщи 1000-1160 м. Магматические породы представлены дайками и штоками оливиновых долеритов. Рудные тела размещены среди кремнисто-сидеритовых пород - сидероплезитов, кремнистых сидероплезитов, силицитов, переслаивающихся с мергелями, доломитистыми известняками, доломи-тами. Согласно рудные залежи линзовидной формы характеризуются кулисообразным расположением. Вместе с вмещающими породами они круто падают на юго-запад. Протяженность залежей достигает 1200 м, мощность колеблется от 20 до 150 м (рис. 50).

Руды относятся к пирротин-сфалерит-галенитовому типу. На 60-80 % они состоят из сидероплезита, анке-рита, и кварца. Основными рудными минералами являются галенит (преобладает), сфалерит, пирротин, в меньшей степени - пирит и марказит; изредка - магнетит, булан-жерит, джемсонит, бурнонит, арсенопирит, халькопирит.

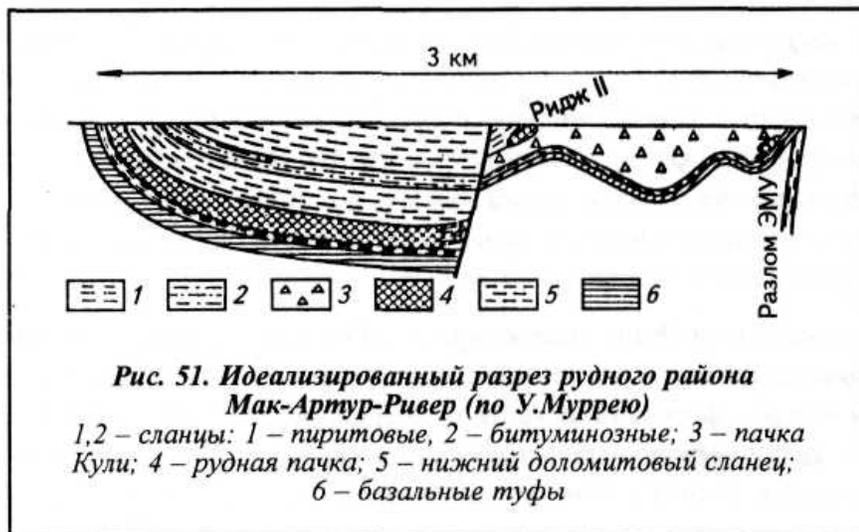


В незначительных количествах встречаются самородное серебро, аргентит, гудмундит, пираргирит, дискразит, брейтгауптит и др. Для зоны окисления характерны церуссит, англезит, пироморфит и ковел-лин. Горевское месторождение имеет уникальные запасы. Содержание свинца - 7,02 %, цинка - 1,36 %. Текстуры руд полосчатые, послойно-прожилковые, брекчиевидные, прожилково-вкрапленные. В полосчатых рудах нередко отмечается ритмическое строение. Вертикальная зональность рудных тел выражена в обогащении приподошвенных частей свинцом, а верхних, прикровлевых, - цинком.

Месторождение Мак-Артур-Ривер - одно из крупнейших в мире, находится в Австралии. Рудоносной структурой служит внутриконтинентальная рифтовая зона, выполненная мелководными доломитовыми осадками средне-верхнепротерозойского возраста. Рудолокализирующими структурами были глубоководные депрессии, заполнявшиеся битуминозными глинистыми осадками с обильным сингенетическим пиритом и вулканокластическим материалом. Рудоносная терригенно-флишоидная формация сложена (снизу вверх) зелеными базальными туфами, нижними темно-

серыми и черными слоистыми доломитовыми сланцами, рудовмещающими пиритовыми битуминозными сланцами с прослоями туфов. Пластовая рудная залежь мощностью 50 м приурочена к нижней части пачки пиритовых сланцев (рис. 51).

В ее составе выделяется семь слоев богатых руд с суммарными содержаниями свинца и цинка более 13 %, разделенных слоями относительно слабо минерализованных сланцев со средними содержаниями свинца и цинка от 2 до 8 %.



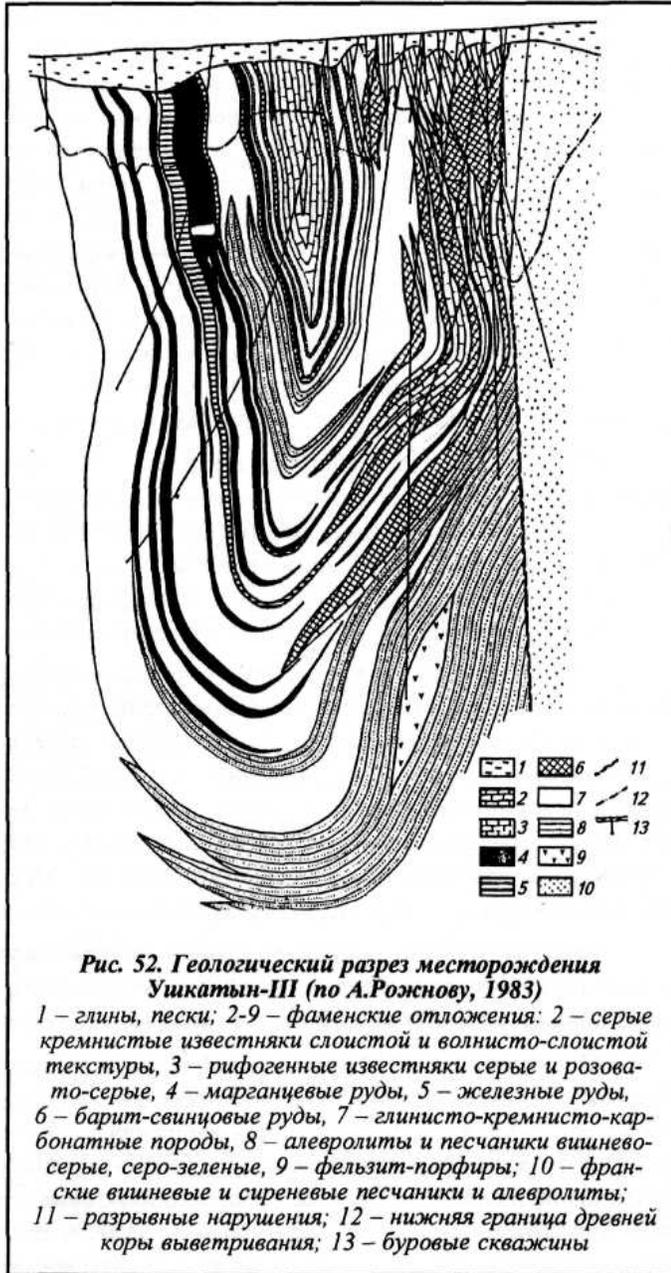
Месторождение Ушкатын III (Казахстан) расположено в пределах Жайильминской мульды и относится к месторождениям атасуйского типа. Рудовмещающей структурой является риф-тогенный прогиб, осложняющий эпикаледонский срединный массив. Группа комплексных железо-марганцевых и свинцово-цинково-баритовых месторождений (Жайрем, Бестюбе, Уш-катын-III и др.) локализована среди пород фаменской осадочно-вулканогенной формации, в состав которой входят вулканиты трахибазальт-трахириолитового ряда и комплекс глинисто-кремнисто-карбонатных пород. Рудоносная пачка имеет флишоидный характер и представляет собой чередование одинаково построенных трехчленных ритмов: известковистые песчаники - алевропелиты - углисто-глинисто-карбонатные пелиты.

Атасуйские месторождения и Ушкатын-III в их числе отличаются исключительно устойчивым парагенезисом железо-марганцевого и свинцово-цинкового оруденения, при этом запасы как одних, так и других руд относятся к разряду крупных и уникальных. Пространственное распределение свинцово-цинкового и железо-марганцевого оруденения на большей части месторождений характеризуется ярусностью (чередованием в разрезе), а на месторождении Ушкатын-III отчетливо проявлен фациальный контроль одновременно отлагавшихся руд различного состава (рис. 52).

Рудные залежи имеют форму согласных с вмещающими породами линз, достигающих мощности 60-100 м в центральных частях и выклинивающихся с многократным расщеплением. Рудные линзы вытянуты в форме лент протяженностью до 3-6 км при ширине в несколько сотен метров. В вертикальном разрезе свинцово-цинковые рудные залежи представляют собой многократное чередование рудных и безрудных прослоев.

Железные руды сложены гематитом, магнетитом, яшмами, присутствуют также сидерит, железистый каль-цит и другие минералы. Марганцевые руды состоят из браунита, гаусманита, якобита, манганокальцита, олигонита; встречаются также родонит, бустамит, спессартин. Помимо этого, присутствуют многочисленные рудные минералы и в их числе Pb и Zn.

Свинцово-цинково-баритовые руды сложены баритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом; в качестве рассеянной примеси присутствуют сульфосоли Pb, Cu, Ag, бедная Co-Ni минерализация и др. Содержания полезных компонентов подвержены существенным колебаниям. В разных типах руд содержание свинца изменяется от 1,5 до 2, цинка - от 0,1 до 5-6 %; в наиболее богатых рудах содержание суммы металлов достигает 15-20 %, а местами и более. Содержание барита в свинцово-цинково-баритовых рудах составляет 60-80 %.



СТРАТИФОРМНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ В КАРБОНАТНЫХ ФОРМАЦИЯХ

В большинстве случаев Pb-Zn стратиформные месторождения связаны с карбонатными формациями, образовавшимися в подвижных зонах платформ, в эпиплатформенных рифтовых структурах, и значительно реже в складчатых областях - на срединных массивах, в миогеосинклинальных зонах, сопряженных с платформами или срединными массивами.

Для рудоносных формаций свойственно широкое развитие доломитов, в которых локализована большая часть месторождений. Рудоносные формации сложены известняками и доломитами, часто битуминозными, с прослоями черных сланцев, кремнистых пород. Реже присутствуют песчаники, конгломераты. Иногда наблюдаются линзы и прослои сульфатных эвапоритов. Фациальные особенности пород свидетельствуют о формировании их в мелко-водных прибрежно-морских, лагунных условиях с резко расчлененным рельефом. Эффузивные породы и туфы присутствуют только в формациях, приуроченных к геосинклинальным прогибам. В большей части формаций строение рудовмещающего разреза соответствует трансгрессивному ритмокомплексу. Выделяется три толщи: нижняя подрудная терригенная с базальным горизонтом в основании с размывом залегает на подстилающих породах, средняя - рудоносная известняково-доломитовая, иногда терригенно-карбонатная, верхняя - терригенная или терригенно-карбонатная, иногда со слоями гипса и ангидрита.

Рудные тела стратиформных месторождений представлены согласными пластовыми и ленто-видными залежами и размещаются в одном или нескольких стратиграфических горизонтах. Залежи отличаются большой протяженностью (от сотен метров до первых километров), шириной (до 800-1000 м) при мощности от 0,5 до 200 м (в среднем 10-20 м).

Руды сложены сфалеритом, галенитом с незначительным количеством пирита, марказита, халькопирита, барита, сульфосолей свинца. Жильные минералы представлены доломитом, кальцитом, реже присутствуют барит, кварц, флюорит.

Дискуссионным является вопрос о генезисе стратиформных месторождений. В последние годы появляется все больше фактов, свидетельствующих о пространственной связи этих месторождений с синхронным проявлением вулканизма в соседних зонах. Наиболее вероятным представляется двухэтапный процесс формирования месторождений. В ранний гидротермально-осадочный этап из гидротермальных растворов эндогенного происхождения, достигавших морского дна, в застойной обстановке локальных палеодепрессий осаждались сульфиды в виде рудных илов. Преобразование сульфидов происходило на стадии диагенеза при участии органического вещества. Второй этап - регенерации - связан с тектоническими и метаморфическими процессами перекристаллизации и перераспределения рудного вещества, а также с деятельностью артезианских палеосистем.

Типичными представителями данной группы могут быть названы месторождения России (Сардана, Барвинское), Казахстана (Миргалымсай, Ачисай, Шалкия), Узбекистана (Уч-Кулач), США (долина р.Миссури и др.), Канады (Пайн-Пойнт), Италии (Райбл), Польши (Верхняя Силезия), Ирландии (Наван) и других стран.

Месторождение Миргалымсай (Казахстан) расположено в пределах хр. Каратау. Оруденение локализовано в известняково-доломитовой формации, приуроченной к внутриконтинентальной рифтогенной структуре. Рудоносная фаменская формация представлена переслаиванием доломитов, известняков, реже мергелей. Породы сформировались в прибрежно-морских условиях на склонах палеоподнятий вблизи области денудации и сноса. Нижняя часть формации сложена терригенными породами - красноцветными песчаниками, аргиллитами, верхняя - карбонатная. Оруденение приурочено к доломитам, с повышенным содержанием органики, к области перехода

их в известняково-мергельные фации, и накапливалось в палеомульдах полузамкнутых бассейнов. Продуктивные отложения имеют мощность около 600 м. Рудные тела приурочены к так называемому второму "ленточному" горизонту доломитов и частично - к нижнему "ячеистому". Рудолокализирующие породы, мощность которых колеблется от 2-4 до 24-28 м, отличаются повышенной концентрацией углеродистого вещества. Рудные тела представлены тремя согласными пластовыми залежами - Основной, Промежуточной, Параллельной. Размеры рудных тел по простиранию достигают 2 км, по падению - 1 км. Мощность наиболее крупной Основной залежи - от 1 до 6 м.

Основные рудные минералы - барит, галенит, сфалерит, второстепенные - пирит и марказит. Изредка встречаются халькопирит, халькозин, кубанит, арсенопирит, теннантит, тетраэдрит, самородные свинец и серебро. Нерудные минералы - доломит, кальцит, в меньшей степени анкерит. Текстуры руд послойные вкрапленные, полосчатые и прожилковые. Соотношение свинца, цинка и бария составляет 1:0,1:6. В разрезе рудного горизонта содержание свинца и бария снизу вверх уменьшается соответственно от 1,17 до 0,36 и от 6,4 до 3,3 %.

Латеральная зональность определяется фациальной обстановкой рудоотложения и выражается в приуроченности максимальных концентраций барита (30-60 %) к центральной части рудной зоны, которая окаймляется рудами с повышенными содержаниями сначала свинца (до 3-4 %), затем цинка. На месторождении развита зона окисления до глубины 50 м, в которой присутствуют англезит, смитсонит, гидроцинкит, каламин, вульфенит, халькозин, ковеллин, аргентит, самородные серебро, гидрогематит, гетит и другие минералы.

Месторождения рудного района **Юго-Восточного Миссури** - один из крупнейших рудных районов США, в котором сосредоточены свинцово-цинковые месторождения, получившие известность под названием "тип Миссисипи-Миссури". Месторождения локализованы в чехле докембрийской Северо-Американской платформы, в верхне-кембрийской терригенно-карбонатной формации, обрамляющей купол Сент-Франса, являющийся частью свода Озарк. Купол сложен докембрийскими риолитами, диабазами и гранитами и в позднекембрийское время представлял собой палеоподняtie. Рудный пояс района протягивается вокруг купола почти на 150 км при ширине до 10-15 км.

Рудоносная формация состоит из трех горизонтов: нижний терригенный сложен песчаниками Ламотт мощностью 135 м, средний карбонатный рудоносный - доломитами Бонн-Терр мощностью 120 м, верхний - глинистыми сланцами Дейвис мощностью 50 м. Выше в разрезе выделяется несколько пачек доломитов позднекембрийского и ордовикского возраста.

Оруденение локализовано в основном в верхней части песчаников Ламотт и по всей мощности доломитовой пачки Бонн-Терр. Она сложена темноцветными доломитами с повышенным содержанием органического вещества и тонкими прослоями черных сланцев, рифогенными доломитами и водорослевыми рифами. Рудовмещающие породы относятся к прибрежно-морским и лагунным фациям, они сформировались на склонах палеоподнятий с резко расчлененным рельефом с базальтоидными барами и рифами.

Баровые рифы являются главными концентраторами оруденения, при удалении от них доломиты сменяются безрудными известняками. Рифы представляют собой крупные сложные гребни, протягивающиеся на расстояние до 5 км при ширине в 300 м и вертикальном размахе оруденения до 60 м. Оруденение локализуется также в водорослевых рифах.

Рудные тела сложены в основном крапленными рудами. Отмечаются и прожилковые руды. Основной рудный минерал - галенит, сфалерит также образует значительные концентрации. Второстепенные минералы - халькопирит, зинкит (сульфид никеля и кобальта), пирит, марказит и др. Среди нерудных основная роль

принадлежит доломиту вмещающих пород, реже присутствуют кальцит, диксит, кварц. Текстуры руд послойные вкрапленные, прожилковые, брекчие-видные, реже массивные и друзовые.

В длительном периоде формирования месторождений после сингенетического этапа накопления рудного вещества важную роль играли последующие эпигенетические этапы, которые и определили современный облик этих объектов, в частности элементы контроля рудных тел разрывными нарушениями, и другие особенности.

Месторождения района считаются в основном свинцоворудными. В целом по району содержание Pb составляет 5,8, Zn - 1 %. Общие запасы оцениваются в 6,7 млн т Pb и 1,5 - Zn. Из руд также извлекают Cu, Cd, Ag, Co, Ni.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Основная масса промышленных концентраций свинца и цинка так или иначе связана с процессами вулканизма. При этом в подавляющем большинстве случаев источниками металлов служили магматические очаги, возникающие в процессе дифференциации базальтовой магмы. Цинк, и в особенности свинец, в отличие от меди обнаруживают отчетливую связь с наиболее кислыми дифференциатами. Одним из условий возникновения магматических очагов, специализированных на цинк и свинец, является наличие достаточно развитой сиалической коры, что подтверждается отчетливо проявленной корреляцией между относительным количеством свинца в рудах и мощностью коры, на которой развиваются рудоносные формации.

С интрузивным магматизмом кислого и умеренно кислого состава связано относительно небольшое количество скарновых и плутоногенных гидротермальных месторождений.

На ранних стадиях геосинклинального развития полиметаллические колчеданные месторождения образуются в островодужных формациях палеовулканических зон, заложенных на коре сиалического типа. В более поздние этапы, а также при активизации платформ и складчатых областей в пределах внутриконтинентальных рифтовых зон создаются наиболее благоприятные условия и обстановки для формирования многочисленных крупных месторождений Pb и Zn, связанных с вулканогенно-терригенными и карбонатными формациями. В породах андезитриолитовых формаций вулканических поясов формируются вулканогенные гидротермальные и связанные с вулканизмом скарновые месторождения. В этих условиях образуются также скарновые месторождения в экзоконтактовых зонах гранитоидных интрузий и плутоногенные гидротермальные месторождения.

Свинцово-цинковые месторождения формировались от раннего протерозоя до кайнозоя включительно. Крупных планетарных эпох накопления свинца и цинка в истории развития земной коры не отмечается, а эволюция генетических типов проявлена достаточно отчетливо и выражается в следующем. Протерозойская эпоха характеризовалась почти исключительно колчеданно-полиметаллическим оруденением, кстати, она была и наиболее продуктивной на свинец и цинк (37 % запасов). В последующем роль колчеданно-полиметаллических месторождений заметно уменьшилась до совершенно несущественной в альпийскую эпоху. Стратиформные месторождения формировались в течение всей геологической истории, но максимум запасов приходится на каледонскую эпоху. Свинцово-цинковые жильные и скарновые месторождения относятся к числу более молодых; в эпоху протерозоя они неизвестны, но, начиная с каледонской, их количество резко возрастает, достигая максимума в альпийскую эпоху.

ВОЛЬФРАМ

Открыт в виде соединения WO_3 в 1781 г., впервые выделен в 1801 г., а промышленное использование его для легирования сталей началось с конца XIX в. Присадка вольфрама к стали (от 1 до 20 %) повышает ее твердость, прочность, тугоплавкость. Поэтому он применяется в производстве специальных сталей - быстрорежущих, инструментальных, штамповых, магнитных, а также в изготовлении брони, оружия и снарядов. Вольфрам в сочетании с хромом, никелем, кобальтом используется для изготовления жаропрочных и сверхтвердых сплавов - победитов, карбидов, боридов. Помимо этого, вольфрам в чистом виде или в безуглеродистых сплавах используется при изготовлении нитей накаливания, радиоламп и т.д. Около 70 % производимого вольфрама используется в форме карбида вольфрама для изготовления сверхтвердых сплавов, 20-23 - для производства спецсталей, 10-17 - в электротехнической и электронной отраслях промышленности, а также в химическом производстве

Общие запасы вольфрама в 40 странах мира (без России) оцениваются в 6,8 млн т, разведанные запасы составляют 3,6 млн т. Ежегодное производство вольфрамовых концентратов в конце XX века снизилось до 18 тыс. т. Наиболее крупные запасы находятся в Китае, Казахстане, Канаде, США, Боливии, Южной Корее и Великобритании. Россия занимает третье место по запасам вольфрама. Уникальные коренные месторождения содержат запасы более 250 тыс. т WO_3 , крупные - 250-100, средние - 100-15, мелкие - менее 15 тыс. т. Богатые руды содержат более 1 % WO_3 , рядовые - 1-0,3, бедные - 0,3-0,1, убогие - менее 0,1 %. В россыпях содержание WO_3 должно быть не ниже 300-200 г/м³. Основными производителями вольфрамовых концентратов являются Южная Корея (19 %), Португалия (16), Австрия (10), Австралия (9), Бирма, Бразилия и Боливия.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк вольфрама $1,3 \cdot 10^{-4} \%$, колебания его в магматических породах незначительны: в ультраосновных он снижается до $1 \cdot 10^{-5}$, в кислых повышается - $1,5 \cdot 10^{-4}$. Эндогенные концентрации вольфрама связаны с коровыми гранитными магмами, характеризующимися перенасыщенностью глиноземом, высокой кислотностью, повышенными содержаниями олова, фтора, бора. Вольфрам легко образует летучие соединения с фтором, хлором, бором, накапливается в продуктах остаточной кристаллизации и выносится газогидротермальными умеренно кислыми растворами. Устойчивость минералов вольфрама в экзогенных условиях определяет возможность формирования россыпных месторождений. Накопление вольфрама фиксируется и в осадочном процессе. Повышенные концентрации его отмечаются в континентальных отложениях - каменных углях и рапе соляных озер, в морских терригенных, иногда карбонатных отложениях, обогащенных железом, марганцем и углистым веществом. Регенерация первично-осадочной рассеянной минерализации при метаморфизме обуславливает возникновение стратиформных руд.

Основное промышленное значение среди минералов вольфрама имеют вольфрамит $(Mn, Fe)WO_4$ (76,5 % WO_3), ферберит $FeWO_4$ (76,3), губнерит $MnWO_4$ (7,6) и шеелит $CaWO_4$ (80,6). На вольфрамит и губнерит приходится 75 % мировой добычи, на шеелит - около 25.

Благодаря устойчивости вольфрамовых минералов зона окисления на месторождениях обычно выражена нечетко и характеризуется присутствием тунгстита H_2WO_4 или ферритунгстита $Fe_2WO_4(OH)_4 \cdot 4H_2O$, не извлекающимися при обогащении руд. Сопутствующие компоненты в рудах вольфрамовых месторождений - олово, молибден, висмут, медь, золото, серебро, цинк, свинец, мышьяк, сурьма и др.

Руды коренных месторождений подразделяются на два типа: кварц-вольфрамитовые и скарновые шеелитовые. Первые состоят из кварца (содержание которого иногда достигает 95 %) и вольфрамита, кроме того, содержат касситерит, шеелит, берилл, молибденит, халькопирит. Из нерудных минералов обычными являются полевые шпаты, слюды, топаз, флюорит, халцедон. Руды легко обогатимы, содержание WO_3 - 1-2 %.

Скарновые шеелитовые руды содержат помимо шеелита молибденит, сульфиды, нерудные минералы представлены гранатом, пироксеном, волластонитом, диопсидом, везувианом, скаполитом. В промышленных количествах присутствуют примеси висмута, золота, меди, реже бериллия. Наряду с легко обогатимыми встречаются сложные для обогащения мелкокрапленные и комплексные руды, они содержат 0,3-1,5 % WO_3 , 0,1-0,2 % Mo. Вольфрамовые руды обогащаются мокрой гравитацией (извлечение в зависимости от крупности зерен 62-85 %), шеелитовые - флотационным способом (85-90) или гравитационно-флотационным методом. Товарные концентраты содержат 55-70 % WO_3 . В них лимитируется содержание фосфора, серы, мышьяка, олова, меди.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Среди промышленных месторождений вольфрама выделяются следующие типы: скарновый, грейзеновый, гидротермальный плутоногенный, гидротермальный вулcano-генный, стратиформный, россыпной.

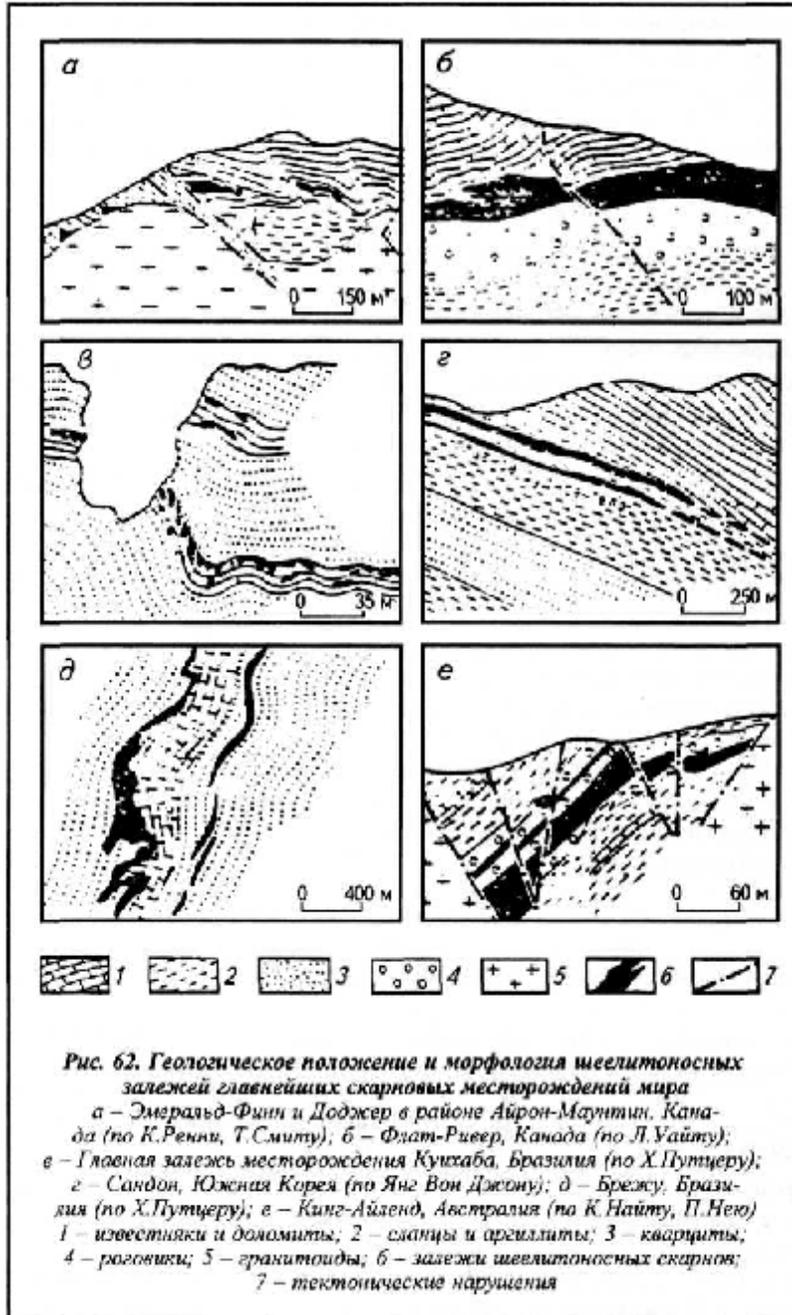
СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Эти месторождения вольфрама связаны с умеренно кислыми гранитоидными формациями поздних стадий геосинклинального развития. Наиболее благоприятными вмещающими породами являются терригенно-карбонатные отложения. Возраст месторождений преимущественно позднепалеозойский и мезозойский. Рудные тела приурочены к известковым скарнам, развивающимся вдоль интрузивных контактов, проникающим на значительные расстояния в слоистые толщи осадочных пород, реже локализованным среди гранитоидов. В зависимости от характера контакта интрузива с вмещающими породами, направления слоистости в них, развития складчатых и разрывных деформаций рудные тела имеют форму пластообразных залежей, линз, гнезд и т.д. Протяженность рудных тел измеряется сотнями метров, иногда достигает первых километров, по падению они прослеживаются на несколько десятков, иногда сотен метров при мощности от 1-2 до 50 м (рис. 62).

Рудная минерализация локализована внутри зон скарнирования в пироксеновых и гранат-пироксеновых скарнах. Руды скарновых месторождений характеризуются комплексным составом, среди них выделяются олово-вольфрамовый, молибден-вольфрамовый и полиметаллически-вольфрамовый типы. Кроме вольфрама, олова и молибдена в рудах в промышленных количествах содержатся бериллий, золото, медь. Главные рудные минералы - шеелит, молибденит, молибдошеелит, касситерит, в меньших количествах присутствуют магнетит, пирит, пирротин, висмутин, вольфрамит, халькопирит, сфалерит, галенит. Из нерудных наибольшим распространением пользуются гранат, пироксен, плагиоклаз, кварц, а также эпидот, хлорит, карбонаты.

В процессе формирования руд проявлена закономерная смена последовательно возникающих минеральных ассоциаций: ранние высокотемпературные (600-210 °С) скарновые пироксен-гранатовые ассоциации с шеелитом сменяются кварц-сульфидными (450-110 °С), также содержащими поздний шеелит и затем поздними низкотемпературными (130-80 °С) безрудными кварц-кальцитовыми ассоциациями.

Скарновые шеелитовые месторождения имеют важное промышленное значение, в них сосредоточено около 25,6 % запасов вольфрама, добыча составляет почти 32 %. Наиболее известные скарновые месторождения вольфрама находятся в Приморье (Восток-II), на Кавказе (Тырныауз), в Средней Азии (Лянгар, Ингичке, Чорух-Дайрон), Китае (Хуанподи, Илю), Канаде (Маггунг, Эмеральд-Фини), США (Милл-Сити, Пайн-Крик).



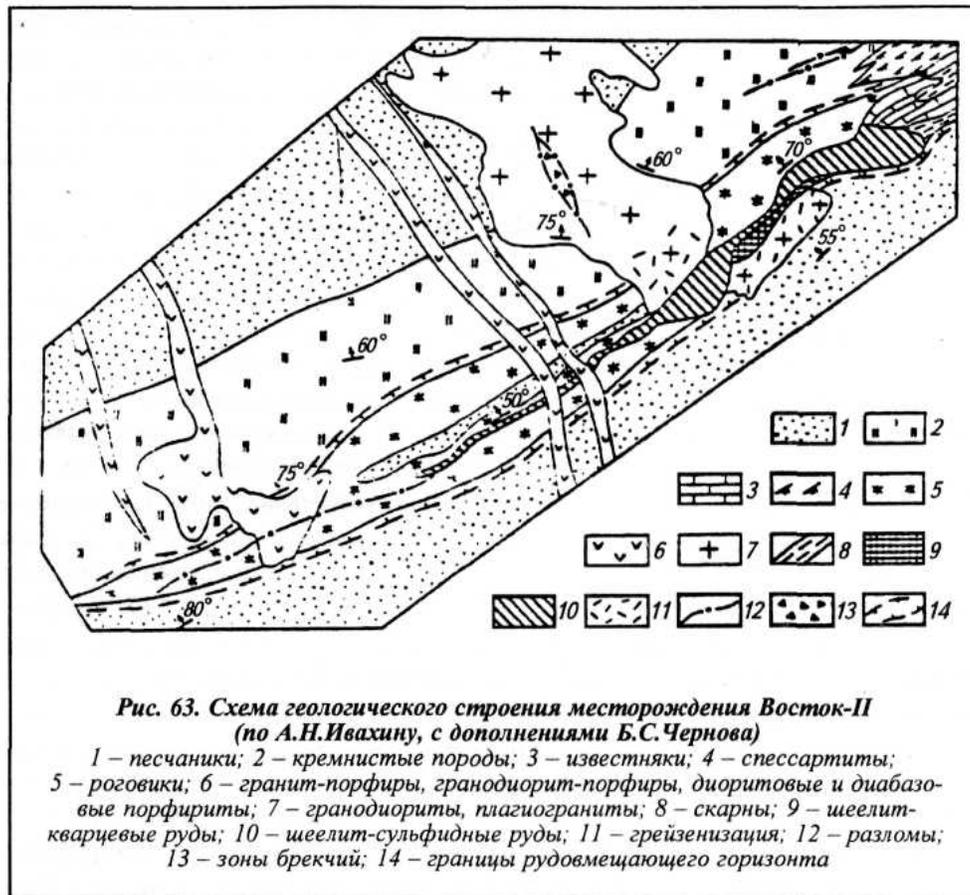
Месторождение Восток-II находится в Северном Приморье. Рудное поле сложено верх-непермско-верх-нетриасовыми толщами алевролитов и песчаников с горизонтами известняков и основных эффузивов, смятыми в складки и прорванными небольшими массивами гранитоидов и многочисленными дайками.

Месторождение приурочено к штоку гранит-порфиров, прорывающему северо-западное крыло синклинальной складки. Вмещающие породы имеют северо-восточное простирание и крутое (50-88°) падение на северо-запад. Они представлены

песчаниками, кварцитами, роговиками, мергелистыми известняками. Главное рудное тело и сопровождающие его субпараллельные тела имеют пластовую форму и располагаются согласно с вмещающими породами (рис. 63). Рудная залежь прослеживается по простиранию более чем на 600 м. В главном рудном теле выделяются два типа руд - шеелит-кварцевые и шеелит-сульфидные. Основную роль играют шеелит-сульфидные руды, представленные шеелит-пирротиновым и шеелит-пирротин-скарновым подтипами.

Шеелит-кварцевые руды имеют небольшое распространение, но отличаются высоким содержанием W. Шеелит-сульфидные руды на 70-80 % сложены пирротинном, помимо которого в них встречаются арсенопирит, халькопирит, висмутин, сфалерит, самородный висмут, золото, серебро, вольфрамит, станнин; нерудные минералы представлены пироксенами, актинолитом, апатитом, кварцем. Основной рудный минерал - шеелит. Руды скарнового типа, характеризующиеся повышенными содержаниями пироксена и актинолита, составляют не более 8 % от общего объема руд и заключают в себе не более 5 % запасов вольфрама. Рудам свойственна массивная текстура, реже встречаются брекчиевые, прожилковые и полосчатые руды.

Длительный процесс формирования месторождения начался по-видимому с образования скарнов, с которыми шеелитовое оруденение не связано, затем была отложена основная масса кварц-шеелитовых руд, когда получили широкое развитие процессы грейзенизации. Сульфидные руды представляют собой более поздние образования, поскольку отчетливо накладываются на скарны и кварц-шеелитовые руды. Завершился рудный процесс развитием кварц-кальцитовой минерализации.



Грейзеновые месторождения вольфрама по обстановкам формирования, условиям локализации подобны соответствующим месторождениям олова и молибдена, с которыми они образуют единый эволюционный ряд. Они генетически связаны с кислыми и ультракислыми лейкократовыми гранитами, обогащенными летучими компонентами, F, В, иногда К и редкими щелочами. Рудоносные интрузивные породы относятся к поздним этапам формирования многофазных плутонов, типичных для этапов орогенной и послеорогенной активизации. Главные эпохи формирования месторождений - позднегерцинская и альпийская). Оруденение приурочено к выступам, куполам и гребням лейкогранитов и может быть локализовано как в самих куполах, проникая в них на 300-500 м, так и в ороговикованных породах кровли на расстоянии до 1200-1500 м от контакта с гранитами. Рудные тела имеют форму штоков, штокверков, реже жил или жильных зон. Последние прослеживаются по простиранию на десятки и сотни метров и до 300-500 м на глубину при мощности 0,3-0,5, реже до 1 м. Диапазон оруденения обычно составляет 300-500 м. Вмещающие оруденение породы грейзенизированы, наибольшим развитием пользуются кварц-топазовые, кварц-слюдистые, кварцевые грейзены.

В большинстве случаев месторождения имеют комплексный состав руд - олово-вольфрамовый, молибден-вольфрамовый. Главные минералы руд - вольфрамит, касситерит, молибденит. В различных типах в переменных количествах присутствуют магнетит, пирит, пирротин, арсенопирит, шеелит, висмутин, халькозин, сфалерит, галенит. Жильные минералы представлены кварцем, слюдами, плагиоклазом, микроклином, турмалином, топазом, флюоритом. Помимо олова и молибдена попутными компонентами руд, имеющими промышленное значение, являются висмут, ниобий, тантал, бериллий, золото.

Эволюция процессов рудообразования на грейзеновых месторождениях вольфрама выражена в формировании ранних грейзеновых ассоциаций с W, Mo, Sn, смене их сначала кварцево-вольфрамовой минерализацией, затем сульфидной и в завершение послерудной кварцево-карбонатной. Температурный интервал рудоотложения оценивается в 540-300 °С.

Стандартная схема зональности грейзеновых месторождений определяется уменьшением с глубиной содержания вольфрама и молибдена, увеличением олова, а также возрастанием роли кварцево-слюдистых ассоциаций по сравнению с топазовыми.

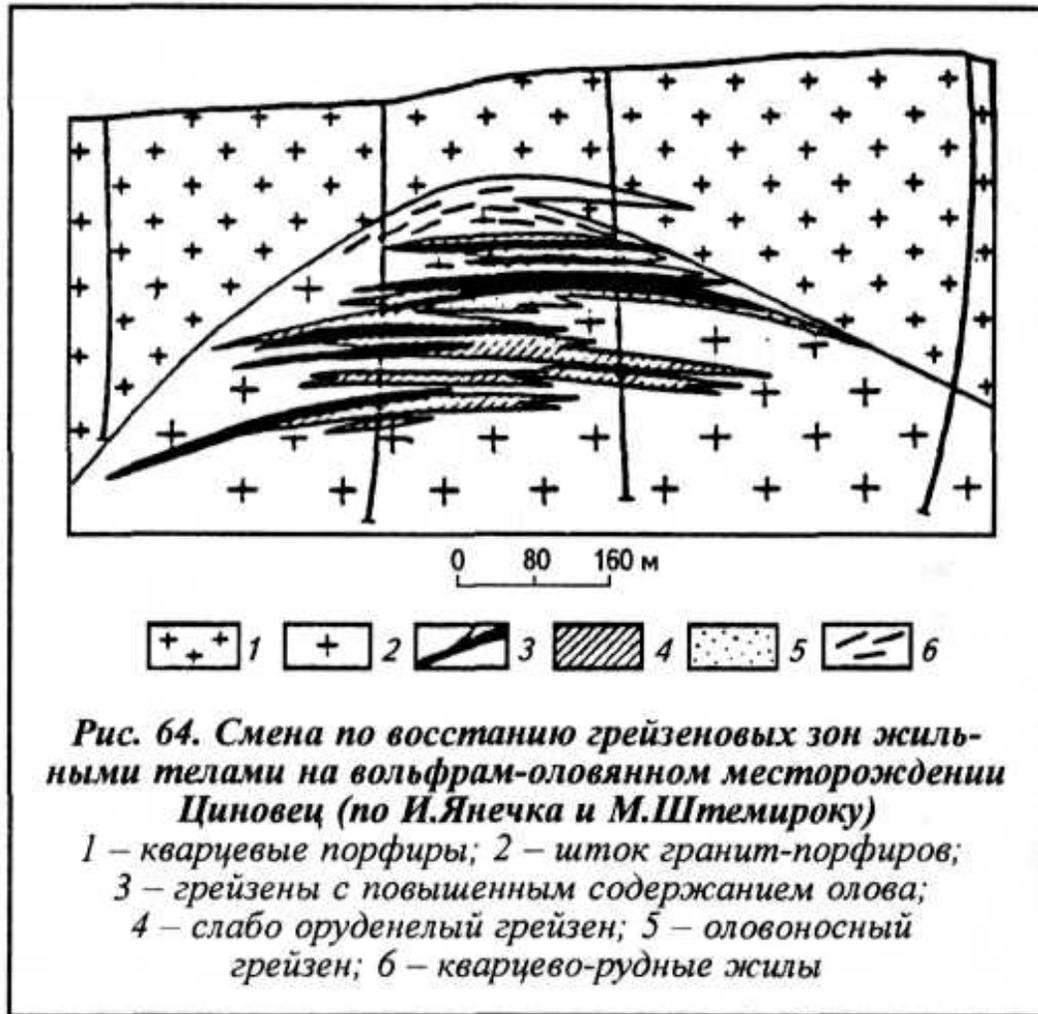
Грейзеновые месторождения играют существенную роль в балансе запасов вольфрама (до 60 %), но обеспечивают всего 6 % добычи. К числу наиболее известных районов их локализации относятся Забайкалье (Спокойнинское), Казахстан (Акчатау, Кара-Оба), Рудные горы Чехии и Германии (Циновец, Крупка и др.), Монголия (Югодзыр), Китай (Синь-Хуаншань), Австралия (Вольфрам Кемп).

Месторождение Циновец (Циннвальд) расположено на границе Чехии и Германии. По геологической обстановке месторождение подобно расположенному в 20 км к югу месторождению Альтенберг и достаточно типично для Рудных гор. Месторождение приурочено к небольшому гранитному штоку (1,45x0,3 км), являющемуся выступом Рудногорского плутона. Шток сложен средне-зернистыми гранитами и гранит-порфирами, вмещающими породами являются теплицкие кварцевые порфиры пермского возраста. На контакте гранитов и кварцевых порфиров наблюдается пегматоидная зона (шток-шайдер) мощностью до 1-1,5 м. Все разновидности гранитоидов, слагающих шток, подверглись интенсивному изменению, особенно в купольной части - они грейзенизированы, в них развиты калишпатизация, флюоритизация, карбонатизация и другие преобразования.

Промышленное оловянно-вольфрамовое оруденение представлено двумя типами рудных тел: кварц-циннвальдитовыми жилами с касситеритом и вольфрамитом и мощными телами грейзенов. С обоими типами ассоциирует литиевая минерализация.

Жилы приурочены к самой верхней части купола, характеризуются пологим залеганием, ориентированы почти параллельно контакту гранитоидов, мощность их составляет 0,3-0,5 м (рис. 64). В западной части месторождения известны и крутопадающие жилы. Как в тех, так и в других содержания олова и вольфрама заметно снижаются с глубиной. В верхних горизонтах жильных свит вольфрамит преобладает над касситеритом. Грейзеновые тела располагаются на 50-80 м ниже свиты пологозалегающих жил, представляют собой также преимущественно пологие, параллельные верхней границе штока тела. Мощность их изменяется от долей метра до первых десятков метров, протяженность на глубину до сотен метров. Грейзеновые тела содержат большую часть запасов месторождения. Среди грейзенов выделяются мономинеральные - кварцевые, циннвальдитовые и топазовые, обычно не несущие промышленных скоплений олова и вольфрама, и комплексные - кварц-циннвальдитовые, топаз-циннвальдитовые, кварц-топазовые, кварц-циннвальдит-серицитовые. Промышленное оруденение локализовано главным образом в кварц-циннвальдитовых грейзенах и частично в грейзенизированных и альбитизированных гранитах. Распределение оруденения весьма неравномерное. Помимо касситерита и вольфрамита в рудах в подчиненном количестве присутствует шеелит, незначительно развиты арсенопирит, халькопирит, станнин, сфалерит, галенит, висмутин, пирит, из жильных минералов - кварц, циннвальдит, топаз, альбит, флюорит, калиевый полевой шпат, серицит, диксит и каолинит.

Общий размах оруденения составляет около 500 м. Соотношение между оловом и вольфрамом изменяется от 1:1 - 2:1 на поверхности до 4:1 - 5:1 на глубине 200-500 м, при этом содержание олова с глубиной практически не изменяется. Считается, что процесс формирования месторождения был длительным и многостадийным.



ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПЛУТОНОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

По составу руд, условиям локализации тесно связаны с грейзеновыми месторождениями. В отличие от последних они располагаются на большем удалении от куполовидных выступов рудоносных интрузивов. Нередко грейзеновое и собственно гидротермальное плутогенное оруденения совмещаются в одном месторождении, будучи связанными постепенными переходами, поэтому они могут рассматриваться как продукты одного процесса, проявившегося в различных фациальных условиях.

Рудные тела представлены штокверковыми зонами, чаще жилами, жильными сериями. Протяженность жил составляет десятки и сотни метров, а их свиты прослеживаются на несколько километров. Средняя мощность - 0,5-1 м, глубина по падению - 300-500, иногда до 800 м. Размеры штокверков в поперечнике - от 400-500 до 1000 м. Руды характеризуются комплексным составом, среди них выделяются кварц-вольфрамитовые, кварц-гюбнеритовые, касситерит-вольфрамитовые, кварц-шеелитовые, кварц-сульфидно-вольфрамит-гюбнеритовые.

Главные минералы руд - вольфрамит, касситерит, шеелит, молибденит, висмутин, в меньшем количестве - пирротин, пирит, арсенопирит, халькопирит, сфалерит, галенит. Жилы и прожилки сложены в основном кварцем, которому сопутствуют турмалин, плагиоклаз, мусковит, микроклин, топаз, флюорит, апатит, карбонаты. Вмещающие породы грейзенизированы, в них развиты участки турмалинизации, окварцевания, березитизации. Минералообразование развивается в интервале

температур 380-100 °С и характеризуется закономерной сменой кварц-вольфрамитовых ассоциаций сульфидной, кварц-флюоритовой и послерудной карбонатной. Этот ряд характеризует и зональность месторождений как вертикальную, так и горизонтальную концентрическую, свойственную штокверкам.

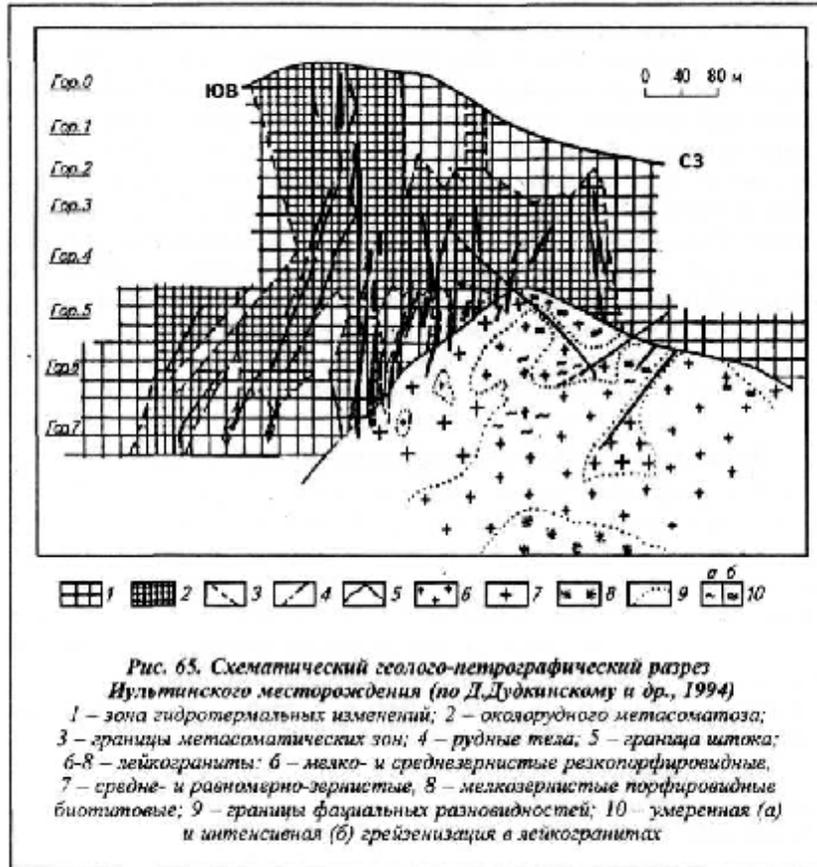
Плутоногенные месторождения пользуются широким распространением, по масштабам они относятся к средним и крупным. В жильных месторождениях находится около 15 % разведанных запасов, что обеспечивает более 50 % добычи вольфрама. Наиболее известные месторождения находятся на Чукотке (Иульгин), в Забайкалье (Холтосон, Бом-Горхон, Букука), Казахстане (Богуты), Португалии (Панаскуэйра), Великобритании (Корнуол), Франции (Бель-фор), Канаде (Ред-Роуз), Австралии (Хабертон) и других странах.

Месторождение Иульгин находится на Чукотке, в пределах Экеотапской горной гряды. Основным структурным элементом района является Иульгинская антиклинальная складка. Район месторождения сложен осадочно-метаморфическими и терригенными комплексами среднего палеозоя-мезозоя, прорванными разновозрастными интрузивными образованиями основного и кислого состава. В основании разреза залегают кристаллические сланцы и мраморизованные известняки осадочно-метаморфической толщи нижнего карбона. На них несогласно залегают верхнепермские, а затем триасовые песчано-сланцевые отложения. В восточной части района расположен раннемеловой Прово-Иульгинский массив гранодиоритов и сопровождающая его жильная серия. В западной части среди осадочных образований эрозией вскрыты отдельные части позднемелового рудоносного Иульгинского гранитного массива. Последний сложен равномерно-зернистыми биотитовыми гранитами в центральной части и порфиристо-видными биотитовыми плагиогранитами в периферической зоне. В пределах месторождения кровля массива находится на глубине 300-370 м от поверхности. Месторождение расположено на северном крыле Иульгинской складки, которое имеет северозападное простирание, дугообразную в плане форму, осложнено более мелкой складчатостью и разрывными нарушениями - взбросами и сбросами.

В надкупольной зоне массива среди ороговикованных песчаников, сланцев и конгломератов верхнепермского возраста развиты рудные жилы, сложенные кварцем, мусковитом с присутствием в небольших количествах топаза, альбита, флюорита и других минералов. Протяженность отдельных жил по простиранию не превышает 100-150 м, по падению - 50-70 м, мощность их составляет 0,3-1 м (рис. 65). В качестве рудных тел выделяются группы сближенных кулисообразно расположенных жил.

Протяженность таких тел (на месторождении выявлено более 100) достигает 1250 м, по падению они прослеживаются от десятков до 330 м.

Из рудных минералов в жилах содержатся вольфрамит и касситерит, имеющие промышленное значение, в небольших количествах встречаются халькопирит, пирит, пирротин, редко шеелит. Присутствует в рудах арсенопирит. Все промышленное оруденение локализовано в терригенных породах кровли массива; рудные жилы, попадая в граниты, быстро уменьшаются в мощности и становятся непромышленными. Между оловом и вольфрамом наблюдается обратная корреляция, причем олово тяготеет к кровле гранитного массива. Околожилные изменения вмещающих пород развиты слабо.



Холтосонское жильное вольфрамовое месторождение находится в Бурятии, в отрогах Джидинского хребта. Вместе с группой рудных вольфрамитовых (Инкурское), молибденовых (Первомайское), россыпных вольфрамовых месторождений оно расположено в пределах Джидинского рудного поля. Последнее приурочено к области тектоно-магматической активизации палеозойских комплексов Забайкалья и тяготеет к зоне сопряжения двух глубинных разломов, рассекающих мощную толщу нижнекембрийских отложений. Относящиеся к ней измененные плагиоклазовые и щелочные порфириты, их туфы, метаморфические сланцы, туфопесчаники и известняки развиты в восточной части рудного поля, а западная сложена разнообразными изверженными породами, Молибденовое и вольфрамовое оруденения Джидинского рудного поля связаны с массивом гранит-порфиров, их возраст около 140 млн лет.

Кварц-сульфидно-гюбнеритовые жилы Холтосонского месторождения расположены в основном в кварцевых диоритах; отдельные жилы встречаются и в метаморфических сланцах и в первомайских гранит-порфирах. Основные рудные жилы в полосе протяженностью около 2,5 км локализованы в зоне разлома северо-западного направления, будучи приуроченными к многочисленным нарушениям сбросо-сдвигового характера, трещинам скола и отрыва.

На месторождении известно 140 жил, половина их которых имеет промышленное значение.

Большая часть жил относится к сколовому типу, имеет субширотное простирание и падение к югу под углами от 30-50 до 55-85°. Протяженность жил по падению в среднем в 2 раза превышает их длину по простиранию. Жилы характеризуются сложной морфологией: при средней мощности 0,8 м встречаются раздувы до 2 и даже 12 м. Отчасти это объясняется тем, что отложение рудного вещества происходило не

только в открытых полостях, но и путем метасоматического замещения боковых пород, хотя и в меньших масштабах (рис. 6б).

Наиболее богатое оруденение наблюдается до глубины 200 м от поверхности, далее содержание вольфрама снижается в среднем в 1,5 раза.

Гидротермальный рудный процесс проявился в последовательном формировании жил и прожилков различного состава. Наиболее ранними являются редкие полевошпатовые жилы пегматоидного типа. Затем, вероятно, были образованы довольно редкие кварцевые жилы с флюоритом и мелкие прожилки, в которых в небольших количествах присутствует гюбнерит. И лишь после этих проявлений следует формирование промышленных кварц-сульфидно-гюбнеритовых жил, в которых, помимо главного жильного минерала кварца, присутствуют мик-роклин, жильбертит, серицит, флюорит, реже анкерит. Рудные минералы представлены гюбнеритом, пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, шеелитом, тетраэдритом, айкинитом.

Более поздние рудные жилы характеризуются наличием родохрозита, повышенным содержанием сульфидов и флюорита. Они сложены гребенчатым кварцем, полевым шпатом, родохрозитом, флюоритом, серицитом. Рудные минералы - гюбнерит, галенит, пирит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит, редкие - шеелит, айкинит, гематит, халькозин. Завершается гидротермальный процесс образованием жил роговикового кварца, в которых присутствуют также флюорит, гюбнерит, пирит, халькопирит, серицит.

Вмещающие породы вблизи рудных жил подвержены грейзенизации, березитизации, серицитизации; иногда образуются серицит-кварцевые, жильбертит-флюоритовые породы. Мощность зон околорудных изменений не превышает 0,5 м.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ВУЛКАНОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Вольфрамовые месторождения, которые могут быть отнесены к вулканогенным гидротермальным, немногочисленны. Это месторождения, характеризующиеся комплексным составом руд (Sn-W-Bi, Sn-Ag-W и др.), в которых вольфрам обычно имеет подчиненное значение.

Месторождения располагаются в областях современного и молодого вулканизма и обнаруживают связь с вулканогенными формациями андезит-дацит-риолитового состава повышенной щелочности. Рудоносными структурами служат вулканические купола, экструзивные образования, жерловые зоны. Рудные тела представлены штокверками и жильными зонами, иногда согласными линзовидными залежами. Наиболее существенными по масштабам являются месторождения боливийского типа, более подробно охарактеризованные в лекции "Олово". Помимо этого известны месторождения (киноварь)-антимонит-шеелит-ферберитовой, серебро-золото-шеелитовой и псиломелан-тунгомелановой формаций, которые как вольфрамовые объекты существенного значения не имеют.

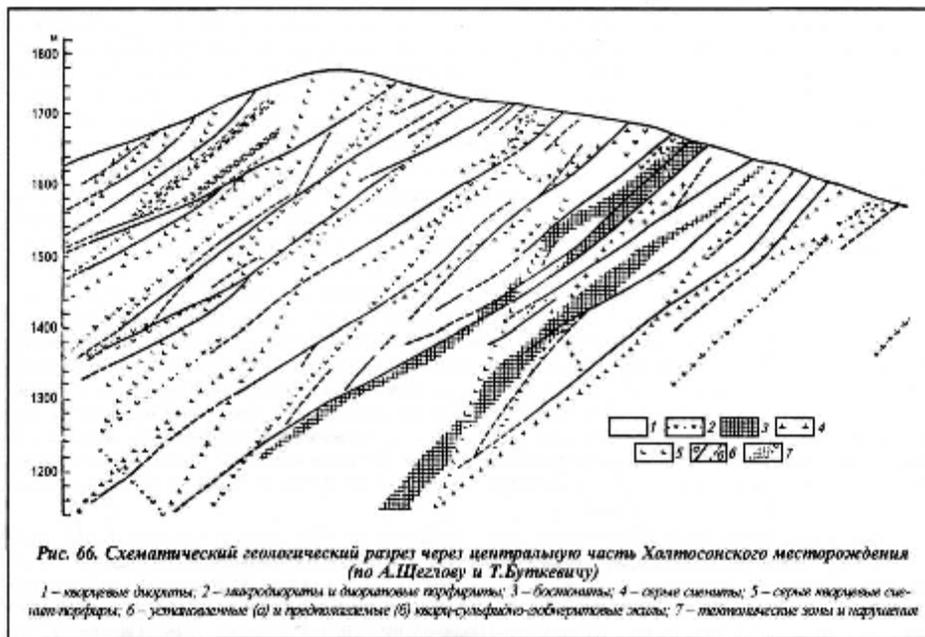
Вольфрамовые месторождения, которые могут быть отнесены к вулканогенным гидротермальным, немногочисленны. Это месторождения, характеризующиеся комплексным составом руд (Sn-W-Bi, Sn-Ag-W и др.), в которых вольфрам обычно имеет подчиненное значение.

Месторождения располагаются в областях современного и молодого вулканизма и обнаруживают связь с вулканогенными формациями андезит-дацит-риолитового состава повышенной щелочности. Рудоносными структурами служат вулканические купола, экструзивные образования, жерловые зоны. Рудные тела представлены штокверками и жильными зонами, иногда согласными линзовидными залежами. Наиболее существенными по масштабам являются месторождения боливийского типа, более подробно охарактеризованные в лекции "Олово". Помимо этого известны

месторождения (киноварь)-антимонит-шеелит-ферберитовой, серебро-золото-шеелитовой и псиломелан-тунгомелановой формаций, которые как вольфрамовые объекты существенного значения не имеют.

СТРАТИФОРМНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геолого-промышленный тип стратиформных месторождений вольфрама выделен сравнительно недавно - с 70-х годов, в связи с обнаружением объектов, не имеющих связи с гранитоидными магматическими формациями. Помимо вновь открываемых рудных объектов к стратиформным были отнесены месторождения, ранее традиционно считавшиеся скарновыми или плутоногенными гидротермальными, в которых по мере их освоения были обнаружены доказательства принадлежности руд к стратиформному типу. Выделяют собственно вольфрамовые и комплексные W-редкометальные месторождения. Генетические особенности позволяют разделить их на метаморфогенную, осадочно-вулканогенную и осадочную группы.



Метаморфогенная группа представлена редкометально-сульфидно-скарноидным типом месторождений, связанных с кремнисто-карбонатно-терригенными формациями, претерпевшими метаморфические преобразования различной интенсивности (Сангдонг, Южная Корея; Кинг-Айленд, Австралия).

Осадочно-вулканогенная группа включает три типа. Редкометально-сульфидно-кварцитовый тип связан с вулканогенно-кремнисто-терригенными формациями (Барун-Шивея, Россия; Фелбертол, Австрия), редкометально-кремнисто-карбонатный - с карбонатно-черносланцевыми формациями (Олимпиадинская, Россия; Клейнертал, Австрия), редкометально-окисдно-марганцево-кварцевый - приурочен к вулканогенно-кремнисто-карбонатно-терригенным формациям (Голконда, США).

Большинство типов рудовмещающих формаций развивается в различной геолого-структурной обстановке - в геосинклинальных и орогенных складчатых поясах, на щитах и срединных массивах. В составе рудовмещающих комплексов постоянно присутствуют вулканы основного состава, нередко контрастные базальт-риолитовые серии с редуцированной кислой составляющей. Месторождениям этой группы свойственен широкий спектр основных и сопутствующих редких элементов - вольфрам, олово, молибден, бериллий, висмут, сурьма, ртуть, золото, серебро, медь,

свинец, цинк. Большая часть этих элементов нередко образует самостоятельные месторождения, в том числе стратиформные.

В осадочной группе выделяются коры выветривания, рассолы и эвапориты (оз. Серлз, США), угли в молассовых формациях (например, Ангренское месторождение). В эту группу входят месторождения, являющиеся основными для ряда редких элементов (лития, германия и др.), поэтому они рассмотрены в лекции "Редкие элементы".

Месторождение Барун-Шивея находится в Восточном Забайкалье в северо-западной части олово-вольфрамового пояса в пределах Агинского палеозойского поля. В районе развиты осадочные и осадочно-метаморфические породы раннего рифея - палеозоя. Рудоносная онотская свита предположительно позднерифейско-кембрийского возраста сложена полимиктовыми песчаниками, филлитами, углеродсодержащими серицит-хлоритовыми сланцами, кварцитами с резко подчиненными прослоями известняков и вулканогенных пород. Продуктивный горизонт представляет собой груборитмичное чередование кварцитов и кварц-слюдисто-графитовых сланцев и прослежен по простиранию на 5,5 км. Все породы горизонта характеризуются повышенными концентрациями органического вещества ($C_{org} = 2-3\%$) и вольфрама. Рудные тела выделяются по данным опробования и приурочены в основном к прослоям кварцитов. Общая протяженность зоны минерализации достигает 1700 м, на глубину оруденение прослежено до 200 м.

Главные рудные минералы месторождения - ферберит, антимонит и киноварь, в малых количествах присутствуют пирит, халькопирит, сфалерит, арсенопирит и сидерит. На месторождении развито три типа руд: прожилково-вкрапленные, полосчатые и брекчиевые. Прожилково-вкрапленные руды представлены тонкодисперсной вкрапленностью ферберита и мало-мощными кварц-ферберитовыми прожилками в кварцитах. В полосчатых рудах наблюдается послойная вкрапленность в кварцитах ферберита, киновари, антимонита, арсенопирита. Брекчиевые, наиболее богатые руды приурочены к линзовидным блокам интенсивно раздробленных пород и представляют собой обломки кварцитов с рудной вкрапленностью, сцементированные ферберитом

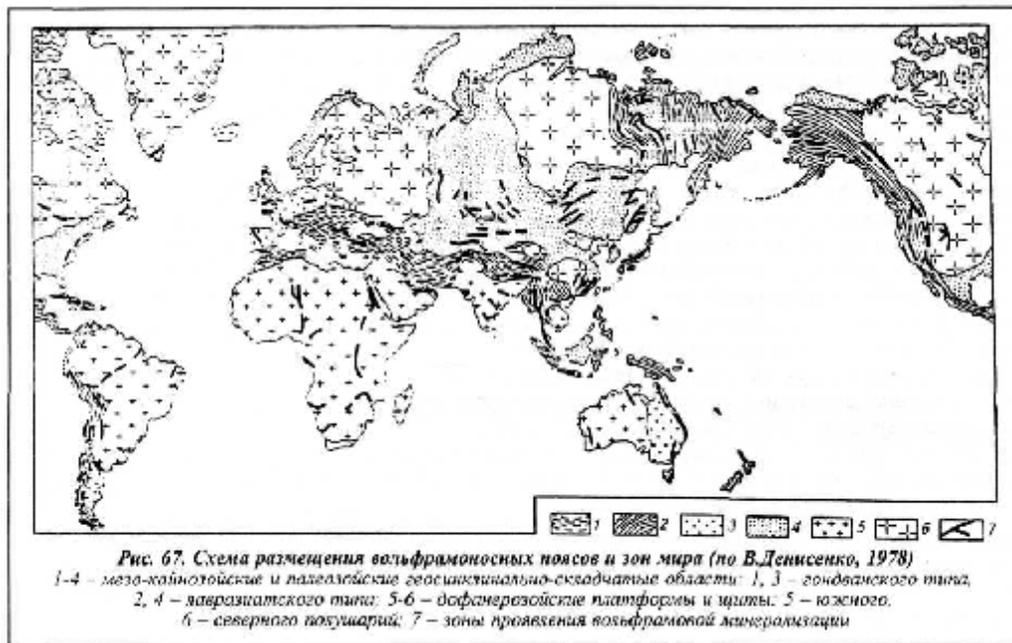
Материалы последних лет показывают, что месторождение Барун-Шивея характеризуется основными чертами, присущими стратиформным месторождениям: четкой литолого-стратиграфической приуроченностью рудных тел к прослоям кварцитов; согласным залеганием их с вмещающими породами; полосчатыми и вкрапленными текстурами руд. Месторождение сформировалось, вероятно, в результате первичного обогащения осадочных толщ вольфрамом, сурьмой и ртутью и последующего перераспределения и мобилизации рудных компонентов при метаморфизме.

РОССЫПНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения вольфрама тесно связаны с коренными грейзеновыми и плутогенными гидротермальными месторождениями, расположены в непосредственной близости от них и отрабатываются часто совместно с ними. Элювиальные и аллювиальные россыпи касситерит-вольфрамитового и вольфрамитового состава характеризуются небольшими масштабами; содержание вольфрамита в них колеблется от 0,3 до 20 кг/м³. Подобные месторождения известны в Магаданской области (Иультин), Якутии (Омчикандин), Забайкалье (Шерлова Гора), Казахстане, Китае, Бирме, Индонезии, Таиланде, Боливии, США. В россыпных месторождениях заключено всего 0,5 % запасов, но они дают свыше 8 % добычи.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Эндогенные месторождения вольфрама связаны с гранитоидными формациями – гранодиорит-гранитовой, гранитовой, лейкогранитовой, аляскитовой, характеризующимися высокой кислотностью, пересыщенностью глиноземом, повышенным содержанием летучих, гипабис-сальными условиями формирования, многофазностью становления. Они относятся преимущественно к поздним стадиям геосинклинального цикла и процессам тектоно-магматической активизации. Экзогенные месторождения представлены россыпными и осадочными образованиями. Месторождения формировались в широком возрастном диапазоне геологической истории, при этом интенсивность вольфрамового оруденения увеличивалась от древних эпох к молодым, как и для оловянного и молибденового оруденений. В архейскую и протерозойскую металлогенические эпохи были сформированы мелкие пегматитовые месторождения. Каледонская эпоха ознаменовалась более существенными гидротермальными месторождениями. Крупные скарновые, грейзеновые и гидротермальные месторождения получили широкое развитие в герцинскую эпоху. Однако наиболее продуктивными для эндогенных и экзогенных месторождений были киммерийская и альпийская эпохи.



Состав руд месторождений находится в зависимости от состава рудоносных комплексов. Олово-вольфрамовые месторождения связаны с куполами лейкогранитов, являющихся поздними фазами сложных плутонов в областях многократного проявления гранитоидного магматизма. Вольфрамовые и молибденвольфрамовые руды сопутствуют лейкократовым и биотитовым гранитам вулканоплутонических ассоциаций гранитоидов повышенной калиевой щелочности. Рудогенерирующими для полиметаллически-вольфрамовых месторождений являются интрузивные комплексы пестрого состава.

Вольфрамоносные пояса и зоны локализуются в наложенных структурах краевых частей срединных массивов и в их обрамлении, в зонах тектоно-магматической активизации платформ и щитов (рис. 67).

Наиболее крупные запасы вольфрама концентрируются в пределах металлогенических зон Тихоокеанского рудного пояса, главным образом в азиатской и северо-американской частях на территории России, Китая, Южной Кореи, США и Канады.

Выделяются провинции, тяготеющие к зонам активизации срединных массивов (Чешского, Колымского, Агинского), к геантиклинальным поднятиям (Уральская, Калба-Нарымская и другие провинции).

ОЛОВО

Олово - один из первых металлов, освоенных человеком. Первоначально оно использовалось в сплавах с медью (бронза); наиболее древние изделия из бронзы, найденные в Египте, относятся к 3700 г. до н.э. Химическая устойчивость олова, нетоксичность его солей и сплавов обеспечили широкое применение его в виде белой жести в консервной отрасли промышленности (32 % добычи). Кроме того, олово используется для получения бронз, латуни, баббитов (22 %), припоев (29 %), типографских шрифтов, в химической промышленности (15 %) в производстве красителей, в стекольной и текстильной отраслях промышленности.

Олово извлекают из оловянных и комплексных олово-вольфрамовых, олово-серебряных и олово-полиметаллических руд. Общие запасы его в недрах 40 стран мира оцениваются в 88 млн т, в том числе разведанные запасы составляют более 7 млн т. Запасы россыпных месторождений составляют 58 %. Обеспеченность подтвержденными запасами современного уровня производства олова составляет в целом 32 года. Уникальные коренные месторождения олова характеризуются запасами более 100 тыс.т, крупные - 100-25, средние - 25-5 и мелкие - менее 5. Ежегодное производство олова в концентрате колеблется от 200 до 166 тыс. т. Цена на рафинированное олово составляет 5-6 тыс.дол. за тонну. В последние годы отмечается некоторое снижение добычи, производства, потребления и цены олова. Всего с начала бронзового века добыто около 7 млн т олова.

Наиболее крупными запасами обладают Китай, Бразилия, Малайзия, Индонезия, Боливия, Таиланд, Австралия. В России основные месторождения сосредоточены в Верхояно-Чукотской, Сихотэ-Алинской и Монголо-Охотской рудных провинциях.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк олова - $2,5 \cdot 10^{-4}$ % , при этом в ультраосновных породах он составляет всего $5 \cdot 10^{-5}$, в основных - $1,5 \cdot 10^{-4}$; наиболее высокие содержания фиксируются в кислых магматических породах - более $3 \cdot 10^{-4}$ % . Геохимическая природа олова двойственна: в зависимости от режима кислорода и серы Sn обладает как лито-, так и халькофильными свойствами. Этим определяется его высокая миграционная способность и присутствие как в пегматитах, грейзенах, так и в сульфидных месторождениях. Эндогенные промышленные концентрации олова связаны с кислыми и умеренно кислыми изверженными комплексами - гранитными, гранодиоритовыми, риолитовыми. Олово выносятся из магматических очагов гидротермальными щелочными растворами в форме высоколетучих галоидных соединений. При понижении щелочности (до pH=7-7,5) галоидные комплексы гидролизуются с образованием плавиковой кислоты и выпадением гидроксида олова, который при дегидратации переходит в безводный диоксид - касситерит.

Известно 20 минералов олова, из них промышленное значение имеют: касситерит - SnO_2 (78,6 % олова), в меньшей степени станнин $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (27,7), а также тиллит SnPbS_2 (30,4), франкеит $\text{Pb}_5\text{Sn}_3\text{Sb}_2\text{S}_{14}$ (17), цилиндрит $\text{Pb}_6\text{Sn}_6\text{Sb}_2\text{S}_{21}$ (26) и некоторые другие минералы. Касситерит устойчив в гипергенных условиях и образует россыпи.

Богатые руды коренных месторождений содержат олова более 1 %, рядовые - 1-0,4, бедные - 0,4-0,1. Техногенные свойства определяются минеральным составом и крупностью зерен касситерита. В рудах собственно оловянных месторождений содержание олова варьирует от 0,1 до 1,7 %, составляя в среднем 0,76 %. Комплексные руды (Sn-W; Sn-Cu-Zn; Sn-Pb-Ag; Sn-Bi; Sn-Mo) характеризуются более низким средним содержанием олова (0,43 %) при колебаниях от 0,01 до 3,8 %.

Касситерит-кварцевые руды, характеризующиеся отсутствием или незначительным содержанием сульфидов, легко обогащаются, что позволяет вовлекать в эксплуатацию небольшие месторождения с низкими содержаниями олова. Руды такого типа обогащаются в отсадочных машинах после дробления. Обогащение руд, содержащих значительные количества сульфидов, производится по более сложной схеме с применением флотации. Промышленные концентраты содержат 40-60 % олова.

Россыпные месторождения разрабатываются при содержании касситерита 100-200 г/м³. В среднем содержание касситерита в россыпях составляет 200-800 г/м³, но иногда может достигать 10-15 кг/м³. Обогащаемость песков определяется содержанием глинистого материала и размером обломков. Обогащение ведется промывкой в шлюзах и отсадочных машинах; концентраты содержат 70-72 % олова.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Из промышленных месторождений олова выделяются: пегматитовые, скарновые, грейзеновые, плутогенные гидротермальные, вулканогенные гидротермальные, россыпные. Оловорудные месторождения могут быть разделены на две крупные геохимические группы: литофильную (редкометалльно-оловянную) и сидерохалькофильную (полиметалльно-оловянную). Первая объединяет пегматитовые, скарновые, грейзеновые и некоторые плутоно-генные гидротермальные месторождения, характеризуется тесной ассоциацией олова с вольфрамом, бериллием, танталом, ниобием, литием, фтором и другими элементами; месторождения этой группы относятся преимущественно к касситерит-кварцевой рудной формации. Ко второй группе относятся гидротермальные плутоногенные и вулканогенные месторождения, рудам которых свойственна ассоциация олова с железом, мышьяком, медью, бором и серой, и которые относятся к касситерит-силикатной и касситерит-сульфидной рудным формациям.

ПЕГМАТИТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения олова локализуются в эндо- и экзоконтактных зонах биотитовых и двуслюдяных гранитах массивов, относящихся к раннеорогенным гранитным формациям. Большая часть их (90 %) приурочена к структурам докембрия и нижнего палеозоя, реже они присутствуют в структурах мезозоя и кайнозоя. Промышленные концентрации олова встречаются преимущественно в пегматитах натрово-литиевого типа, среди которых различают кварц-микроклиновые и кварц-микроклин-сподуменовые разности. Пегматиты образуют жильные, штокообразные, линзо-гнездообразные тела, иногда группирующиеся в протяженные пояса. Характерно, что оловоносность пегматитов связана с более поздними процессами альбитизации и грейзенизации. В рудах помимо касситерита присутствуют сподумен, петалит, амблигонит, реже встречаются танталит и вольфрамит; нерудные представлены кварцем, микроклином, альбитом, лепидолитом, турмалином, топазом, флюоритом. Касситерит отличается неравномерным, гнездовым распределением, образует крупные призматические кристаллы и рассеянную вкрапленность, характеризуется повышенными содержаниями тантала, ниобия (до 1-3 %), циркония, скандия.

Пегматитовые месторождения олова - небольшие по запасам, с низкими содержаниями (0,15-0,20 %), их практическое значение невелико (2,1 % в суммарных запасах олова), однако они служат источником образования оловянных и оловянно-редкометалльных россыпных месторождений. Пегматитовые месторождения известны в Восточной Сибири, Забайкалье, на Балтийском щите и Рудном Алтае, наиболее

развиты в Заире (Манон-Китотоло), Намибии (Уис), Замбии (Камативи), имеются также в США (Сильвер-Хилл), Канаде (Берд-Ривер), Австралии (Гринбушес).

СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Оловоносные скарны связаны с посторогенными гранодиорит-гранитными, реже габбро-гранодиорит-гранитными формациями. Большая часть их (80 %) размещается в фанеро-зойских складчатых поясах. Оруденение приурочено к известковым и магнезиальным скарнам, формирующимся в приконтактных частях массивов и на некотором удалении от них среди вмещающих терригенно-карбонатных пород. Рудные тела имеют пластообразную, иногда трубообразную форму, обычно не выдержаны. По минеральному и химическому составу месторождения весьма разнообразны, характеризуются комплексным составом руд (Sn - W, Sn - Си, Sn - Pb - Zn). Оловянная минерализация, обычно в ассоциации с сульфидной, наложена на скарны. Минеральный состав руд определяется присутствием магнетита, касситерита, разнообразных сульфидов, иногда шеелита; реже встречаются оловосодержащие бораты, станнин, висмутин, блеклые руды. Часть олова входит в состав скарнов, гранатов и других минералов, возможно, в виде механической примеси касситерита. Олово в андрадите содержится иногда в количествах от 0,5 до 5,8 % SnO₂.

Руды вкрапленные, как правило, труднообогатимые, содержание олова в среднем 0,3-0,5, иногда достигает 20 %. Запасы руды колеблются от нескольких миллионов до 20-30 млн т. Скарновые месторождения известны в Приморье (Ярославское), Карелии (Питкяранта, Кителя), Средней Азии (Майхура, Сары-Булак), на Аляске (Лост-Ривер, Брукс-Маунтин), в Канаде, Австралии (Маунт-Гарнет, Маунт-Бишоф), Великобритании, Китае и других странах. Промышленное значение месторождений этого типа невелико (0,7 % суммарных запасов в зарубежных странах).

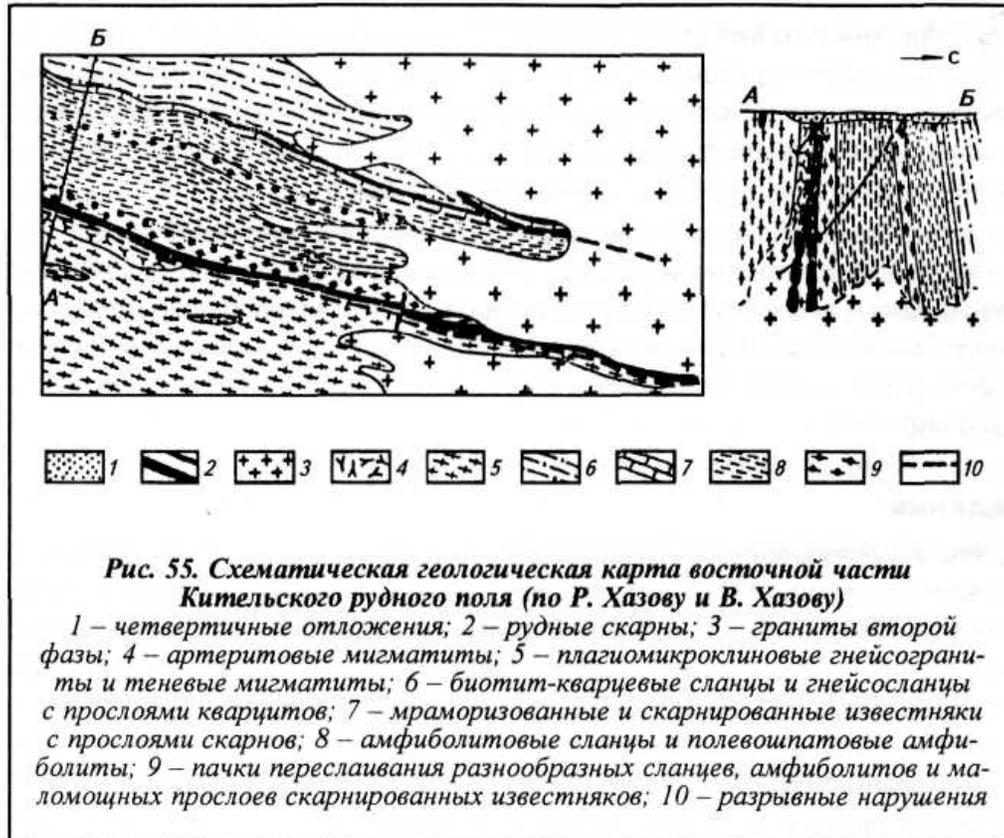
Кительское месторождение (Карелия, Северное Приладожье) приурочено к экзоконтактовой зоне протерозойского массива гранитов рапакиви. Вмещающие породы, представленные гранитогнейсами, метаморфическими сланцами и мраморизованными известняками докембрия, образуют на участке месторождения куполовидную структуру.

Месторождение приурочено к скарнированным известнякам на контакте с гранитами рапакиви второй фазы, при этом рудные тела располагаются согласно слоистости вмещающих пород и занимают поперечное положение по отношению к интрузивному контакту. Установлено два рудолокализирующих горизонта карбонатных пород. Рудовмещающие породы представлены магнетит-пироксеновыми гранатовыми скарнами, кварц-полевошпатными метасоматитами по скарнам. Наиболее крупная скарново-рудная залежь приурочена к нижнему горизонту, имеет пластовую форму, крутое падение, прослежена по простиранию на 1900 м при мощности от 10 до 30 м (рис. 55). Кондиционные руды в пределах этой залежи характеризуются более сложным строением, меньшей мощностью. Скарново-рудная залежь в поперечном сечении имеет зональное строение: скарнированные и мраморизованные известняки (3-6 м); безрудные амфибол-пироксеновые скарны (до 20); пироксеновые и амфибол-пироксеновые гранатсодержащие скарны с магнетит-сульфидной рудой (до 5-6); пироксен-гранатовые скарны с вкрапленностью магнетита, касситерита, сульфидов (2-3,5); кальцит-пироксеновые скарны, иногда с эпидотом или магнетитом (0-1,5-2,0).

Месторождение относится к касситерит-силикатной формации, руды комплексные сфалерит-халькопирит-касситеритового типа. Главные рудные минералы - магнетит, сфалерит, халькопирит и касситерит, нерудные - диопсид, геденбергит, андрадит-гроссуляр, везувиан, актинолит, кварц, кальцит и флюорит, второстепенные - пирит, пирротин, сульфосоли и шеелит, а также топаз, слюды и хлорит. Текстуры руд полосчатые, брекчиевидные и вкрапленные.

Выделяются четыре стадии минералообразования: скарново-магнетитовая (580-440 °С), связанная со становлением гранитов рапакиви второй фазы; касситерит-полевошпатовая (420-380), следующая за внедрением даек аплитовидных гранитов; кварц-сульфидная (350-300); послерудная хлорит-кальцитовая (220-140).

Главные полезные компоненты - олово, цинк, медь, железо. Содержание олова - 0,35-0,56 %. По запасам Кительское месторождение относится к мелким.



ГРЕЙЗЕНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Грейзеновые месторождения олова связаны с посторогенными гранодиорит-гранитными формациями, представленными обычно крупными многофазными батолитами. Возрастной диапазон формирования месторождений - от архея до мезокайнозоя, но наиболее характерны они для герцинской и киммерийской металлогенических эпох. Месторождения приурочены к апикальным частям отдельных штоков, купольных выступов, апофиз поздних лейкократовых аляскитовых разностей в породах кровли и гранитных образованиях ранних фаз. Рудные тела представлены штокверками, минерализованными зонами, отдельными жилами, трубообразными телами (рис. 56). Форма тел обычно сложная, жильные поля иногда занимают площади в 1-3 км². Глубина распространения оруденения, как правило, ограничена, в ряде случаев интервал не превышает 50-100 м. Руды массивные, вкрапленные, содержание олова колеблется от 0,1 до 2,5, в среднем - 0,3-0,5 %. Масштабы месторождений мелкие, средние, редко крупные. На долю этих месторождений приходится свыше 15,6 % запасов. При этом 70 % (600 тыс. т) их сосредоточено в одном месторождении Питинга (Бразилия). Они также образуют россыпи касситерита.

Грейзеновые месторождения относятся к числу комплексных. Помимо олова в рудах содержатся вольфрам, молибден, литий, тантал и ниобий, циркон, флюорит,

редкие земли. Главные минералы руд - касситерит, вольфрамит, арсенопирит, циннвальдит, образующие вкрапленность в гидротермально измененных породах и жилах, сложенных кварцем, альбитом, оротоклазом, мусковитом, с примесью топаза, турмалина, флюорита, серицита, кальцита и других минералов. В качестве второстепенных рудных минералов присутствуют магнетит, пирротин, шеелит, молибденит, халькопирит, сфалерит, галенит и др.

Большей части месторождений свойственна зональность, выраженная в уменьшении содержания олова и увеличении сульфидной минерализации от центра к периферии штокверковых образований. Грейзеновые месторождения относятся преимущественно к касситерит-кварцевой формации, реже среди них встречаются представители касситерит-силикатной формации.

Грейзеновые месторождения известны в Забайкалье (Этыка), Якутии (Кестер, Бугугычаг), на Чукотке (Экуг). Помимо уникального бразильского месторождения Питинга, крупные месторождения имеются в Канаде (Ист-Кемтвилл), Франции (Эшассер), более мелкие - в Германии и Чехии (месторождения Рудных гор - Альтенберг, Циновец и др.), США (Лост-Ривер), Китае, Бирме и других странах.

Штокверковые месторождения Рудных гор. Район Рудных гор приурочен к северной части Чешского массива, в его пределах локализованы известные месторождения Чехии и Германии - Крупка, Циновец, Альтенберг, Гайер, Зейфен, Эренфриденсдорф и Эйбен-шток. В тектоническом плане Рудные горы представляют собой обособленную структурно-формационную зону - крупный антиклинорий, сложенный комплексом разновозрастных метаморфических, осадочных и магматических пород. В верхнем ярусе структуры преобладают протерозойские серые гнейсы, нижний ярус сложен многофазным гранитным батолитом. Верхняя часть плутона осложнена куполовидными выступами высотой от 2 до 4-5 м, которые и обнажены на дневной поверхности. Штокверковые месторождения приурочены к подобным куполовидным телам и располагаются в апикальных частях мелких штоков, в их эндо- и экзоконтактных зонах. Обычно рудоносные штоки имеют округлое или овальное сечение площадью 1-2 км² и состоят из пород нескольких фаз внедрения.

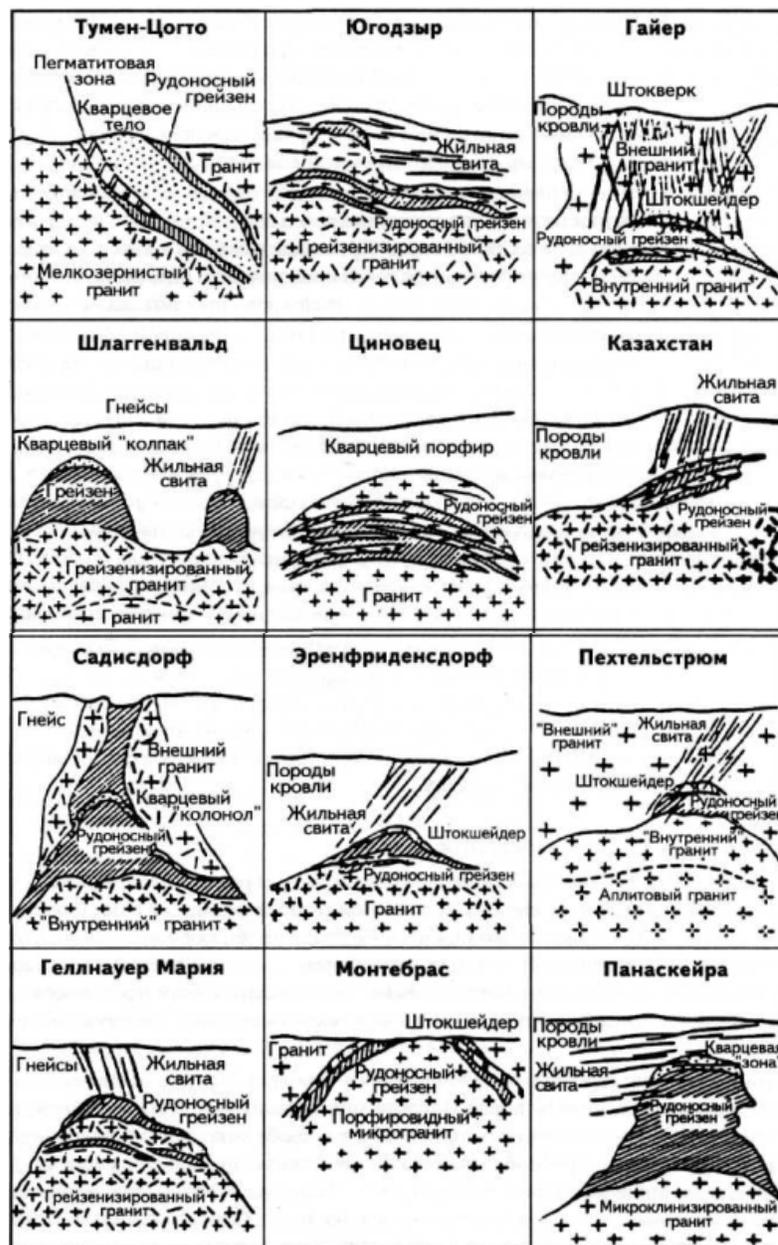
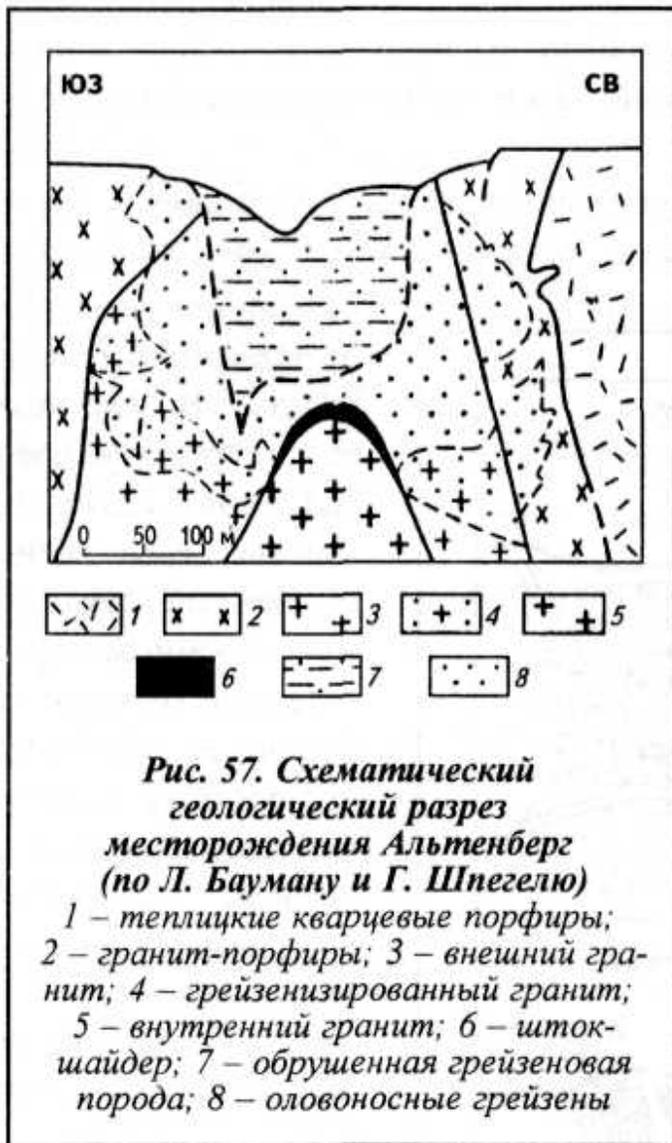


Рис. 56. Схематизированные разрезы месторождений редкометально-оловянной формации, связанных с гранитными куполами (по Б.В.Макееву, А.Б.Павловскому и др., 1988)

Месторождение Альтенберг - одно из крупнейших месторождений Европы - находится в Германии. Рудное поле сложено серыми гнейсами и парагнейсами протерозойского возраста, включающими конгломераты, кварциты и метабазиты. Оловянное оруденение локализовано в купольной части Альтенбергского гранитного штока, являющегося одной из серии подобных структур, осложняющих огромный гранитный батолит - Рудногорский плутон, сформировавшийся в результате проявления нескольких интрузивных фаз герцинского возраста.

Рудоносный шток изометричный в плане (0,5x0,5 км), прорывает более крупные интрузии гранит-порфиров и кварцевых порфиров. В нижней части гранитного штока расположено конусообразное тело т.н. "внутреннего гранита". Внутренние и внешние гранитные тела разделены между собой пегматоидным образованием, интенсивно преобразованным в процессе грейзенизации и сложенном длинностолбчатым пикнитом (разновидность топаза, замещающего полевые шпаты), кварцем и литийсодержащей слюдой (рис. 57).



Внешний гранит представлен средне- и мелкозернистыми разновидностями, состоит из кварца, альбита, ортоклаза, незначительного количества биотита. Примечательно, что в качестве аксессуаров в нем встречаются топаз и касситерит. Промышленное оруденение локализовано в теле грейзенов, приуроченном к северозападной части

внешнего гранита и имеющем эллипсоидное очертание в плане (300x400 м), и прослеживающемся на глубину 230 м до границы с куполом внутреннего гранита. Рудоносный грейзен представлен плотной мелкозернистой породой зеленоватого цвета, состоящей из кварца (60 %), слюды (31), топаза (7), касситерита и других аксессуаров (2). Грейзен пронизан густой

сетью маломощных прожилков с касситеритом, образующих штокверкоподобное тело. Среди прожилков выделяются кварц-флюоритовые с вольфрамитом и касситеритом, кварц-касситеритовые, известны более поздние сульфидные и безрудные кварц-карбонатные и кварц-флюорит-баритовые. В восточной отработанной части месторождения оруденение представлено жильными грейзеновыми зонами в гранит-порфирах. Помимо перечисленных минералов в грейзене присутствуют молибденит, самородный висмут, галенит, арсенопирит, халькопирит, сфалерит. Молибденовая минерализация обособлена от оловянно-вольфрамовой. Более богатые руды тяготеют к ядру штокверкового тела, в основном развиты по периферии, с глубиной количество сульфидов резко уменьшается, а содержание олова увеличивается: на верхних горизонтах оно составляет 0,2 %, вблизи внутреннего купола - возрастает до 1 %. Ведущим промышленным компонентом является олово, практическую ценность представляют также вольфрам и молибден. В целом руды характеризуются мелким и очень мелким касситеритом, что затрудняет извлечение металла.

ПЛУТОНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения олова представляют собой наиболее обширную и разнообразную группу. В ней выделяются месторождения касситерит-кварцевой и касситерит-силикатной рудных формаций. Месторождения кварцевого типа связаны с гранитоидными формациями, свойственными структурам тектоно-магматической активизации на щитах и платформах. Месторождения, относящиеся к касситерит-силикатной рудной формации, связаны с интрузивными комплексами габбро-гранодиорит-гранитовых и диорит-монцогранодиорит-гранитных формаций, развивающихся на поздних посторогенных стадиях эволюции складчатых областей.

Рудные тела гидротермальных месторождений размещаются большей частью в надкупольных зонах среди ороговикованных песчано-сланцевых пород. Иногда они локализуются и в эндоконтактных частях массивов гранитоидов. Морфология рудных тел весьма разнообразна: это жилы, минерализованные зоны дробления, штокверки, реже трубообразные тела. Отдельные рудные тела при средней мощности 1-3 м простираются на многие десятки и сотни метров. Нередко рудные тела встречаются группами и образуют крупные жильные поля, протягивающиеся на несколько километров. Глубина распространения промышленного оруденения достигает нескольких сотен метров.

Руды плутоногенных месторождений часто являются комплексными. Наиболее простым составом характеризуются месторождения касситерит-кварцевого типа (Иульгин и др.). Рудные жилы сопровождаются грейзенизацией, турмалинизацией, на 90-95 % состоят из кварца, помимо касситерита присутствуют вольфрамит, флюорит, сульфиды развиты слабо. Содержание олова - 0,3-0,8 %, часто в промышленных концентрациях содержится вольфрам. Масштабы этих месторождений средние и мелкие.

Месторождения силикатной группы (Депутатское, Валькумейское, Дубровское), представляющие касситерит-силикатную формацию, характеризуются резким преобладанием в составе руд турмалина и хлорита, в связи с чем выделяется два минеральных типа руд: касситерит-турмалин-хлоритовый и касситерит-хлоритовый. В рудах содержится значительное количество сульфидов, станнин при этом имеет ограниченное развитие. Масштабы месторождений средние и крупные, качество руд

высокое; содержание олова 0,6-1 % и более. Вместе с оловом в переменных количествах присутствуют Zn, Cu, Pb, реже W. На долю месторождений этого типа приходится 6,3 % суммарных запасов олова. В России эти месторождения содержат более 50 % балансовых запасов и обеспечивают свыше 60 % общего объема добычи.

В районах распространения месторождений силикатного типа нередко развит многосульфидный (касситерит-сульфидный) тип. Он иногда наблюдается в верхних горизонтах касситерит-силикатных месторождений, часто образует самостоятельные промышленные месторождения (Эгехая, Фестивальное и др.). Руды отличаются резко повышенным количеством сульфидов железа, меди и цинка, содержание сульфидного олова не превышает 5-10 % от общего его количества в руде, составляющего 0,3-1 %. Минеральный состав руд очень сложный. Месторождения этого типа представлены объектами среднего и крупного масштаба.

Плутоногенные гидротермальные месторождения различных типов распространены на востоке России - на Чукотке (Пыркакайское, Валькумей), в Забайкалье (Хапчеранга, Шерлова Гора), Якутии (Депутатское, Эгехая), Приамурье (Солнечное, Фестивальное), Приморье (Хрустальное, Дубровское). За рубежом наиболее значительные объекты этого типа находятся в Великобритании (Долкоатс, Крофти), Австралии (Ренисон-Белл, Гербертон, Квинсленд), Канаде (Маунт-Плезант).

Пыркакайское месторождение — крупнейшее месторождение олова в России, находится на Чукотке, относится к касситерит-кварцевой формации.

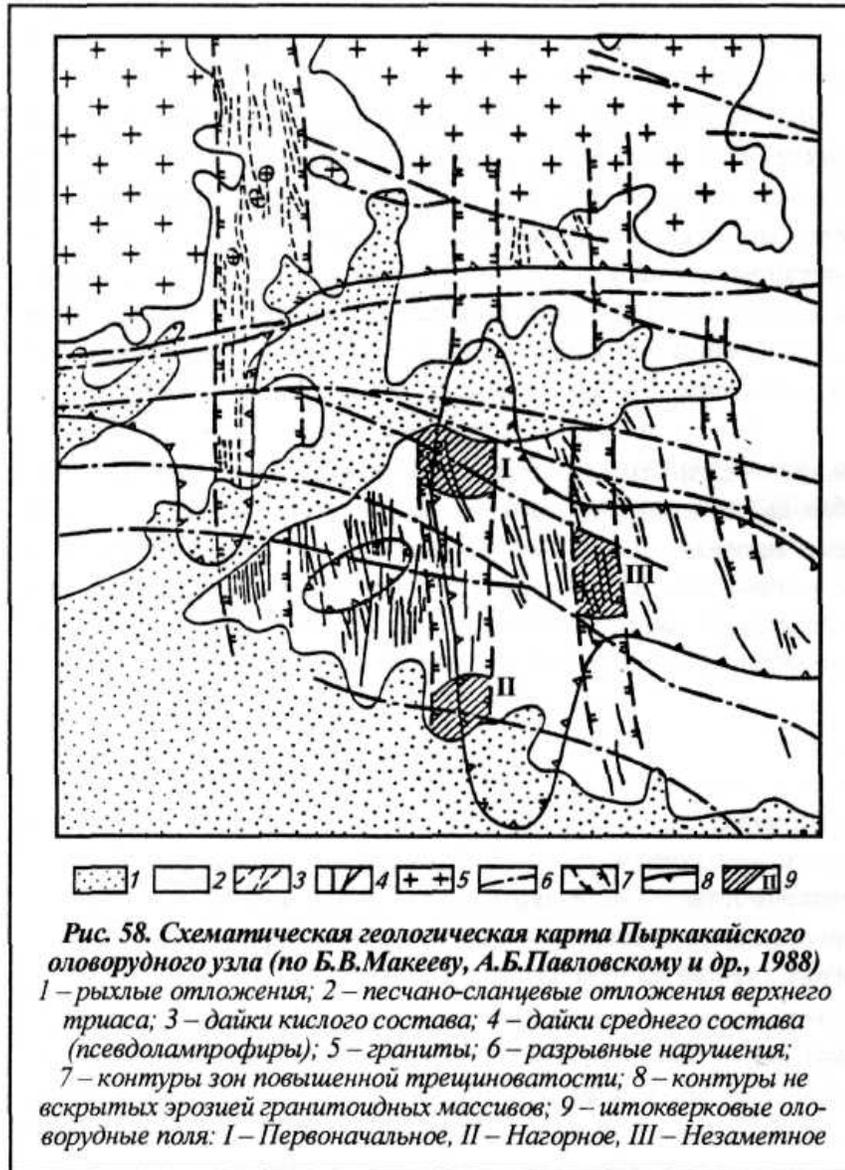
Пыркакайский рудный район сложен песчаниками и сланцами верхнего триаса, мощностью до 2500 м. Осадочные отложения смяты в складки, нарушены разрывными нарушениями; крупные глубинные разломы определяют блоковое строение территории. Гранитоидные массивы и дайковые тела, прорывающие терригенные свиты, сформированы в ранне- и поздне-меловую эпохи. В пределах района по геофизическим данным фиксируется не вскрытый эрозией гранитоидный массив площадью 400 км², представляющий собой, вероятно, пластовое тело мощностью 2-3 км, расположенное на глубине 1-2,2 км. Куполообразные выступы интрузива, к экзоконтактовым зонам которых приурочены месторождения олова, располагаются на глубине 600-800 м. Широко развиты дайки лампрофиров, гранит-порфиров и диоритовых порфиритов. Возраст оловоносных гранитов и связанного с ними оруденения определен как раннемеловой (определения абсолютного возраста мусковита из рудных жил дают разброс от 110±7 до 82±6 млн лет) (рис. 58).

Месторождения расположены в надкупольной зоне выступов гранитоидного массива в ороговикованной песчано-сланцевой толще. Непосредственно над выступом контактовый мета-морфизм проявлен в развитии полей узловатых кварц-кордиеритовых сланцев. Рудные тела представлены штокверковыми зонами, в которых рудолокализирующей является в основном одна из трех трещинных систем - меридиональная. В районе известны и другие типы оруденения - линейные зоны прожилкования, минерализованные зоны дробления и минерализованные дайки лампрофиров. Основные рудные структуры месторождения - штокверки - представляют собой линейные прожилковые системы, имеющие в плане форму, близкую к эллипсоидальной. Размеры штокверков изменяются в плане от 50x200 до 1300x120 м. Мощность прожилков варьирует от первых миллиметров до 10-15 см, удельная плотность в среднем 6-8 прожилков на 1 м. Рудные тела оконтуриваются по результатам опробования. В центральных частях штокверков выделяются рудные столбы с повышенными содержаниями Sn.

Жильные тела пользуются ограниченным распространением и развиты преимущественно на флангах штокверков. Они характеризуются простой и сложной формой, имеют преимущественно меридиональное простирание, крутое падение; протяженность их изменяется от десятков до нескольких сотен метров, мощность - от 10 км до 1,5 м. Среди жил выделяются касситерит-кварцевые, касситерит-альбит-кварцевые и касситерит-сульфидно-кварцевые.

Типичный средний минеральный состав прожилков в рудном штокверке определяется следующими содержаниями минералов (в %): кварц - 40-80, мусковит - 5-20, флюорит - 5-10, сфалерит - 3-15, пирротин - 5-20, арсенопирит - 1-5, топаз - 1-5, карбонаты - 1-2; встречаются вольфрамит, пирит и другие минералы. Большая часть касситерита приурочена к кварцевым, кварц-мусковитовым, кварц-топазовым прожилкам, значительно меньше касситерита наблюдается в кварц-полевошпат-хлоритовых прожилках. Во вмещающих породах вкрапленность касситерита практически отсутствует. По данным термобарогеохимии отложение руд происходило при понижении температуры от 470 до 100 °С и перепаде давления $6,5-2,5 \cdot 10^7$ Па. Рудные штокверки сопровождаются интенсивно проявленной турмалинизацией вмещающих пород, наложенной на контактово-метаморфические ассоциации и предшествующей формированию продуктивных ассоциаций. Кварц-турмалиновое ядро центральных частей штокверков к периферии постепенно сменяется зонами серицит-турмалиновых и серицит-кварцевых изменений, прослеживаемых до 500 м от центра.

Зональность штокверковых залежей выражена нечетко и обусловлена некоторым увеличением содержания олова в центральной части и постепенной сменой касситерит-вольфрамитовых ассоциаций сульфидными и затем сульфидно-карбонатными. На месторождении выделяются два типа руд - первичные и окисленные (в соотношении 0,9:0,1), которые по технологическим свойствам практически не различаются благодаря устойчивости касситерита в зоне окисления. Кроме олова в рудах содержится вольфрам, реже - медь и цинк.



Депутатское месторождение - представитель касситерит-силикатной формации, находится в Якутии в пределах западной части Полоусного мегасинклинория. Синклинорий сложен юрскими терригенными толщами общей мощностью около 5 км, согласно залегающими на отложениях верхнего триаса. Месторождение расположено в надинтрузивной зоне позднеюрского гранитоидного массива площадью в сотни кв. км. Верхнеюрские песчаники и алевролиты на участке месторождения залегают относительно полого, образуя крыло крупной складки. В центральной части рудного поля в результате интенсивного контактового метаморфизма образовались двуслюдяные и андалузитсодержащие биотит-кварцевые роговики. По апофизам гранитов и роговикам развиты кварц-мусковитовые, кварц-топазовые и кварц-турмалиновые грейзены с касситеритом, арсенопиритом, вольфрамитом и флюоритом. В краевых частях рудного поля развиты слабая серицитизация, окварцевание, пиритизация.

На месторождении известно около 150 рудных тел, среди которых выделяются жилы, линейно-вытянутые штокверкоподобные зоны и минерализованные зоны дробления; часто наблюдаются комбинации перечисленных типов. Рудные тела

характеризуются преимущественно широтным простиранием и крутым падением, их протяженность колеблется от десятков до многих сотен метров, мощность жильных тел редко превышает 1 м, мощность зон дробления часто достигает 10 м и более (рис. 59). Количество и мощность рудных тел с глубиной резко уменьшаются, наиболее богатая минерализация отмечается в средних участках. От центральных частей к флангам, по направлениям падения и восстания, уменьшаются содержания олова, а руды переходят в сульфидные разности. В участках изменения простирания жил наблюдаются рудные столбы.

Главные минералы руд - касситерит, пирротин, кварц, турмалин, хлорит, второстепенные - халькопирит, сфалерит, пирит, манганосидерит, сидерит, анкерит, марказит, флюорит, кальцит, редкие - арсенопирит, галенит, серицит, вольфрамит, топаз, блеклые руды и др.

На месторождении развита зона окисления глубиной до 400 м и более. Преобладающая часть запасов заключена в окисленных рудах.

В Депутатском месторождении сосредоточено 13 % российских запасов олова, среднее содержание - 1,11 %.



ВУЛКАНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Относятся к сульфосолюно-сульфидному типу касситерит-сульфидной рудной формации. Руды этих месторождений отличаются широким развитием сульфидных и сульфосолюных минералов олова (до 70 % Sn находится в форме сульфидов и сульфосолей).

Месторождения связаны с вулcano-плутоническими и вулcanoгенными формациями, а в пределах формаций - с кислыми и умеренно кислыми комплексами риолитового, риолит-дацитового и дацитового составов, обогащенными калием. Месторождения относятся преимущественно к альпийской и отчасти киммерийской металлогеническим эпохам.

В России известны лишь мелкие и средние месторождения этого типа, приуроченные к поднятиям в периферических частях Охотско-Чукотского и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканических поясов. Крупные месторождения боливийского типа размещаются в неогеновых вулканических поясах. Они заключают в себе 12,8 % общих запасов олова и обеспечивают 4,8 % добычи. Отличительные черты боливийских месторождений: приуроченность к жерловым зонам эродированных вулканов, выполненных штоками кварцевых порфиров субвулканического облика или трубками вулканических брекчий; интенсивное развитие кварц-турмалиновыми метасоматитов. Вмещающие породы серицитизированы и хлоритизированы.

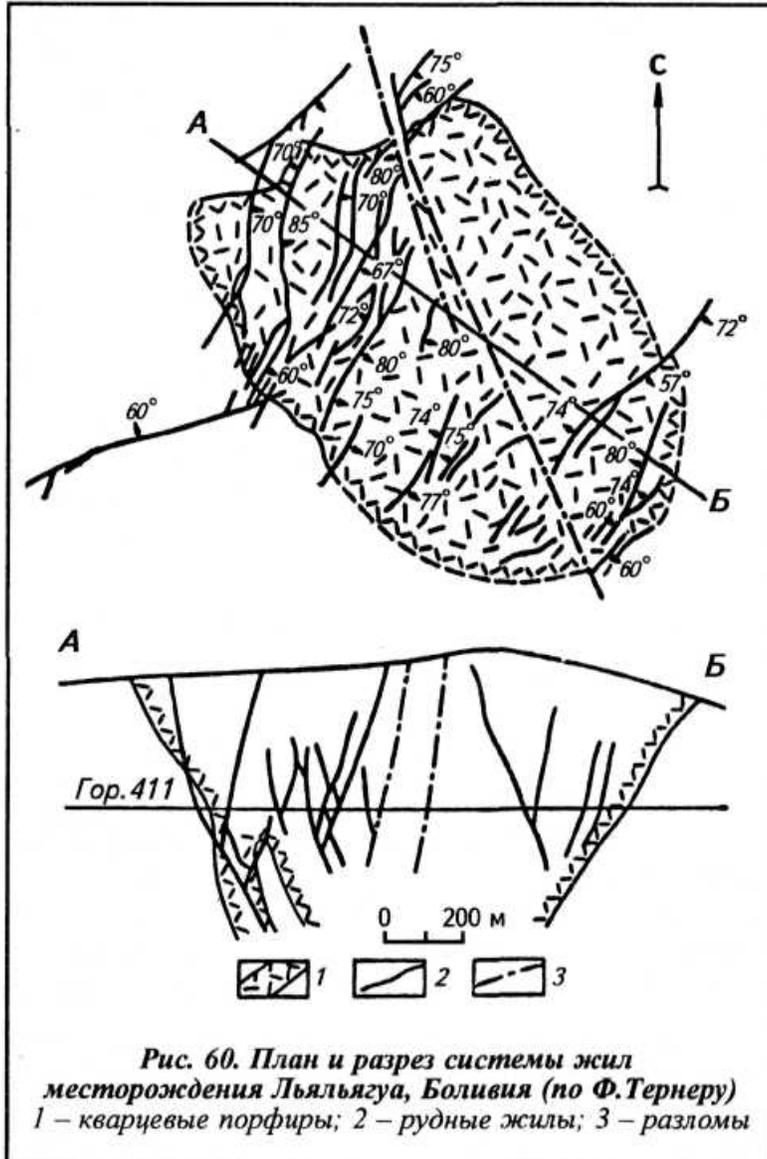
Рудные тела представлены жилами, часто ветвящимися, оруденелыми зонами дробления, штокверками. Руды комплексные, наряду с оловом из них извлекаются Ag, Pb, Zn, Cu, Bi. Содержание окисного олова 0,3-0,4, сульфидного - 0,1-0,2 %. Главные минералы руд - касситерит (иногда деревянистое олово), станнин, висмутин, арсенопирит, пирротин, жильные - кварц, турмалин, серицит. Второстепенные минералы - франкеит, вольфрамит, халькопирит, галенит, сфалерит, пираргирит, аргентит, буланжерит, джемсонит, самородное серебро, а также каолинит, диксит, опал, флюорит, барит, халцедон. Минерализация наблюдается в кварцевых жилах. Так, в рудах месторождения Потоси содержание олова составляло 1-1,2 %. Вкрапленные руды в порфиритах и брекчиях содержат значительные запасы олова при низком содержании. Строение месторождений, штокверковый характер рудной минерализации, зональность позволяют сопоставлять их с медно-порфировыми месторождениями.

Рудообразование происходило в условиях субвулканических глубин (от 100-200 до 700-800 м от поверхности) при быстром падении температур минералообразования (360-160°C) и широком участии метеорных вод в рудном процессе. Месторождениям свойственна отчетливо проявленная зональность: на нижних горизонтах, в центральных частях месторождений развито касситерит-висмутовое, касситерит-вольфрамитовое оруденение с серебром, сменяемое в верхних частях и по периферии жилами со станнином, сульфосолями олова, галенитом, баритом, минералами серебра.

Необходимо отметить, что наряду с сульфосолюно-сульфидным типом среди вулcanoгенных месторождений встречаются и касситерит-сульфидного типа. Сульфосолюно-сульфидные вулcanoгенные месторождения известны в Малом Хингане (Джалинда, Хинганское), Боливии (Льяльягуа, Чоролька, Потоси, Оуро и др.), Мексике (Дуранга, Эль-Сантин), Японии (Акенабе), Австралии (Ренисон-Белл), Китае (Малагэ).

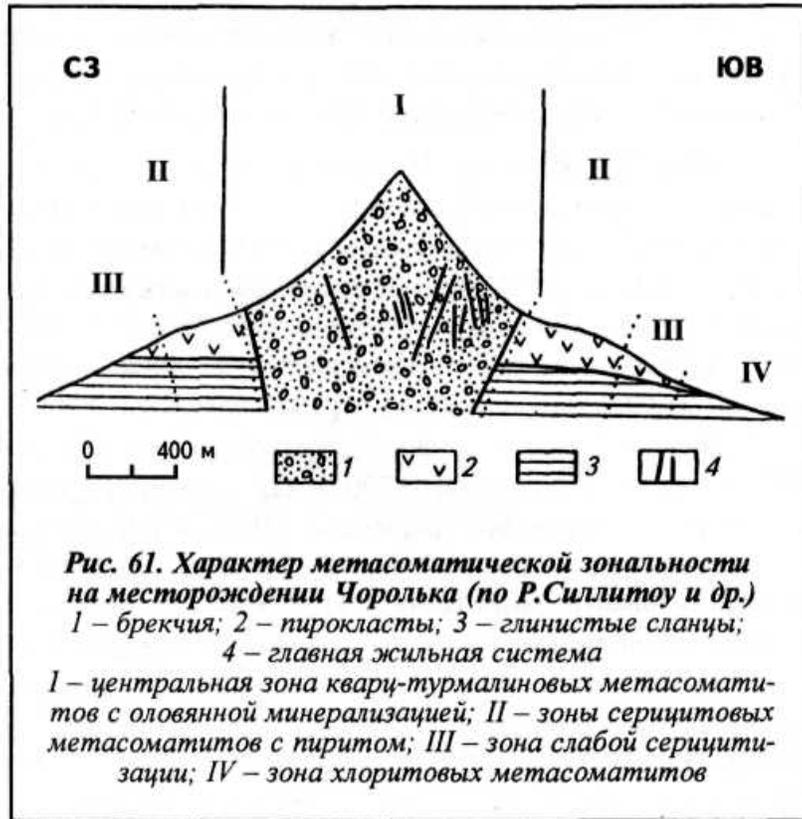
Месторождение Льяльягуа является одним из наиболее ярких объектов оловоносного пояса Южной Боливии. Рудное поле сложено силурийско-девонскими граувакками, песчаниками и сланцами мощностью около 2000 м. Осадочные отложения несогласно перекрыты вулcano-генными образованиями дацит-риолитового состава неогенового возраста. Оруденение локализовано в штоке Сальвадоре, внедрившемся в антиклинальную складку, представляющую собой

частично эродированное жерло вулкана. Шток сложен кварцевыми порфирами и их брекчиями, относящимися к андезит-риолитовой формации. В порфирах и в особенности в брекчиях развиты кварц-турмалиновые метасоматиты, сменяющиеся к периферии серицитовыми. На большем удалении от вулканического аппарата развиты прожилковые изменения Рудные тела (рис. 60) представлены серией крутых, часто ветвящихся жил преимущественно северо-восточного, реже северо-западного простирания, локализованных в породах жерла. Известно несколько десятков крупных и свыше тысячи мелких жил. Кроме того, обломки и глыбы включенных в кварцевые порфиры брекчий насыщены вкрапленностью касситерита, турмалина и сульфидов. Распределение оруденения неравномерно: известны крупные рудные столбы протяженностью 400-700 м и глубиной 250-600 м; концентрация олова в них достигала 25 %. Среднее содержание олова в брекчиях составляет 0,2-0,3 %, а в добываемых рудах - 0,5 %. Глубина формирования месторождения составляет 800 м, при этом в жилах четко фиксируется вертикальный интервал протяженностью около 350 м, в котором наблюдается максимально высокое содержание касситерита. Характер жил меняется в зависимости от состава вмещающих пород: когда жилы уходят из кварцевых порфиров в боковые породы, касситерит исчезает, но появляются минералы серебра. Главные минералы руд - кварц, касситерит, пирротин, пирит, марказит, сидерит, второстепенные - апатит, висмутин, франкеит, арсенопирит, сфалерит, серицит, турмалин, монацит, вольфрамит, станнин, халькопирит, редкие - галенит, стибнит, тетраэдрит и др. Текстуры руд – массивные, сетчатые, брекчиевидные, полосчатые, вкрапленные, друзовые. Отчетливо выражена зональность: в центральной части на глубине 250-450 м от поверхности локализована высоко-температурная оловянная минерализация, совпадающая с кварц-турмалиновым типом изменений; вокруг нее развита сульфидная зона – пирит, сфалерит, сульфосоли, станнин. В формировании месторождения выделяется несколько стадий, при этом общая эволюция процесса выражена в смене ранних более высокотемпературных ассоциаций кварц-висмутин-касситеритового состава последовательно пирротин-арсенопиритовой, пирит-марказитовой, сфалеритовой. Первоначально в месторождении насчитывалось 400 тыс. т олова. Ежегодная добыча достигает 4 тыс. т олова.



Месторождение Чоролька также приурочено к вулканической структуре. Жерло эродированного вулкана выполнено вулканической брекчией, имеющей трубообразную, сужающуюся с глубиной форму; площадь сечения на поверхности около 1 км^2 . Предполагается, что на глубине брекчия сменяется штоком кварцевых порфиров. Интенсивно развиты гидротермальные изменения: брекчиевая трубка превращена в кварц-турмалиновую породу, по вмещающим породам у контакта с брекчией также развиты кварц-турмалиновые метасоматиты.

По мере удаления от жерла в породах фиксируется постепенно убывающая серицитизация, а на периферии - хлоритизация (рис. 61). Вкрапленность касситерита отмечается по всей трубке, вертикальный размах оруденения определяется в 1 км, а максимальная концентрация приурочена к интервалу 500-800 м. Помимо вкрапленности касситерит присутствует в крутопадающих кварцевых жилах преимущественно северо-восточного простирания, иногда выходящих из жерла в вмещающие породы, но в этом случае обедненные касситеритом. Помимо пирит-касситерит-кварцевых жил на месторождении встречаются жилы с вольфрамовым и висмутовым оруденением.



РОССЫПНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Россыпным месторождениям принадлежит ведущая роль в запасах (58,6 %) и производстве касситеритовых концентратов (75 %) в зарубежных странах. На территории России промышленные россыпные месторождения немногочисленны и отличаются незначительными масштабами или низкими концентрациями касситерита; запасы этих месторождений составляют около 4 % разведанных запасов олова. Наиболее крупные россыпные месторождения известны в Бразилии, Китае, Индонезии, Малайзии, Таиланде. Содержание касситерита в них варьирует от 0,1 до 4,9, в среднем составляя 0,6 кг/м³. Одно из крупнейших месторождений о. Банка (Индонезия) содержит 420 тыс. т олова с содержанием касситерита 0,3 кг/м³.

Россыпные месторождения Бразилии расположены в 15 крупных оловоносных районах, суммарные подтвержденные запасы составляют 500 тыс. т при среднем содержании касситерита 1,4 кг/м³. С 1983 г. разрабатывается крупнейшее месторождение Питинга с запасами 370 тыс. т олова при среднем содержании касситерита в песках 2 кг/м³.

В Китае около 75 % запасов олова сосредоточено в россыпных месторождениях, главным образом делювиально-пролювиальных. Содержание касситерита в них от 0,3 до 4, среднее - 0,5 кг/м³.

Россыпные месторождения формируются за счет разрушения коренных месторождений пегматитовых, скарновых, грейзеновых, некоторых типов сульфидно-касситеритовых и др. Наиболее благоприятны для образования россыпей штокверковые месторождения, в рудах которых касситерит отличается большей крупностью. Выделяют элювиальные, делювиальные, аллювиальные и прибрежно-морские типы россыпей касситерита.

Элювиальные россыпи

Наиболее широко развиты в странах с жарким и влажным климатом. Возникают в результате процессов химического выветривания, проникающего до глубины 200 м. В результате оруденелые породы превращаются в рыхлую массу, обогащенную зернами касситерита, содержание которого обычно увеличивается в нижних слоях. Одна из наиболее крупных элюви-альных россыпей Куала-Лангат (Малайзия) представлена выветрелым до глубин 40-200 м штокверком; разведанные запасы олова составляют 100 тыс. т при среднем содержании касситерита $0,25 \text{ кг/м}^3$.

В зависимости от типа источника элювиальные россыпи могут содержать колумбит, танталит, сподумен, магнетит, циркон, вольфрамит, шеелит, золото, турмалин. Элювиальные россыпи могут служить источником формирования других типов россыпей, представляя собой, таким образом, своеобразный промежуточный коллектор касситерита. Особенно важна роль таких коллекторов в формировании прибрежно-морских россыпей. В мировом производстве оловянных концентратов элювиальные россыпи имеют большое значение. В России наиболее крупные элювиальные россыпи обнаружены в Пыркакайском рудном узле на Чукотке.

Делювиальные россыпи

Обычно связаны с элювиальными и аллювиальными россыпями, являясь их переходным, промежуточным элементом. В отличие от элювиальных образований они характеризуются лучшей сортированностью материала и крайне неравномерным распределением касситерита, максимальные концентрации которого наблюдаются в нижних частях россыпи. Минеральный состав делювиальных россыпей определяется составами коренных источников.

Аллювиальные россыпи

Пользуются наиболее широким распространением, присутствуют в различных климатических зонах. Россыпи характеризуются хорошей сортированностью материала, окатанностью зерен касситерита, равномерным распределением его и приуроченностью его к нижней, приплотиковой части песков. Среди аллювиальных россыпей выделяются долинные, русловые, террасовые. Наибольшее промышленное значение имеют долинные россыпи, в особенности древние, погребенные. Мощность продуктивных пластов изменяется от долей метра до первых десятков метров. Среднее содержание касситерита - $0,6-0,8 \text{ кг/м}^3$. Наряду с касситеритом в ряде случаев извлекаются ильменит, вольфрамит, монацит и другие минералы.

В России промышленные аллювиальные россыпи известны в Пыркакайском рудном узле и районе Депутатского месторождения. Касситеритовые россыпи р. Депутатской через оловоносный делювий и элювий связаны с коренными источниками. Продуктивный пласт представлен галечниками мощностью 4-5 м. Плотиком служит слабоволнистая поверхность коренных пород - песчаников и сланцев. Преобладает крупная фракция (3,6-16 мм), состоящая из сростков касситерита с турмалином, зерен кварца, обломков оруденелых пород.

На базе аллювиальных россыпей в России производится треть оловоносных концентратов. Наиболее многочисленны россыпи с запасами 100-300 т, но около 70 % разведанных запасов сосредоточено в пяти россыпях с запасами более 10 тыс. т. Самая крупная из них россыпь руч. Тирехтях содержит 39 % разведанных запасов с содержанием касситерита 927 г/м^3 .

Наиболее крупные аллювиальные россыпи находятся в Малайзии, Индонезии, Таиланде.

Прибрежно-морские россыпи

Россыпи касситерита пользуются широким распространением и имеют важное промыш-ленное значение. Коренными источниками их служат штокверки, грейзеновые, скарновые месторождения, в некоторых случаях промежуточные коллекторы. Длительного переноса касситерит не выдерживает, он неустойчив и при многократном переотложении. Поэтому оловосодержащие россыпи в береговой зоне сохраняются лишь при их быстром захоронении. Вследствие этого из большого разнообразия типов прибрежно-морских россыпей промышленные концентрации олова содержатся в затопленных морем россыпях древних и современных речных долин и плоских междуречий.

Крупнейшей оловоносной провинцией является Бирмано-Малайско-Индонезийский оловянный пояс, в пределах которого сосредоточены плейстоцен-голоценовые россыпи аллювиально-морского и прибрежно-морского генезиса, заключенные в морских террасах на суше и на дне современных акваторий, а также в затопленных речных долинах на удалении до 5-15 км от берега при глубинах до 40-60 м. Коренными источниками служат месторождения, связанные с мезо-кайнозойскими гранитоидными интрузиями.

Мощность продуктивных горизонтов колеблется от 1-2 до 20-30 м при мощности вскрыши до 30 м, содержание касситерита - от сотен граммов до первых килограммов на 1 м³.

Общие запасы олова в россыпях Индонезии оцениваются примерно в 1 млн т, столько же составляют прогнозные ресурсы. У берегов Таиланда прогнозные ресурсы оцениваются в 4-5 млн т, в Малайзии - 5-8, на шельфе Бирмы прогнозируется в россыпях около 1 млн т олова. Совместно с касситеритом добываются монацит, вольфрамит, циркон, ильменит, золото, рутил, колумбит, танталит.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Эндогенные месторождения олова связаны с гранитоидными массивами кислого состава, преимущественно повышенной (калиевой) щелочности, формировавшимися на средних и главным образом поздних стадиях развития складчатых областей, а также в процессе тектоно-магматической активизации платформ и срединных массивов. Основные особенности различных типов месторождений обусловлены характером рудоносных магматических формаций. Оловоносные пегматиты формируются в гранитоидных массивах с сильным преобладанием гранитов. Касситерит-кварцевые грейзеновые месторождения связаны с гранодиорит-гранитными формациями и их поздними фазами лейкократовых аляскитовых гранитов. Месторождения касситерит-силикатного типа ассоциируют с формациями габбро-гранодиорит-гранитного состава. Вулканогенные месторождения касситерит-сульфидного типа приурочены к комплексам риолитового и дацитового состава, входящим в сложные вулканоплутонические орогенные формации.

Месторождения олова формировались от протерозоя до позднего неогена, при этом их количество и запасы возрастали. В докембрии формировались пегматитовые и скарновые месторождения. Более широкое развитие грейзеновых, плутоногенных гидротермальных и скарновых месторождений отмечается в герцинскую эпоху. Максимальное проявление гидротермального оруденения относится к позднему мезозою и раннему кайнозою. В альпийскую и современную эпоху возникали и россыпные месторождения стран Юго-Восточной Азии.

Наиболее крупные оловоносные площади сосредоточены в пределах Тихоокеанского пояса, особенно в его Австрало-Азиатской ветви, где они, сменяя друг друга, почти непрерывно прослеживаются на 18 тыс. км. К их числу относятся российские участки пояса - Верхояно-Чукотская и Сихотэ-Алинская складчатые

области. Бирмано-Малайский оловоносный металлогенический пояс прослеживается почти на 2000 км при ширине около 100 км. Его продолжением служит Индонезийский пояс, совпадающий с полосой развития мезозойских двуслюдяных и биотитовых гранитов. Оловоносные площади Китая и Монголии приурочены к областям активизации Китайской древней платформы и герцинид Монголо-Охотского пояса. В крайней юго-западной части Тихоокеанского пояса находится герцинская складчатая зона Австралийских Альп. В американской ветви наиболее крупным является Боливийский оловоносный пояс, протягивающийся на 800 км при максимальной ширине 80 км вдоль верхнепалеозойской складчатой области Восточных Кордильер.

В пределах Средиземноморского подвижного пояса наиболее крупные оловоносные площади расположены в восточной части, где он смыкается с Тихоокеанским поясом, а также в европейском секторе - в пределах древних консолидированных массивов, охваченных верхнепалеозойской активизацией.

Кроме двух глобальных поясов оловорудная минерализация известна в пределах Атлантического пояса, а также на щитах и древних платформах - Африканской, Австралийской, Бразильской.

СУРЬМА И РТУТЬ

Ртуть известна с древнейших времен. За 300 лет до н.э. греки разрабатывали испанское месторождение Альмаден. Следы старинных разработок ртути обнаружены на Хайдарканском месторождении в Средней Азии, на Никитовке в Донбассе.

Сурьма наряду с золотом, медью и ртутью считается доисторическим элементом. Из сурьмы делали сосуды в Вавилоне за 3000 лет до н.э.

Свойства ртути: единственный металл, жидкий при нормальной температуре, способный растворять золото, серебро и другие металлы, высокотоксична.

Использование ртути: в химической промышленности (45 %) для получения хлора и каустической соды, красок, сулемы, каломели, различных катализаторов; в электронной и электротехнической отраслях (30%) для осветительной аппаратуры, приборов, аккумуляторных батарей; для измерительных инструментов, стоматологического оборудования и других целей (25 %).

Использование сурьмы: для изготовления красок (в древности), для получения огнестойких соединений (50 %), для изготовления аккумуляторных батарей (14 %), пластмасс (6 %), керамики и стекла (7 %).

Производство и потребление ртути: ресурсы - 675 тыс. т, общие запасы - 295 тыс. т, из них рентабельны - не более 100 тыс. т. Основные запасы в Испании, Киргизии, России, Алжире, Украине и Югославии. Годовое производство первичной ртути - 2,96 тыс. т. (1993 г). Производство вторичной ртути - 480-500 т в год. В развитых странах, производство и потребление ртути сокращается. Цена ртути снижается с 8700 в 1988 г. до 3196 дол/т в 1994 г.

Производство и потребление сурьмы: ресурсы - более 6,5 млн т, общие запасы - более 6,0, подтвержденные - 5,0 млн т. Основные запасы в Китае (82 % мировой добычи), Боливии, Таиланде, ЮАР, Таджикистане, России, Киргизии, Мексике. Производство 109 - 73,5 тыс. т. В год. Россия занимает 2-е место по производству сурьмы (более 8 %) после Китая (более 66). Потребление стабильно, имеет тенденцию к росту. Цена сурьмы 1500-2000 долларов за тонну, повысилась в 1994 г. до 3850 дол.

Сырье для добычи: монометалльные и комплексные сурьмяно-ртутные руды, полиметаллические, оловянные, вольфрамовые и других руд (попутно).

Масштабы месторождений: уникальные - более 100 тыс. т металла, крупные - 100-25, средние - 25-20, мелкие - менее 10, а для ртути - менее 3 тыс. т.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк ртути $8,3 \times 10^{-6}$, сурьмы – 5×10^{-5} %. Повышенное содержание – в производных базальтоидных магм. Источник сурьмы и ртути - ювенильный, подкоровый.

Геохимические свойства: перенос ртути – в форме сульфидных комплексов (HgS_2) в высококонцентрированных щелочных растворах, перенос сурьмы – в комплексных соединениях в виде тиокислот типа Na_3SbS_3 , галогенидах, обладающих высокой летучестью. Поведение ртути и сурьмы схоже, они образуют общие минералы (ливингстонит) и комплексные месторождения. В зоне окисления оба элемента рассеиваются.

Минералы сурьмы: известно 75, основные - антимонит Sb_2S_3 , бертьерит FeSb_2S_4 , гудмундит FeSbS , тетраэдрит $\text{Cu}_2\text{Sb}_4\text{S}_3$, джемсонит $\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{Si}_4$, буланжерит $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{Sn}$. В окисленных рудах - валентинит Sb_2O_3 ромб., сенармонтит Sb_2O_3 куб., сервантит Sb_2O_4 , кермезит $\text{Sb}_2\text{S}_2\text{O}$ и др.

Минералы ртути: киноварь HgS триг. (главный промышленный), самородная ртуть, метациннабарит HgS куб., блеклая руда - шватцит $(\text{Hg,Cu})_2\text{Sb}_4\text{S}_3$. В зоне

окисления ртутных месторождений образуется самородная ртуть, метациннабарит, каломель Hg_2Cl_2 и другие.

Особо следует отметить ливингстонит HgSb_4S_8 , являющийся главным рудным минералом на месторождении Гуитцукко в Мексике, содержащий 51,6 % сурьмы и 22 % ртути.

Металлургия ртути: ртуть извлекают из монометалльных ртутных, комплексных сурьмяно-ртутных, полиметалльных и ртутьсодержащих руд. Бедные руды содержат 0,08-0,12 %, рядовые - 0,1-0,2, средние - 0,2-0,3, богатые - до 1, очень богатые - до 20 %. Извлечение ртути при прямой возгонке - 85-90 % (тонкодисперсные) и 88-94 % (крупнокристаллические).

Металлургия сурьмы: прямое извлечение - лишь при содержании сурьмы в несколько десятков процентов, иначе - обогащение. Среднее содержание в сульфидных рудах – от 2 (согласные залежи) до 12 % (жильные тела), бортовое содержание - от 0,7 до 1,5 %. Извлечение металла - от 50 до 85 %.

Комплексные ртутно-сурьмяные руды также подвергают гравитационно-флотационному обогащению и в зависимости от минерального состава получают два селективных или один комплексный концентрат.

Попутные компоненты и ценные минералы: самородная сурьма, флюорит, барит, олово, вольфрам, медь, свинец, цинк, а также золото, серебро, платиноиды.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Группы и геолого-промышленные типы

1. Плутоногенные гидротермальные: кварц-золото-антимонитовым (сурьма);
2. Вулканогенные гидротермальные: карбонатно-полиаргиллитовые, листовенитовые и опалито-алунитовые (ртуть), кварц-антимонитовые(сурьма);
3. Стратиформные (телетермальные): кварц-диккитовые, карбонатные (ртуть) и джаспероидные (сурьма-ртуть);
4. Россыпные (промышленного значения не имеют).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ КВАРЦ-ДИККИТОВОГО ТИПА (КИНОВАРЬ)

Геологическая позиция: сероцветные песчаниковые формации с повышенной угленосностью, приуроченные к зонам тектоно-магматической активизации. Особенность - присутствие вулканогенных образований базальтовой или трахи-базальтовой формации.

Рудные тела: согласные или пластообразные залежи прожилково-вкрапленных руд, часто – многоярусные, жилообразные, штокверкообразные тела, приуроченные к зонам крутопадающих разломов.

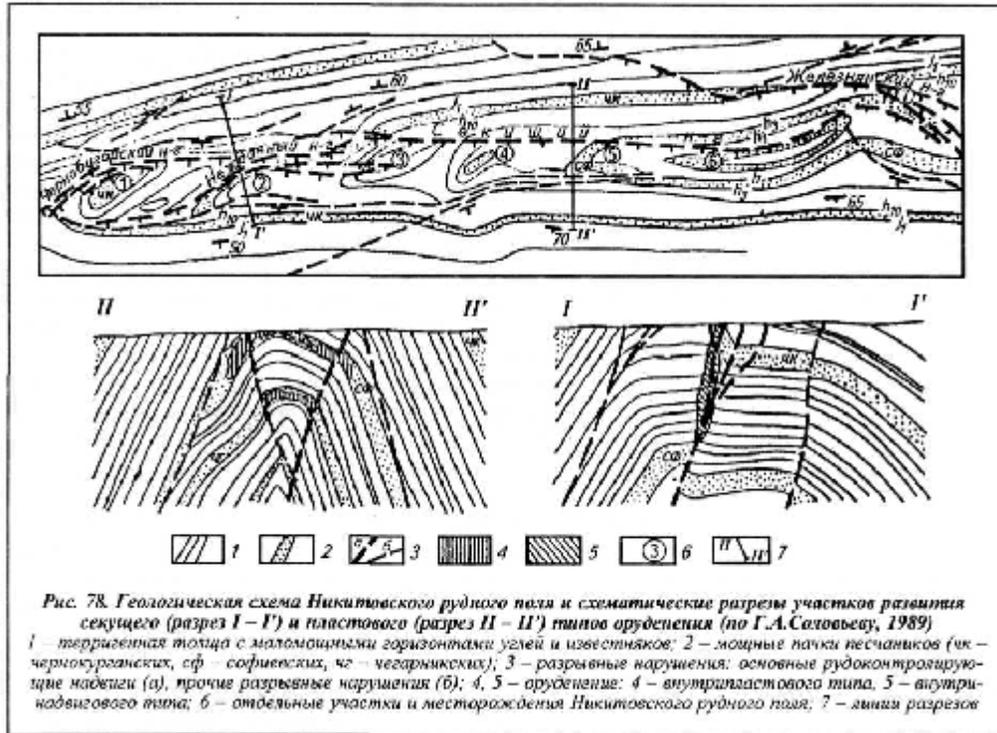
Зональность: киноварь по простирацию и на глубину сменяется антимонит-сульфосольно-полиметаллической минерализацией.

Содержание ртути: от сотых долей до 30 % и более (штуфные руды).

Генезис: не ясен, либо телетермальные, возникшие в связи с тектоно-магматической активизацией, либо гидротермально-осадочные, связанные с субмаринным базальтоидным вулканизмом, либо седиментогенные, с накоплением ртути в процессе седиментации терригенных толщ и последующей перегруппировки рудного вещества при метаморфизме.

На долю кварц-диккитовых месторождений приходится 42-44 % мировых запасов ртути.

Примеры: Альмаден, Лас-Куэвас, Эль-Энтредуго в Испании, Пинчи-Лейк, Рэд-Дэвл в США, Ламучан в Китае, Никитовка на Украине.



МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРБОНАТНОГО ТИПА (РТУТЬ)

Геологическая позиция: карбонатные и глинисто-карбонатные формации, с повышенной битуминозностью, сероносностью, ассоциированные с редуцированными базальтовыми комплексами. Рудовмещающие комплексы формируются в обстановке локальных конседиментационных поднятий окраинно-материковых бассейнов.

Пример: месторождение Идрия в Югославии, занимающее второе место по запасам (18 тыс. т). За 450 лет эксплуатации здесь добыто 200 тыс. т металла. **Рудные тела:** согласные пластообразные залежи в складчатой пачке триасовых доломитов, надвинутых на меловые породы. В рифовых известняках - штокверковые зоны.

Руда: содержание - от десятых долей до 1 %, руды прожилково-вкрапленные, иногда слоисто-полосчатые, нередко содержат самородную ртуть. Встречаются участки сплошных руд, сложенных "стальной", "печеночной", "кирпичной", "коралловой" киноварью.

Источник металла: слабо проявленный базальтовый вулканизм среднетриасового возраста.

Промышленное значение: 7-8 % мировых запасов ртути. Развиты в Юго-Восточном Китае (Ваньшаньская группа), Перу. В России промышленного значения не имеют.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРБОНАТНО-ПОЛИАРГИЛЛИТОВОГО ТИПА

Относятся к ртутной (метациннабарит-киноварной) карбонатно-аргиллитовой рудной формации. Многие объекты этого типа обнаруживают сходство как с телетермальными, так и с плутоногенными образованиями.

Геологическая позиция: зоны субаэрального вулканизма сводово-глыбовых областей орогенеза и тектоно-магматической активизации, в складчатых карбонатных и алюмо-силикатных породах под недислоцированными, частично эродированными вулканитами.

Контроль оруденения: связаны с вулcano-тектоническими структурами, контролируются некками, приурочены к грибообразным телам опалитов, блокам алунитизированных кислых эффузивов и их туфов, зонам аргиллизации.

Содержание ртути: десятые доли процента, редко - первые проценты.

Промышленное значение: 14-15 % мировых запасов ртути.

Примеры: Монте-Амиата в Италии, Рос-Эль-Ма, Мра-Сма, Исмаил и Фендек в Алжире, Западно-Полянское на Чукотке, Акташ в Горном Алтае и другие.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛИСТВЕНИТОВОГО ТИПА (КИНОВАРЬ)

Рудные тела: крутопадающие зоны карбонатизации и окварцевания – сложно ветвящиеся рудные столбы с апофизами, прослеживающиеся на глубину до 1500 м или линзы

Геологическая позиция: контакт серпентинитов, основных вулканических пород и даек офиолитовых комплексов с вмещающими терригенными породами.

Генезис: наложение на офиолитовые комплексы субаэрального вулканизма орогенной стадии. Рудные тела результат биметасоматических реакций на контакте серпентинизированных гипербазитов и вмещающих их терригенно-эффузивных пород под воздействием глубинных гидротерм, обогащенных углекислотой.

Минералы: кварц, доломит, магнезит, анкерит, тальк, серпентин, хлорит, каолинит, диксит, хромит; **рудные** – киноварь, реже - минералы мышьяка и вольфрама (Тамватнейское месторождение), золото.

Промышленное значение: 13-14 % мировых запасов ртути.

Примеры: Нью-Альмаден (добыто 38 тыс. т ртути), Нью-Идрия (20) в США. В России крупнейшими являются Тамватней (Чукотка), Чаган-Узун (Горный Алтай).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЖАСПЕРОИДНОГО ТИПА (РУТЬ, СУРЬМА)

Геологическая позиция: карбонатные формации миогеосинклинальных и окраинно-материковых бассейнов, которые также ассоциируют с редуцированными субмаринными андезито-базальтовыми формациями.

Рудные тела:

- пластообразные, располагающиеся в терригенно-карбонатных комплексах на определенных стратиграфических уровнях,
- послойные оруденелые брекчии, часть которых связывается с палеокарстом или с плащеобразными палеоэлювиальными брекчиями,
- секущие жильные тела, приуроченные к разрывным нарушениям и проникающие в перекрывающие джаспероиды сланцевые пачки.

Руды: прожилково-вкрапленные, гнездовые, В рудах отмечаются признаки многократного дробления и перекристаллизации.

Минералы: промышленные - антимонит, киноварь, флюорит, иногда свинцово-сурьмяные сульфосоли.

Содержание: сурьмы - 2-6 %, ртути - на один-два порядка ниже.

Генезис: неясен – оруденение, возможно сингенетичное вмещающим породам, и связанное с межформационными перерывами, древними корами выветривания и палеокарстом, впоследствии подверглись метаморфизму и другим преобразованиям, которые в значительной степени затушевали первичные черты месторождений.

Промышленное значение: 7-9 % мировых запасов ртути и 70 % сурьмы.

Примеры: джаспероидные месторождения наиболее широко распространены в Среднеазиатской провинции (Хайдаркан, Кадамджай, Джиджикрут и др.). В Южном Китае находится уникальное сурьмяное месторождение Сигуаньшань.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ КВАРЦ-ЗОЛОТО-АНТИМОНИТОВОГО ТИПА

Большая часть месторождений относится к плутоногенным гидротермальным жильного типа.

Геологическая позиция: рифтогенные сланцевые трогии пассивных окраин и тыловодужные магматические пояса.

Рудоносные формации: черносланцевые и сероцветные глинисто-песчаниковые, ассоциирующие, как и в других типах, с редуцированными субмаринными андезитобазальтовыми.

Рудогенерирующие формации: диорит-гранодиоритовые (натриевой серии).

Рудные тела: плитообразные жилы, локализованные в зонах сбросо-сдвигов, согласные четковидные и седловидные тела, послонные зоны прожилково-вкрапленной минерализации. Рудоносные зоны - столбы, прослеживающиеся по склонению более километра.

Минералы: главные рудные - антимонит, бертьерит, высокопробное (940-999) золото. Жилы часто сопровождаются ореолами прожилково-вкрапленной сульфидизации (пирит, арсенопирит) с повышенной золотоносностью.

В рудах отсутствуют типичные для сурьмяных месторождений других типов минералы - барит, реальгар, киноварь, халцедоновидный кварц.

Содержание: ртути ниже 10-5 %), сурьмы от первых единиц до первых десятков процентов, золота - до десятков граммов на тонну.

Попутные компоненты: золото, серебро (Au:Ag > 10:1).

Запасы: от десятков до первых сотен тысяч тонн сурьмы.

Примеры: месторождения Боливии, ЮАР, Франции. В России они известны в Якутии (Сарылах, Сентачан), на Енисейском кряже (Удережское).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ КВАРЦ-АНТИМОНИТОВОГО ТИПА (СУРЬМА)

Это наиболее широко распространенные сурьмяные месторождения. Относятся к вулканогенной гидротермальной группе, располагаются в перивулканических и субвулканических зонах областей орогенеза и тектоно-магматической активизации.

Рудные тела: простые жилы, минерализованные зоны дробления и брекчирования. Прожилково-вкрапленное оруденение в субвулканических телах и экструзивах представляет собой редкий "порфиновый" тип.

Содержание сурьмы - 1-10 %, сопутствующие компоненты - серебро, вольфрам, золото.

Известно более 1000 месторождений с запасами сурьмы от единиц до первых десятков тысяч тонн, в них заключено 30 % мировых запасов сурьмы. Экономическое значение месторождений этого типа в России малозначительно.

Примером их может служить месторождение Салокачи на Дальнем Востоке.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Основная часть месторождений ртути и сурьмы имеет мезозойский или кайнозойский возраст и размещается в пределах альпийских и мезозойских складчатых областей.

Планетарные рудные пояса: Тихоокеанский, Средиземноморский, Тяньшаньско-Южно-Сибирский, приуроченный к трансконтинентальному поясу мезозойских сводово-глыбовых поднятий и тектоно-магматической активизации.

Источник металлов: щелочно-базальтоидный магматизм, вероятно, с подкоровыми магматическими очагами в зонах длительно развивавшихся глубинных разломов. Вмещающие породы: мощные терригенные формации с повышенным содержанием углерода, известково-терригенные, обогащенные битумами.

Генезис: первичное накопление металлов в процессе седиментогенеза и последующая перегруппировка его с образованием промышленных концентраций в процессе метаморфизма. Рудообразование связано с тектоно-магматической активизацией областей завершённой складчатости, окраин древних платформ и срединных массивов.

Локализация месторождений: протяженные рудные пояса, следующие вдоль глубинных разломов с зональным размещением ртутных, сурьмяно-ртутных и сурьмяных месторождений.

Благодаря большой подвижности ртути и сурьмы образуют концентрации на значительном удалении от магматических очагов, в обстановке низких температур, в сопровождении аргиллизированных, опализированных, окварцованных пород.

АЛЮМИНИЙ

Впервые металлический алюминий был получен датским физиком Эрстедом в 1825 г. В 1865 г. русский химик Н.Бекетов получил алюминий путем вытеснения его магнием из расплавленного криолита. После изобретения способа электролиза криолито-глиноземных расплавов (1886 г.) были созданы благоприятные условия для развития алюминиевой отрасли промышленности.

Благодаря своей плотности ($2,7 \text{ г/см}^3$), высокой электропроводности, большой коррозионной устойчивости и достаточной механической прочности (в сплавах с Cu, Si, Mg, Mn, Zn, Ni и др), алюминий нашел применение в авиационной, автомобильной и электро-технической отраслях промышленности, на транспорте, в строительстве, а также при изготовлении упаковочных материалов и предметов домашнего обихода.

Общие запасы бокситов (основных руд Al) в 54 странах мира - 70 млрд т, 95 % из них сосредоточено в тропическом поясе, в том числе: 30 % приходится на Гвинею, 40 - на Австралию, Венесуэлу, Бразилию, Индию, Вьетнам и Ямайку. Добывают бокситы в 26 странах в количестве 15 млн т в год, 80 % этой добычи приходится на Австралию, Гвинею, Ямайку, Бразилию, Китай и Индию. Производство глинозема в странах, добывающих бокситы, достигло 43 млн т, а выплавка алюминия - 20 млн т в год. Цены на металлургические бокситы колеблются от 17 до 29, а глинозема - от 430 до 475 дол/т, алюминий стоит 1800 дол/т (2006 г).

Помимо бокситов, алюминий извлекают из алунитовых и нефелиновых руд. Нефелинсодержащие породы используются в качестве алюминиевого сырья только в России. Разрабатываются Кия-Шалтырское месторождение в Кемеровской обл. и месторождения Кукисвумчорр, Юкспор, Расвумчорр на Кольском полуострове.

Третий вид алюминиевых руд — алуниты, разрабатывают только в Азербайджане (месторождение Заглик). Подтвержденные запасы алунитов в Азербайджане оцениваются в 200 тыс. т.

Разработаны способы получения Al из высокоглиноземистых пород (кианитовых, силлиманитовых и андалузитовых сланцев), каолинов, глин и других нетрадиционных источников.

К уникальным относятся месторождения с запасами бокситов более 500 млн т, к крупным и средним - 500-50, мелким - менее 50.

К бокситам относят породы с содержанием глинозема более 28 %. Качество бокситов, перерабатываемых на глинозем по способу Байера, должно отвечать требованиям ГОСТа 972-82 (содержание Al_2O_3 - более 28 %, бокситовый критерий Б - более 6). Бокситовый критерий рассчитывается по формуле: $B_1 = (\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,269 * \text{SiO}_2 - 1,531 * \text{CO}_2 - 1,043 * \text{S} - 3,44 + 0,093 \text{ ппп}) * 0,975$, где ппп - потери при прокаливании; для производства глинозема по способу спекания: $B_2 = (\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,393 * \text{SiO}_2 - 0,179 * \text{Fe}_2\text{O}_3 - 4,16 * \text{S} - 19,51 + 0,326 * \text{CaO} + 0,297 \text{ ппп}) * 0,61$.

Лабораторными исследованиями установлена возможность извлечения из шламов при переработке бокситов - галлия, скандия, циркония, ниобия, тория, ванадия, редких земель и других попутных продуктов. Однако способ извлечения этих компонентов в промышленных условиях не разработан.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Алюминий представлен в природе только одним изотопом ^{27}Al . Кларк алюминия - 8,05 %. Коэффициент его концентрации равен 5. В эндогенных условиях алюминий концентрируется в щелочных нефелин- и лейцитсодержащих породах и анортозитах. Он накапливается также при процессах алунитизации, связанных с гидротермальной переработкой кислых вулканических образований. Наибольшие скопления алюминия

наблюдаются в остаточных и переотложенных корках выветривания на щелочных, основных и кислых породах.

В осадочных процессах глинозем растворяется и переносится только в кислых (рН менее 4) или сильно щелочных (рН более 9,5) растворах. Осаждение гидроксида алюминия начинается при рН, равном 4,1. В присутствии SiO₂ растворимость Al₂O₃ возрастает, а при наличии CO₂ снижается. Коллоидный глинозем по сравнению с коллоидным кремнеземом менее устойчив и быстрее коагулирует, поэтому при совместной миграции они разделяются.

В связи с различной геохимической подвижностью соединений алюминия, железа и марганца происходит их дифференциация в прибрежной зоне водоемов. Ближе к берегу накапливаются бокситы, в верхней части шельфа - железные руды, а внизу шельфа - марганцевые руды.

Алюминий входит в состав около 250 минералов, но промышленное значение из них в настоящее время имеют бёмит и диаспор - Al₂O₃ * H₂O (85 % Al₂O₃), гиббсит (синоним гидраргиллит) - Al₂O₃ * 3H₂O (65,4 %), нефелин KNa₃[AlSiO₄]₄ (34 %), лейцит K[AlSi₂O₆] (23,5 %) и алунит -KAl₃[SiO₄]₂ (OH)₆ (37 %). Перспективны для извлечения алюминия кианит, силлиманит, андалузит и каолинит.

Важнейшими рудами для производства алюминия служат бокситы - горные породы, состоящие из гидроксидов алюминия, оксидов и гидроксидов железа, глинистых минералов и кварца, в которых отношение Al₂O₃/SiO₂ не менее 2,6. По минеральному составу различают бокситы диаспоровые, бемитовые, гиббситовые, а также комплексные. Бокситы представлены тремя разновидностями - каменистой, рыхлой и глиноподобной, помимо которых встречаются сухаристые, углистые и брекчиевидные бокситы. Оксидами железа они обычно окрашены в красные и бурые цвета различных оттенков. Встречаются также бокситы белые, серые, черные и других окрасок. Структура бокситов скрытокристаллическая до тонкозернистой; текстура - бобовая или пизолитовая, колломорфная, конгломератовая, гравелитовая, песчаниковая, афанитовая (пелитовая и оолитовая, массивная, слоистая. Бокситы обладают высокой адсорбционной способностью и постоянно содержат примеси V, Cr, Ca, Ti и других элементов.

Аморфный глинозем с течением времени испытывает старение, в результате чего он преобразуется в бёмит, а последний переходит в гиббсит. Поэтому в природе наиболее широко распространены гиббситовые бокситы.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Все промышленные типы бокситовых месторождений относятся к экзогенным образованиям. Они подразделяются на месторождения выветривания и осадочные. Месторождения выветривания, в свою очередь, делятся на остаточные латеритные и остаточные переотложенные, а осадочные - на залегающие в терригенных толщах платформенных областей и связанные с карбонатными толщами геосинклинальных областей.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Остаточные латеритные месторождения

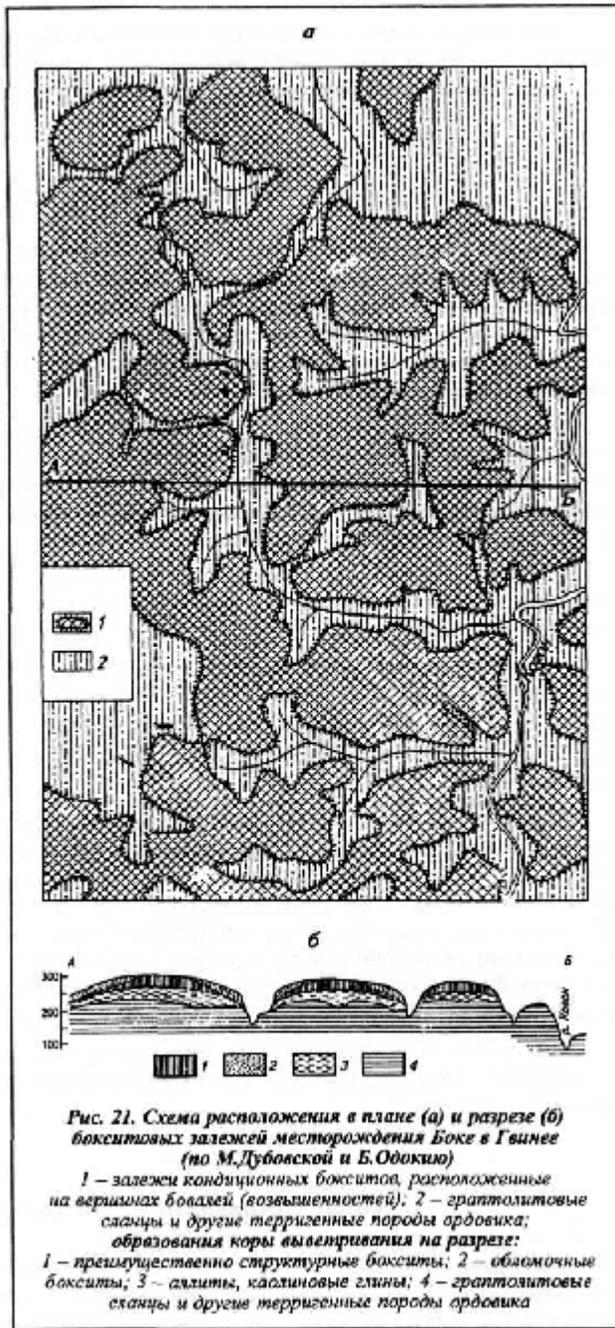
Латериты представляют собой продукты глубокого химического выветривания алюмо-силикатных пород щелочного, основного, среднего и кислого состава, образовавшиеся в тропических и субтропических условиях в результате интенсивной длительной промывки теплой дождевой водой, выноса из них щелочей и кремнезема и накопления свободных оксидов алюминия, железа и титана. Латеритные месторождения, особенно кайнозойских тропических областей, имеют огромное практическое значение. В России погребенные латеритные месторождения бокситов в

древних корях выветривания выявлены в пределах Белгородского района КМА (Висловское и др.), на Украине - в Ингулецко-Днепровском районе (Высокопольское и др.).

Боке является крупнейшим в мире месторождением латеритных бокситов. Расположено в Гвинее. Бокситовые залежи приурочены к холмистым возвышенностям. Бокситовые латериты образовались в результате интенсивного выветривания силурийских граптолитовых сланцев в третичное время в условиях слаборасчлененной равнины. Мощность латеритной коры выветривания 10-15 м. Бокситы выходят на поверхность и обычно перекрыты железистыми латеритами (кирасой) (рис. 21).

На месторождении выявлено более 100 бокситовых залежей, вытянутых в виде зоны северо-восточного простирания длиной 130 км при ширине 30-60 км, площадью свыше 3500 км². По условиям залегания и по структурно-текстурным особенностям на месторождении выделены две разновидности бокситов: элювиальные и делювиальные.

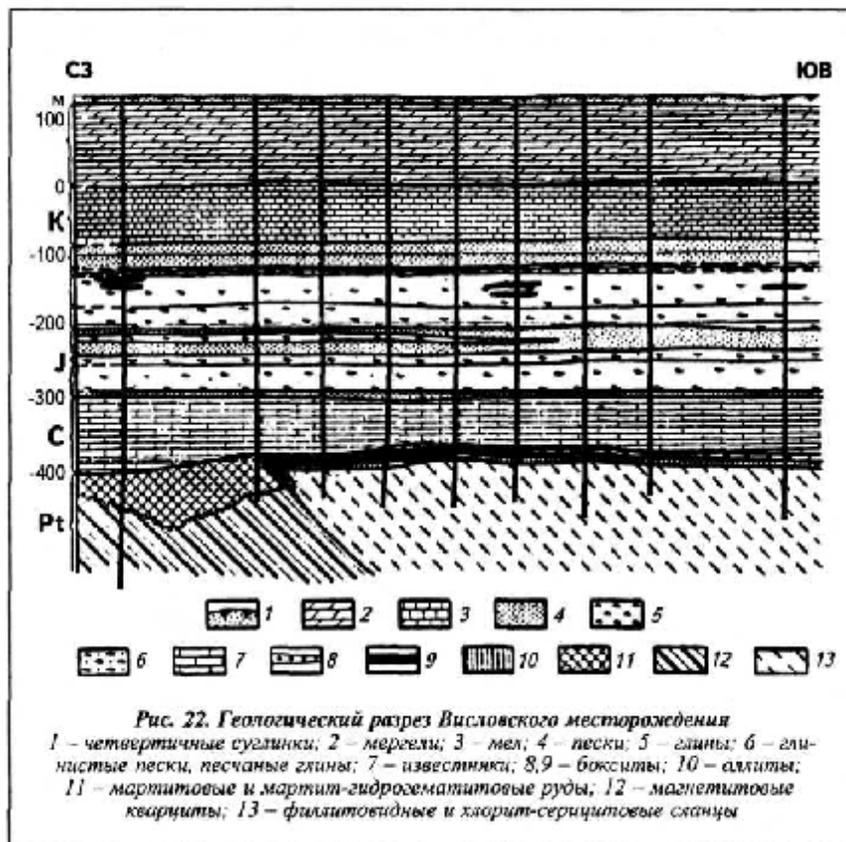
Основными рудообразующими минералами бокситов являются гиббсит и гематит с примесью в верхних частях залежи бёмита (до 10 %), каолинита (2-3 %) и титановых минералов. Содержанием Al_2O_3 высокое (51-62 %), вредных примесей - низкое: SiO_2 (1-2), оксидов железа (2-6) и титана (2-3). При бортовом содержании глинозема 50 % общие запасы месторождения, доступные для открытой добычи, составляют около 3 млрд т.



Висловское месторождение расположено в юго-западной части Воронежской антеклизы, в южной части Яковлевского железорудного месторождения. Формирование бокситов на месторождении происходило в верхних зонах латеритной коры выветривания на филлитовидных и амфиболовых сланцах раннепротерозойского возраста (рис. 22). Бокситы формировались на узких гребневидных поднятиях докембрийских пород, которые возвышались на 30-100 м над пенепленизированной всхолмленной поверхностью.

Мощность площадной коры выветривания от 5 до 170 м, глубина линейной - до 700 м от палеоповерхности фундамента. Протяженность бокситовых залежей месторождения достигает нескольких десятков километров, мощность - нескольких метров. Бокситы бёмитового и бёмит-гиббситового состава полосчатой, сланцеватой и псевдобобовой текстур, унаследованных от материнских пород. Бокситы хорошего качества содержат (в % мас): глинозема 48-50; кремнезема -7-11; оксида железа (III) -

6-8; оксида железа (II) - 16-19; диоксида титана - 1,3; оксидов кальция и магния — по 0,6. Запасы бокситов составляют 80 млн т.



*Рис. 22. Геологический разрез Висловского месторождения
1 – четвертичные суглинки; 2 – мергели; 3 – мел; 4 – пески; 5 – глины; 6 – глинистые пески, песчаные глины; 7 – известняки; 8,9 – бокситы; 10 – аллиты;
11 – мармитовые и мармит-гидросематитовые руды; 12 – магнетитовые кварциты; 13 – филлитовидные и хлорит-серицитовые сланцы*

Остаточные переотложенные месторождения

К этому подтипу относятся месторождения Арканзасского района (США), Австралии и Гвианской береговой равнины (Гайана, Суринам и Гвиана). В России подобные месторождения не встречаются.

Месторождения Гвианской береговой равнины образуют бокситоносную провинцию, вытянутую вдоль побережья Атлантического океана на 600 км при ширине 100-150 км. Месторождения приурочены к северному склону Гвианского щита, сложенного гранитами, диоритами и метаморфизованными осадочными и вулканогенными докембрийскими породами. На породах древнего фундамента расположены песчано-глинистые отложения мезозойско-кайнозойского возраста.

Латеритные бокситы залегают на плоских вершинах и склонах пологих холмов древнего фундамента высотой до 55 м, окаймляющих береговую равнину. Мощность бокситовых пластообразных залежей - до 12 м.

В песчано-глинистых породах расположены переотложенные аллювиальные бокситы неоген-палеогенового возраста. Мощность линзообразных залежей - до 10 м. Наиболее высококачественные бокситы приурочены к центральным частям бокситовых залежей. Среди бокситоносных отложений наблюдаются горизонтальная слоистость, линзы и прослои углистых глин и лигнитов.

Бокситы очень высокого качества содержат от 58 до 66 % Al_2O_3 при минимальном содержании кремнезема и оксидов железа (0,1-2,5 %). Общие запасы бокситов провинции - 850 млн т.

Месторождения Австралии. Крупнейшие в мире месторождения бокситов находятся в Северной и Юго-Западной Австралии. Они представлены

пластообразными залежами площадью в сотни квадратных километров, приуроченными к площадям развития латеритного покрова по докембрийским метаморфическим и изверженным породам (месторождения Уэйпа, Гов), базальтам и пирокластическим породам (Митчелл-Плато), долеритам и глинистым сланцам (Дарлинг-Рейндж).

В бокситоносной толще обычно выделяются два или три горизонта мощностью 2-15 м, которые сложены преимущественно пизолитовыми, галечными, гравийными и брекчиевыми бокситами, цементированными более рыхлой массой такого же химического и минерального состава, что и обломочные бокситы.

Качество бокситов очень высокое, в среднем они содержат (в % мас): Al_2O_3 - 50-62; SiO_2 - 3-5. Они обычно гиббситового состава при подчиненном количестве бемита. В бокситах отмечено присутствие гематита, магнетита, каолинита, диаспора, анатаза, корунда, кварца.

Бокситовые залежи образовались в результате переотложения на небольшие расстояния и, возможно, последующей бокситизации продуктов латеритной коры выветривания в поздне меловое и раннепалеогеновое время; бокситообразование прекратилось в поздне неогеновое время в результате поднятия региона.

Общие запасы бокситов месторождений Австралии - 6,7 млрд т.

ОСАДОЧНЫЕ ПЛАТФОРМЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Приурочены к краевым частям синеклиз, к впадинам между выступами древних пород, к эрозионно-тектоническим котловинам и долинам, часто развивающимся в зонах сочленения платформ со складчатым обрамлением. Они залегают в континентальных отложениях преимущественно озерно-болотной фации, часто связаны с угленосными осадками, расположенными выше бокситовых и удаленными от выступов фундамента далее, чем бокситы.

Примерами подобных месторождений являются визейские бокситовые месторождения Восточно-Европейской платформы, находящиеся в западной и северной периферических зонах Московской синеклизы (Тихвинский, Северо-Онежский, Средне-Тиманский и Южно-Тиманский районы). Месторождения этого типа каменноугольного и пермского возраста встречены также на Китайской и Северо-Американской платформах.

В юго-западной части Сибирской платформы и на Енисейском кряже (Чадобецкий, Татарский и Приангарский районы), а также в Тургайском прогибе (Амангельдинский, Западно-Тургайский и Центрально-Тургайский районы) месторождения бокситов приурочены к площадям развития карбонатных пород складчатого фундамента. Формирование их происходило в меловое и палеогеновое время в карстовых воронках, контактово-карстовых и карсто-котловинных депрессиях.

Тихвинская группа месторождений приурочена к полосе нижнекаменноугольных отложений северо-западного крыла Московской синеклизы. Бокситоносная зона вытянута в суб-меридиональном направлении на 260 км. В пределах зоны расположено более 30 месторождений. Дорудный фундамент месторождений Тихвинской группы сложен песчаниками, слюдястыми сланцами с линзами песков и пестроцветных песчаников верхнего девона.

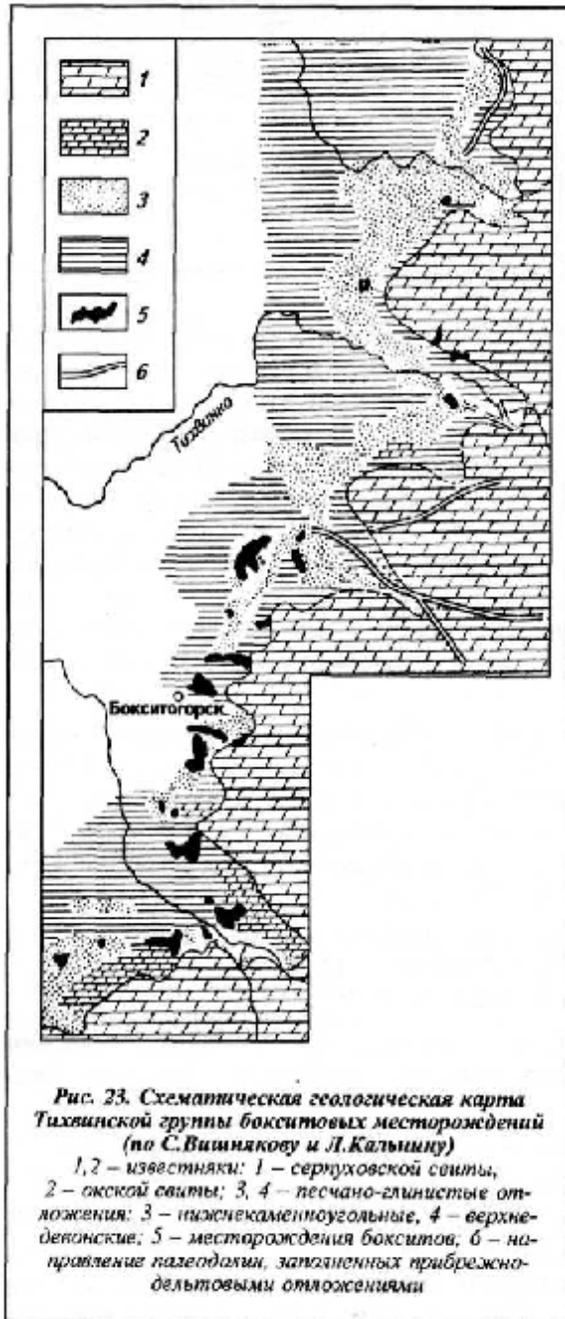
Бокситоносные осадки несогласно залегают на пестроцветных глинах девона и приурочены к средней части тульского горизонта нижнего карбона. Перекрывается бокситоносная толща пестроцветными глинами с линзами песков, в некоторых случаях валунчатыми глинами и другими ледниковыми отложениями или песчано-растительным слоем. На породах тульского горизонта расположены песчано-глинистые породы нижнего карбона с прослоями известняков и редко доломитов, выше - четвертичные глины и суглинки.

Дорудный рельеф развивался на древних отложениях и представляет собой широкую возвышенность, вытянутую в меридиональном направлении и расчлененную долинами рек, широкими и глубокими оврагами. Длина этих долин - от 1 до 7 км, ширина - от 0,1 до 1 км, глубина - 10-40 м.

Промышленные залежи бокситов имеют узкую вытянутую форму с плоской слабо вогнутой или неровной поверхностью кровли и выпуклой вниз подошвой (рис. 23). Глубина залегания бокситов до 100-150 м, но обычно не более 40 м. В поперечном сечении бокситовых залежей, в центральной части, находятся кондиционные бокситы, к периферии они сменяются аллитами (бокситоподобные породы, в которых кремнезем более чем в три раза превышает содержание глинозема) и сиалитами (каолининовые породы, не содержащие свободного глинозема, с близким соотношением глинозема к кремнезему).

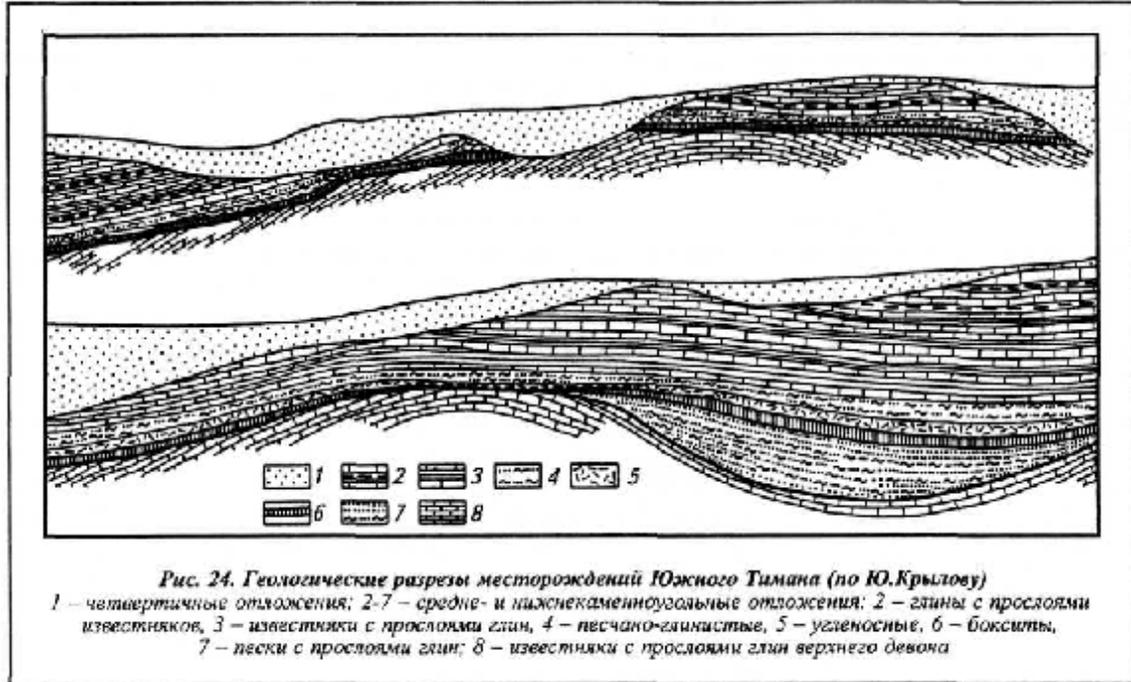
В связи с этим содержание глинозема и оксидов железа постепенно увеличивается, а кремнезема уменьшается - от периферии к центру залежи. Исходным материалом при формировании бокситов служила кора выветривания девонских глин.

Бокситы характеризуются красновато-коричневой окраской, почти полным отсутствием слоистости, слабой сортировкой обломочного материала, большим количеством растительных остатков и вторичного кальцита. Среди бокситов выделяют каменистые, рыхлые и глинистые разновидности. По текстурным признакам среди них различают: обломочные, оолито-бобовые и тонкодисперсные (пелитовые). По минеральному составу бокситы относятся к гиббейт-бемит-каолининовому типу. Они содержат (в % мас): Al_2O_3 - 36-49; SiO_2 - 11-18; Fe_2O_3 - 10-19. Отношение глинозема к кремнезему (кремневый модуль) по отдельным месторождениям изменяется от 2,8 до 4,1. Запасы бокситов - 148 млн т.



Южно-Тиманская группа месторождений. В этом районе наиболее древними образованиями являются карбонатные и сланцевые породы метаморфической серии рифейского возраста, на которых с резким угловым несогласием почти горизонтально залегают песчано-глинистые и карбонатные (известняки, доломитизированные известняки и доломиты) породы девонской, каменноугольной и пермской систем, почти повсеместно перекрытые четвертичными суглинками и супесями. Бокситы связаны с терригенными отложениями тульского горизонта нижнего карбона (рис. 24).

Они залегают на карбонатных и карбонатно-глинистых породах верхнего девона или на их делювии, а перекрываются карбонатными отложениями визейского возраста мощностью до 70 м. Иногда бокситовые залежи встречаются и в карстовой полосе, развитой в известняках, имеют вытянутую форму с извилистой нижней поверхностью пласта.



Рудные залежи значительны по площади, но маломощны (до 2-5 м). На отдельных участках в разрезе встречены два-три пласта бокситов и связанных с ними пород. В основании бокситосодержащих пород залегают грубообломочные аллиты и бокситы, в средней части – пелитовые бокситы, в верхней – оолито-бобовые обломочные аллиты и каолиновые глины с примесью углефицированной растительности. Такое строение разреза объясняется тем, что по мере заполнения впадин бокситовым материалом происходили локальные просадки, сопровождающиеся повторением ритма осадочных пород, который заканчивался заболочиванием и накоплением углефицированной растительности.

По минеральному составу бокситы относятся к каолинит-гиббсит-бёмитовому и каолинит-бёмитовому типам; первый из них развит в северо-западной, а второй – в юго-западной частях района. По литологическим особенностям выделяются аргиллитоподобные и каменистые разновидности, обладающие серой окраской, массивной, брекчиевой и оолитовой текстурами; менее распространены глинистые серовато- и желтовато-белые бокситы. Пелитовая и метаколлоидная структура в средней части пласта вниз и вверх по разрезу сменяется оолито-бобово-обломочной.

По химическому составу бокситы высокоглиноземистые, высококремнистые, маложелезистые и часто высокосернистые. Они содержат (в % мас): Al_2O_3 - 47-54; SiO_2 - 12-28; Fe_2O_3 - 4-13; S - 0,4-3; кремневый модуль изменяется от 2,6 до 3,2. Запасы бокситов - 74 млн т.

Амангельдинская группа месторождений расположена в восточном борту Тургайского прогиба. В состав группы входят пять месторождений бокситов – Аркалыкское и др. Палеозойский фундамент сложен дислоцированными породами докембрия и палеозоя, прорванными каледонскими гранитоидами. Центральная часть района сложена песчано-глинистыми и карбонатными породами среднего и верхнего девона и нижнего карбона. На породах фундамента развита древняя кора выветривания мощностью до 60 м. На последней залегает бокситоносная свита палеоцен-эоценового возраста, представленная в нижней части песчано-глинистыми отложениями, на которых расположены каменистые, рыхлые, сухаристые и глинистые бокситы, фациально сменяющиеся гиббситсодержащими каолиновыми глинами. На

бокситоносной свите залегает толща палеогеновых песков, песчаников, глин и суглинков.

Залежи бокситов залегают на склонах депрессий, приуроченных к контакту алюмосиликатных пород с карбонатными. Большая часть бокситовых залежей относится к контактово-карстово-котловинному типу. Бокситы и генетически связанные с ними огнеупорные гиббситсодержащие каолиновые глины залегают от поверхности до глубины 100 м. Они расположены в виде непрерывной цепочки обособленных горизонтальных и слабонаклонных рудных залежей линзообразной формы с неправильными извилистыми очертаниями в плане.

Бокситы представлены каменистыми, рыхлыми, сухаристыми и глинистыми разновидностями красновато-коричневой окраски. Основные рудообразующие минералы бокситов - гиббсит, гематит и каолинит, второстепенные - галлузит, кварц, гетит, рутил, гипс, кальцит. Химический состав бокситов характеризуется значительными колебаниями компонентов (в % мае): Al_2O_3 - 28-60 (в среднем 42-57); SiO_2 - 2-20 (в среднем 10-15); Fe_2O_3 - 0,5-30 (в среднем 11-16). Запасы бокситов -270 млн т.

ОСАДОЧНЫЕ ГЕОСИНКЛИНАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Приурочены к срединным и окраинным частям геосинклинальных прогибов, к зонам сочленения последних с платформами. Они встречаются главным образом в перегибах, тяготеющих к краевым частям крупных антиклинорий и срединных массивов, которые в период бокситообразования представляли собой острова или значительные по площади участки суши. Образовались они в мелководных условиях во время перерывов в накоплении морских осадков и всегда располагаются выше поверхности несогласия. Часто бокситы залегают на закарстованной поверхности рифогенных известняков. Карстовые полости явились ловушками, благоприятными для накопления бокситов и сохранения их от последующего размыва.

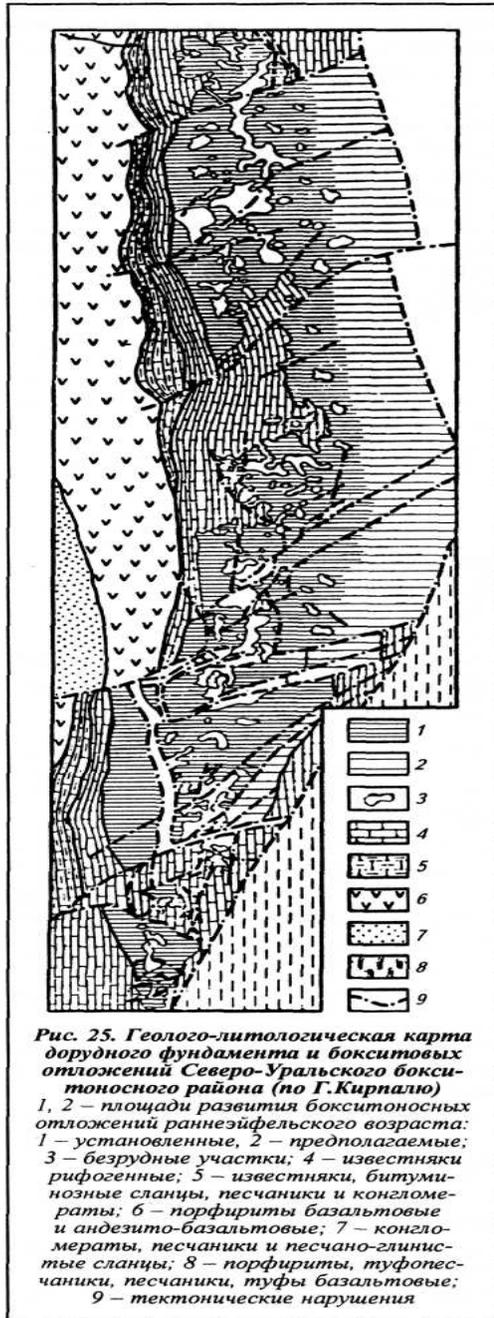
По направлению к центрам депрессий и выступам дорудного рельефа бокситы выклиниваются, постепенно переходя в пестроцветные глины или расчлняясь на несколько прослоев. Бокситовые пласты и вмещающие породы обычно смяты в складки и метаморфизованы.

Источником для образования бокситов были коры выветривания приподнятых основных эффузивов, сланцев и других пород, расположенных вблизи карстовых полостей.

Бокситы геосинклинальных областей характеризуются высоким и выдержанным качеством. Среди них преобладают диаспор-бёмитовые, диаспоровые и бёмитовые разновидности, а слабо-дислоцированные месторождения содержат гиббсит. Месторождения этого типа развиты в Северо-Уральском, Южно-Уральском, Салаирском и Боксонском бокситоносных районах России, в Венгрии, Греции, Франции, Югославии, Гаити, Доминиканской Республике, Ямайке.

Северо-Уральский бокситоносный район (СУБР). В этом районе известны (с севера на юг) Ивдельская, Северо-Уральская и Карпинская группы месторождений. Северо-Уральская группа СУБРа состоит из месторождений Красная Шапочка, Кальин-ское, Ново-Кальинское, Черемуховское, Сосьвинское и Всеволодо-Благодатское. Они приурочены к плоской меридионально вытянутой депрессии, сложенной известняками и сланцами среднего силура-девона. Бокситы залегают на размытой, закарстованной поверхности известняков нижнего девона. Кровля бокситов ровная, представлена битуминозными известняками и мергелями (рис. 25). В пределах бокситоносной полосы развиты крутопадающие сбросы и взбросы с амплитудой смещения до 200-400 м. Залежи бокситов пластообразной формы с падением на восток под углами 25-45°. По минеральному составу бокситы относятся к диаспоровым и к диаспор-бёмитовым. Текстура бокситов слоистая и бобовая. Красные бокситы

характеризуются высоким качеством и содержат (в % мас): Al_2O_3 - 53-55; SiO_2 - 2-6; Fe_2O_3 - 23-25; CaO - 1,6-2,5 (с глубиной возрастает); S - 0,1-0,4 (до 1 %). Запасы разведанных месторождений - 185 млн т.



Месторождения о. Ямайки. Бокситовые месторождения острова расположены на известняках среднеэоцен-раннемиоценового возраста, которые несогласно залегают на меловом нижнеэоценовом фундаменте. Наиболее интенсивное карстообразование происходило в среднемиоценовое время, тогда же начался главный этап формирования бокситовых залежей.

Крупные залежи бокситов приурочены к обширным вытянутым, чаше- и котловинообразным депрессиям на полях развития известняков. Иногда они приурочены к зонам тектонических нарушений, где происходит более интенсивное карстообразование. Небольшие залежи образуют воронки, трубки и полости неправильной формы на склонах кавернозных известняковых поднятий. Бокситы

расположены выше уровня грунтовых и карстовых вод, перекрыты маломощным почвенным слоем.

Всего на острове выявлено более 100 промышленных бокситовых залежей. Размеры их изменяются в широких пределах - от мелких карманов до гигантских тел протяженностью до 30 км. Мощность рудных тел - от нескольких десятков сантиметров до 30 м. Средняя промышленная мощность - 3-10 м.

По минеральному составу бокситы бёмит-гиббситовые (1:3) с гематитом, гетитом, каолинитом и галлуазитом. Цвет их обычно красный, красновато-бурый и желтовато-бурый. Они плотные или землистые. Среднее содержание основных компонентов в бокситах (в % мас): Al_2O_3 - 45-50; SiO_2 - 0,5-3,5; Fe_2O_3 - 17-23; P_2O_5 - 0,3-2. Высокое содержание оксидов железа и фосфора не позволяет относить их к высококачественным. Однако большие запасы бокситов (общие около 1 млрд т), залегание их вблизи от поверхности земли способствуют их промышленному использованию.

НЕБОКСИТОВОЕ АЛЮМИНИЕВОЕ СЫРЬЕ

Месторождения небокситового алюминиевого сырья делятся на пять генетических групп:

- 1) *магматическую* (нефелиновые - уртитовые, апатит-нефелиновые, сынныритовые руды);
- 2) *гидротермальную* (алунитовые руды);
- 3) *экзогенную* (каолиновые глины, высокоглиноземистые аргиллиты, высокожелезистые аллиты и латериты, давсонитсодержащие, алюмофосфатные и цеолитсодержащие породы, углестые и битуминозные сланцы, анальцимовые песчаники и другие высокоглиноземистые осадочные породы);
- 4) *метаморфическую* (высокоглиноземистые сланцы - кианитовые, андалузитовые, силлиманитовые, ставролитовые и др.; железо-алюминиевые метаморфизованные руды);
- 5) *геотехногенную* - отходы металлургических и горнодобывающих предприятий (хвосты обогащения углей; золы углей теплостанций; красные шламы, образующиеся при переработке бокситов; серицитсодержащие хвосты обогащения и другие отходы при переработке руд черных, цветных металлов и химической промышленности).

Нефелиновые руды - второй после бокситов по промышленному значению вид алюминиевого сырья. Месторождения апатит-нефелиновых руд, уртитов и нефелиновых сиенитов, перспективные для использования в глиноземной промышленности, известны во многих районах России (Кольский п-ов, Кузнецкий Алатау, Витимское нагорье, Северное Прибайкалье, Забайкалье и др.) Требования промышленности к качеству нефелиновых руд определяются содержанием основных компонентов (в % мас): $Al_2O_3 > 22,5$; $SiO_2 < 45$; $Na_2O + K_2O > 9,5$; $Fe_2O_3 < 7$.

Уникальные **месторождения калий-глиноземных пород (сынныритов)** известны на севере Забайкалья (Калюминское, Трехглавое и др. в Бурятии, Ханинское и др. в Читинской обл.). Комплексная переработка сынныритов позволит получать глинозем, поташ, нитрат и метасиликат калия в условиях практически безотходного производства.

Алунитовые руды формируются в областях молодого вулканизма в результате воздействия вулканических сернистых газов и растворов, обогащенных серной кислотой, на вмещающие вулканические алюмосиликатные породы. Они образуют пласто- и чашеобразные залежи. Известны на Кавказе, в Закарпатье, Казахстане, Средней Азии и Приморье. Руды, которые не требуется обогащать, должны содержать более 50 % алунита и менее 10 % глинистых минералов (в пересчете на каолинит).

Для руд, нуждающихся в обогащении, содержание алунита должно быть более 25 %, при обязательном его извлечении в концентрат - более 75 %, а каолинита в руде должно быть менее 5 %.

Крупнейшие запасы **кианитовых сланцев** разведаны на Кольском п-ове, где они могут разрабатываться открытым способом. Месторождения силлиманитовых сланцев имеются в Карелии, на Урале, в Иркутской обл., Бурятии, Красноярском крае и в Казахстане. Кианитовые, силлиманитовые и андалузитовые концентраты, используемые в электротехническом про-изводстве, должны содержать (в % мас): $Al_2O_3 > 54$; $Fe_2O_3 < 1,2$; $TiO_2+ZrO_2 < 2$; $CaO < 0,8$; $K_2O+Na_2O < 1,6$.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Наиболее благоприятные условия для образования бокситовых месторождений в рамках геологического цикла возникали дважды: на ранней стадии геосинклинального этапа (осадочные геосинклинальные месторождения), и в платформенный этап (латеритные и осадочные месторождения).

Главнейшими эпохами бокситообразования для России являются девонская, каменноугольная, меловая и палеогеновая, а для зарубежных стран - палеогеновая и неоген-четвертичная.

В девонскую эпоху сформировались наиболее высококачественные бокситы осадочных геосинклинальных месторождений Северного Урала и Салаира, а также платформенные Средне-Тиманского района. В раннекаменноугольную эпоху бокситообразование охватило краевые части Восточно-Европейской платформы, и были сформированы осадочные месторождения в Северо-Онежском, Южно-Тиманском и Тихвинском районах, а также латеритные (остаточные) месторождения в Белгородском бокситоносном районе КМА.

В течение меловой и палеогеновой эпох осадочное бокситообразование происходило почти непрерывно как на платформах, так и в геосинклиналях на территории России (Украинский щит, Тургайская, Южно-Сибирская и Центрально-Сибирская провинции и др.) и ряда зарубежных стран (Венгрии, Югославии, Греции, Италии, Франции, Турции, Австралии, Северной и Южной Америки).

В неоген-четвертичную эпоху сформировались главнейшие латеритные бокситовые месторождения (95 % запасов зарубежных стран) - экваториальной Африки, Австралии, Индии, Доминиканской Республики, Гаити, Гайаны, Суринама и Ямайки.

ЗОЛОТО

Как драгоценный металл золото добывали и использовали с древних времён. Украшения из золота (ожерелья, сережки, подвески и др.), изготовленные из сплюснутых самородков, найдены в культурных слоях неолита (5-4 тыс. лет до н.э.).

Современные области применения золота разнообразны. Подавляющая часть добываемого золота хранится в виде слитков в национальных банках государств и служит обеспечением и валютой при международных платежах и расчетах. Золото применяется для изготовления ювелирных изделий и чеканки монет. Золото активно используется промышленностью: золочение металлов, сварка особо ответственных деталей, изготовление химически стойкой аппаратуры, радиоэлектроника. Наконец, золото применяется в медицине (стоматология).

Запасы золота в зарубежных странах оцениваются в 83,6 тыс. т. Из них на долю ЮАР приходится 47 %, США - 11, Бразилии и Канады - по 5, Китая - 2,5 %.

Основным геолого-промышленным типом в зарубежных странах являются осадочно-мета-морфогенные месторождения докембрийских золотоносных конгломератов (40 % выявленных ресурсов золота). Второе место занимают золотоносные меднопорфировые месторождения (15 %), третье - золоторудные месторождения в докембрийских зеленосланцевых поясах (10), четвертое - эпитермальные золото-серебряные месторождения (9), пятое - россыпи (4-5). В России большое значение имеют россыпные, эндогенные гидротермальные и метаморфогенно-гидротермальные месторождения золота.

В настоящее время добыча золота производится в 84 зарубежных странах мира, где в последние годы добывается около 2000 т ежегодно. При этом 81,2 % суммарной добычи в зарубежных странах приходится на ЮАР, США, Австралию, Канаду, Китай, Узбекистан, Бразилию и Папуа-Новую Гвинею. В России в 1994 г. было добыто 142578 кг золота.

Требования промышленности к месторождениям золота определяются прежде всего содержанием металла, масштабами (запасами) и качеством руд. Промышленными считаются коренные месторождения с содержанием золота в рудах 1-5 г/т и более (в зависимости от масштабов и типа месторождения) и россыпи с минимальным содержанием 0,1 г/м³.

Качество золота определяется его пробностью - содержанием золота в 1000 единицах по массе. В золоте содержится свыше 40 элементов-примесей, в том числе Ag, платиноиды, Cu, Fe, Pb, Bi, Sb. При аффинаже золота указанные и другие ценные примеси улавливаются. Пробность золота обычно возрастает от низкотемпературных к высокотемпературным месторождениям, от молодых по возрасту к древним и от малоглубинных к глубинным.

По масштабам коренные месторождения разделяются на весьма крупные (100 т и более), крупные (50-100), средние (10-50) и мелкие (менее 10). Для россыпного типа весьма крупными являются месторождения с запасами золота 50 т и более, крупными - 25-50, средними - 1-25, мелкими - менее 1 т.

Цены на золото на мировом рынке колеблются. В 1994 г. грамм золота стоил 12,39 дол, в 2008 - 14,5 г/дол.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

В земной коре золото находится в состоянии широкого рассеяния. Общий кларк его $4,5 \cdot 10^{-7}$ % (4,5 мг/т). Золото имеет высокий коэффициент концентрации - 2000. Стабильный изотоп один - ¹⁹⁷Аи. Валентность золота 1⁺ и 3⁺, более устойчивы соединения трехвалентного золота, в которых оно образует комплексные анионы.

В эндогенных процессах золото скорее всего имеет подкоровое происхождение, о чем свидетельствует его высокий кларк в мантийных породах основного ряда.

Однако эндогенные месторождения часто связаны с гранитоидами. Отсюда можно предположить, что первоначально золото было привнесено в древние бассейны осадконакопления глубинными растворами и расплавами, затем в процессе формирования земной коры происходила его концентрация в коровых очагах гранитной магмы. Золото обособляется в постмагматических продуктах в форме тиосульфатных $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)^{3-}$ и хлоридных (AuCl_2^{2-} и AuCl^{4-}) комплексных водных растворов.

Золото имеет тесное сродство с серебром и медью, с которыми оно образует твердые растворы и интерметаллиды. В природных процессах золото, серебро и медь ассоциируют с двумя плеядами элементов - ближайших "соседей" по таблице Менделеева. С одной стороны, это Ni, Pt, Pd, Os и Fe, связанные с основными магмами, с другой - Zn, Hg, Pb, Bi, концентрирующиеся в кислых и средних магмах. Отсюда понятно присутствие золота как в медно-никелевых, так и в свинцово-цинковых месторождениях.

В экзогенных условиях происходит высвобождение золота из пород и руд и его накопление в зонт окисления некоторых сульфидных месторождений (в железных шляхах) и в россыпях.

Метаморфизм может приводить к перераспределению и концентрации золота в виде весьма крупных месторождений. Значительную роль при этом играют флюидно-метаморфические процессы, которые происходят в зонах динамометаморфизма среди черносланцевых толщ, обогащенных золотом, и в зеленокаменных поясах. При метаморфизме древних россыпей образуются золотоносные конгломераты

Главный минерал золоторудных месторождений - самородное золото. Оно образует обособления в виде прожилков, зерен, пленок, дендритов, реже кристаллов и их агрегатов. Выделяется тонкодисперсное золото (до 10 мкм), мелкое (до 0,1 мм), среднее (до 1 мм), крупное (до 5 мм) и самородки (более 5 мм или 10 г по массе). Другие золотосодержащие

минералы, как правило, не являются промышленными. К ним относятся интерметаллические соединения: электрум AuAg , аурикуприд AuCu_3 , аурустибит AuSb_2 , родит $\text{Au}(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pd})$, кюстелит $\text{Ag}(\text{Au})$ и теллуриды - калаверит AuTe_2 , сильванит $(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_4$, креннерит $(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$, петцит Ag_3AuTe_2 и другие.

Главными золоторудными провинциями России в настоящее время являются Сибирь, Якутия, Северо-Восток, Приамурье, Приморье (рис. 91).

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Наиболее важное промышленное значение имеют следующие типы месторождений: скар-новые, плутоногенные гидротермальные, вулканогенные гидротермальные, метаморфогенные, осадочно-метаморфогенные, месторождения выветривания и россыпные.

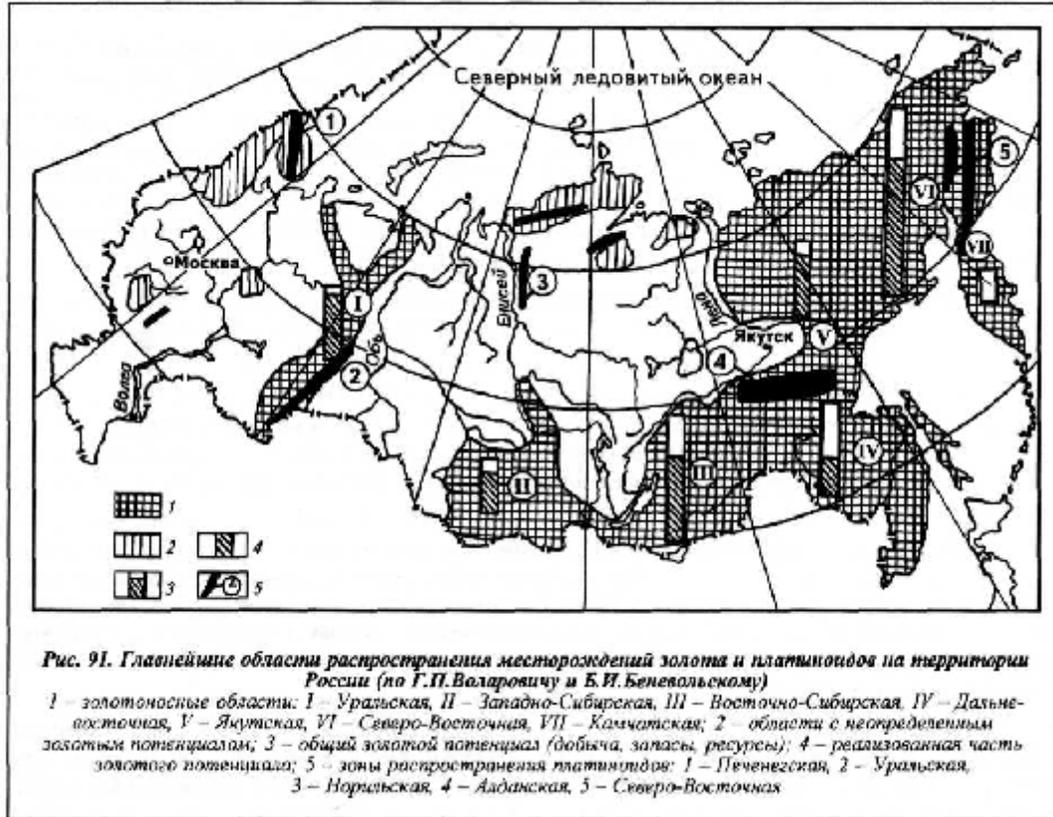
СКАРНОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Скарновые месторождения золота отличаются небольшими запасами. На территории России они известны в Сибири (Ольховское), на Алтае, распространены в Канаде (Никел-Плейт), США (Кейбл, Элекхорн), Афганистане (Заркашан), Мексике (Санта-Фе), Китае (Холдон, Суаин). Наиболее крупными являются месторождения Никел-Плейт и Холдон.

Скарново-золоторудные месторождения залегают в терригенных и вулканогенно-терригенных толщах среди карбонатных горизонтов, прорванных поздне- и посторогенными ма-лыми интрузиями от гранитного до габбро-диоритового состава. Наиболее благоприятными вмещающими породами являются доломиты, доломитизированные известняки, магнези-ально-тальковые сланцы. Строение рудного

поля часто определяют разломы, контролирующие размещение наложенного на скарны золотого оруденения. Скарны имеют гранат-пироксеновый состав. В железистых разностях скарнов наблюдается обильная вкрапленность оксидных и сульфидных минералов, в том числе золотосодержащих.

Никел Плейт (Канада, провинция Британская Колумбия) находится на пологом (20°) западном крыле антиклинали в толще известняков и известковистых аргиллитов с горизонтами ту-фов и кварцитов (рис. 92). Толща пересечена пучком разломов северо-западного простирания с падением на юго-запад. Взбросовые перемещения сопровождалась образованием приразломных складок. В этом сложном тектоническом узле произошло внедрение серии силлов габбро, габбро-диоритов, авгитовых диоритов и образование пологой скарновой залежи. Последняя постепенно переходит в окварцованные, а затем неизменные известняки.



Рудные тела локализуются в скарнах и окварцованных известняках. Главное рудное тело с невысоким содержанием золота представляет собой пологую линзообразную залежь запад-северо-западного простирания, которая разветвляется на флангах. Протяженность залежи в плане 700 м, по падению 300 м при мощности 35 м. Руды представлены густой вкрапленностью (до 50 %) сульфидов, среди которых преобладает арсенопирит, присутствуют пирит, сфалерит, халькопирит. Содержание золота 13,5 г/т.



Ольховское рудное поле расположено в Сибири (Восточный Саян). Рудное поле сложено известняками, доломитами, песчаниками, глинистыми сланцами, туффитами нижнего и среднего кембрия. Породы собраны в крупные сжатые складки широтного простирания. Прорваны гранитами, плагиигранитами, гранодиоритами, габбро-диоритами ордовикского возраста, которые образуют Ольховский интрузивный массив и серию даек.

Рудоносные скарны формировались вдоль северного выступа гранитного массива в тектоническом блоке, ограниченном разломами запад-северо-западного простирания (рис. 93). В зоне контакта золоторудные тела имеют форму линз, труб, столбообразных залежей (в скарнах и карбонатных породах) или образуют жилы и прожилки (в роговиках и гранитах).

Среди сульфидных руд выделяются пирротиновый, пиритовый и кварц-сульфидный типы. Вместе с самородным золотом выделялись теллуриды золота, серебра и висмута. Жильные минералы представлены кварцем и карбонатами. Золото тонко распылено в сульфидных рудах и жильных минералах в виде неправильных, комковатых, проволочных агрегатов размером 0,05-3 мм. Околорудные изменения представлены березитизацией кислых пород, окварцеванием, хлоритизацией, серицитизацией основных пород и серпентинизацией известняков.

ПЛУТОНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Гидротермальные месторождения золота широко распространены. Большая часть относится к средним и мелким по запасам, хотя встречаются и крупные золоторудные объекты.

Гидротермальные месторождения Au характерны практически для всех золотоносных провинций России и СНГ. Наиболее крупные объекты находятся на Северо-Востоке, в Якутии, Забайкалье, Восточном Саяне, на Урале. Известными зарубежными гидротермальными месторождениями с запасами от 500 до 1200 т золота являются Колар (Индия), Крипл-Крик, Сильвертон, Хоумстейк (США), Хемло, Керкленд-Лайк (Канада), Бендиго (Австралия). К весьма крупным относится также месторождение Мурунтау в Узбекистане.



Из рассмотренных геохимических особенностей золота следует, что его гидротермальные месторождения могут быть связаны с разнообразным по составу магматизмом. Наиболее многочисленной является группа месторождений, имеющих парагенетическую связь с малыми интрузиями кислого-среднего состава. Они формируются на завершающих стадиях развития складчатых поясов или на этапах тектоно-магматической активизации древних тектонических зон земной коры. Часто такие месторождения приурочены к очагово-купольным структурам с магматизмом от габбро-диоритового до граносиенитового состава, что характерно, например, для Забайкальской провинции со среднетемпературными золото-сульфидными месторождениями.

По составу руд выделяются следующие главные рудные формации золотых месторождений: золото-кварцевая, золото-сульфидная и золото-кварц-сульфидная.

Процесс гидротермального рудообразования отличается многостадийностью; золотоносными являются обычно средние и поздние рудные стадии.

Золото-кварцевая формация

Мурунтау (Узбекистан). Месторождение расположено в верхней части разреза позднепротерозойско-раннепалеозойской толщи осадочно-метаморфических пород, среди тонкопесчаников, алевролитов, песчаников и филлитов. В северной части рудного поля находится протяжённая (7 км) субширотная зона даек плагиогранит и сиенит-порфиров.

Месторождение находится в пределах двух складчатых структур - Мурунтауской антиклинали и Южной синклинали, нарушенных несколькими разломами.

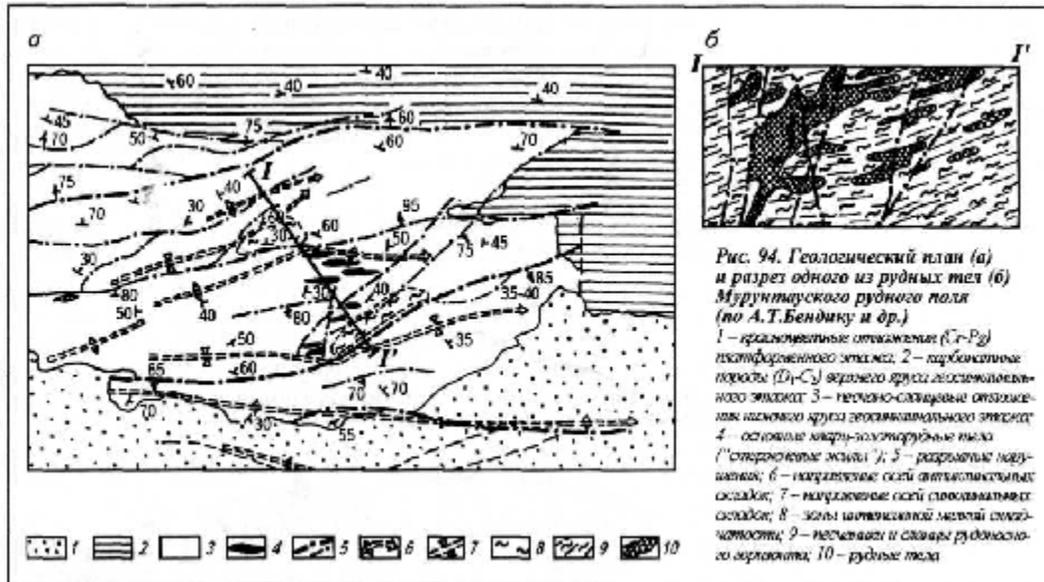
Рудное поле представляет собой рудный штокверк, приуроченный к этому сложному тектоническому узлу. В составе крупного штокверка имеются три главные рудные залежи и ряд более мелких (рис. 94). Залежи состоят из круто- и пологопадающих кварцево-жильных и прожилковых зон. Крутопадающие зоны имеют

размеры в раздувах до 15-20 м и характеризуются высоким содержанием золота. Примыкающие к ним пологие согласные со слоистостью зоны отличаются более низким содержанием металла и сложным его распределением.

Рудная минерализация представлена пиритом и арсенопиритом, встречаются сфалерит, га-ленит, висмутин. Среднее содержание сульфидов - 0,5-1,5 %. Жильная минерализация представлена кварцем с небольшим количеством микроклина, биотита, кальцита и альбита.

Золото образует мелкие, тонкодисперсные выделения в кварце или в катаклазированных участках сульфидов и встречается в виде коротких прожилков, округлых зерен и дендритов. Примеси - серебро, медь, висмут, свинец, мышьяк.

В пределах всего рудного штокверка развито ороговикование. Рудные зоны внутри штокверка характеризуются кварц-микроклиновыми изменениями вмещающих пород.



В первый этап рудообразования формировался жильный кварц, во второй - кварц-сульфидный этап, проявились кварцевая, пирит-арсенопиритовая и пирит-турмалиновая стадии. Третий - золото-полиметаллический этап - включает кварцевую и золото-полиметаллическую стадии.

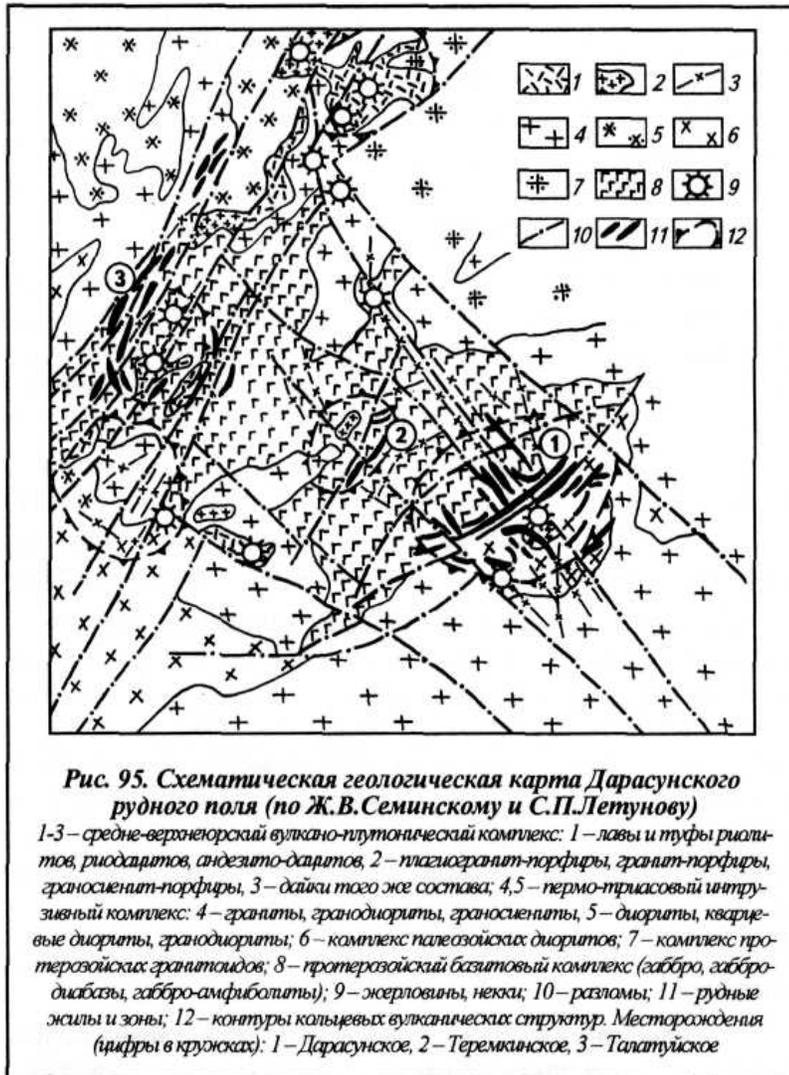
Золото-кварц-сульфидная формация

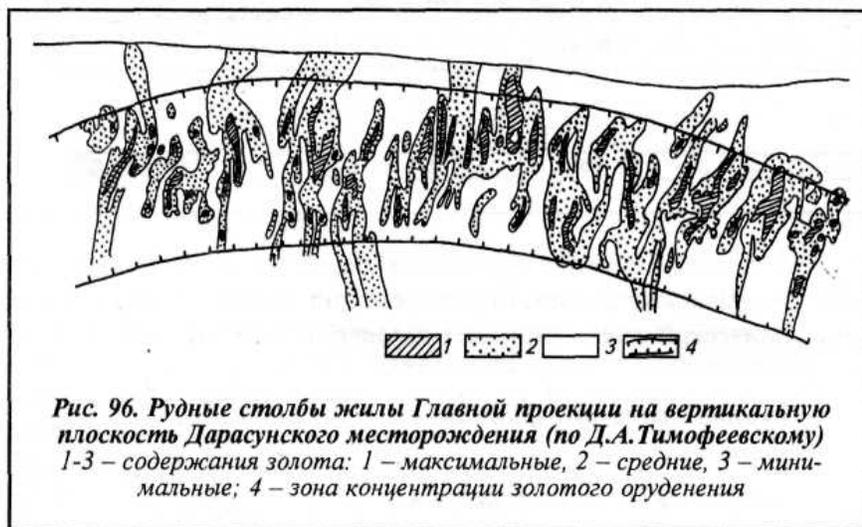
Дарасунское месторождение (Восточное Забайкалье). Рудное поле включает три месторождения - Дарасунское, Теремкинское и Талатуйское. Они формировались в пределах единой крупной очагово-купольной структуры длительного развития. Центральную часть площади занимают породы габбро-диорит-амфиболитового комплекса (протерозой - ранний палеозой), гранитизированные в палеозойское время. Эти породы составляет структурную основу очагово-купольной постройки (рис. 95). По периферии распространены диориты, габбро-диориты, гранодиориты, граниты и аплиты палеозойского возраста. Отдельные массивы (гранит-сиенитовый и гранит-гранодиоритовый комплексы) имеют пермо-триасовый возраст.

Обособленную группу составляют средне-верхнеюрские вулканоплутонические породы: порфиры, трахириолиты, дациты, андезиты, их кластолавы и брекчии. Породы этого ком-плекса распространены в пределах всего рудного поля в виде небольших субвулканических, экструзивных и дайковых тел. Ими также сложены сохранившиеся от эрозии жерловые постройки и связанные с ними лавовые поля.

Рудное поле вытянуто на северо-запад, вдоль регионального Дарасунского разлома, и расширяется в узле пересечения его с Жарча-Восходнинской зоной разломов северо-восточного простирания. Дарасунское месторождение расположено в юго-восточной части площади. Центром его является субвулканическая интрузия плагиогранит-порфиоров. На площади 5x3 км здесь выявлено более 250 кварц-сульфидных жил. Наиболее протяженными являются радиальные и секущие жилы северо-восточного (Ново-Кузнецовская, Главная, Свинцовая) и северо-западного простирания. Другая группа жил формировалась в концентрических или конических разломах. Жилы характеризуются наличием пережимов, часто они пересекаются и изгибаются по простиранию и падению.

Внутреннее строение жил характеризуется концентрацией золота в пределах рудных столбов и гнезд (рис. 96), которые вытянуты по простиранию жил вблизи поверхности.





Месторождение Колар (Индия) находится в пределах узкого (4,5-6,5 км) пояса метавулкани-тов, протягивающегося в субмеридиональном направлении на 80 км (рис. 97). Пояс представляет собой глубоко-проникающую синклиналиную складку, центральную часть которой занимают в основном амфиболиты. Складка разбита косесекущими разломами, вдоль которых развиваются наложенные более мелкие складки.

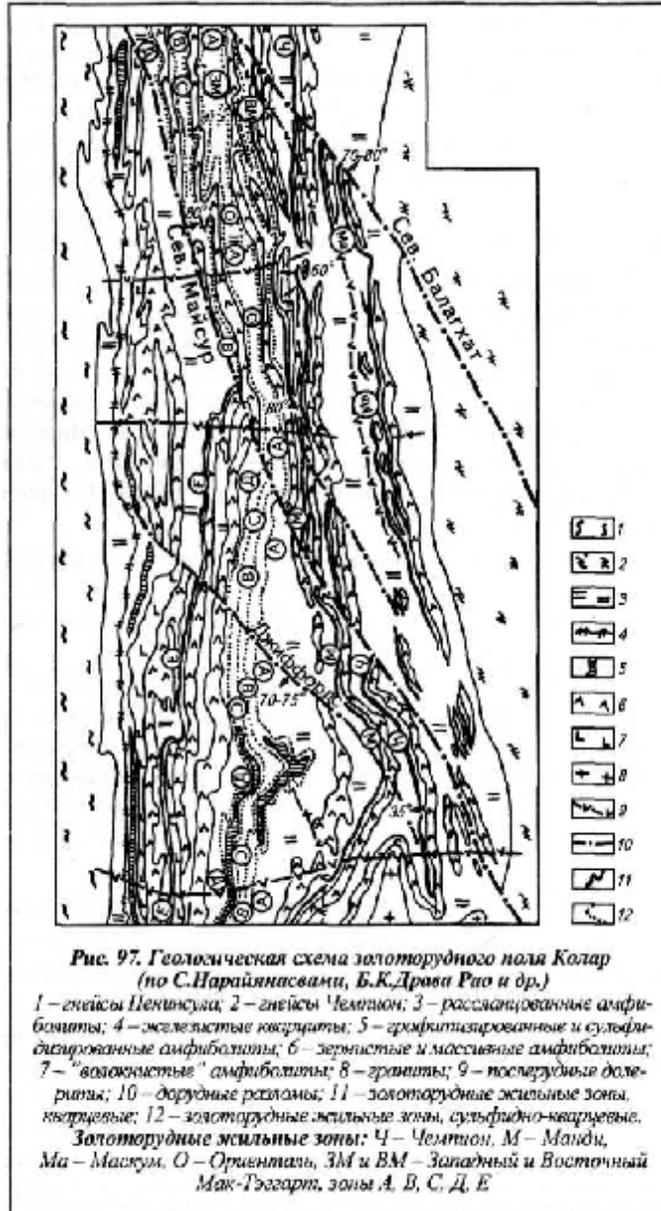
Золото концентрируется в пределах жил и жильных зон, локализующихся вдоль лежащего бо-ка разлома Майсур, который имеет главное рудоконтролирующее значение. Всего установлено 26 таких рудных зон, но 3/4 добытого металла приходится на жильную зону Чемпион. Она имеет согласное со слоистостью или более крутое падение (около 60°). Отдельные жилы и жильные зоны протягиваются с перерывами на 20 км при мощности 1-8 м. Промышленные руды в них проявлены только между разломами Майсур и Балагхат. Оруденение концентрируется в рудных столбах, количество которых уменьшается с глубиной (рис. 98). По форме это линзы, жилы, тела неправильной конфигурации мощностью до 1,2 м. В зонах расланцевания и мелкой складчатости линейные жильные тела рудных зон трансформируются в согласные со складчатостью седловидные жилы.

Установлены две минеральные разновидности руд: золото-сульфидно-кварцевая (в центре рудного поля) с количеством сульфидов до 10 % и средним содержанием золота 4-6 г/т; золото-кварцевая (в восточной части) с количеством сульфидов до 1 % и содержанием золота 10-15 г/т. Наиболее широко распространены рудные минералы пирротин и арсенопирит, главным жильным минералом является кварц. Кроме того, встречаются пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, шеелит, а также диопсид, тремолит, эпидот. Золото имеет высокую пробу - 900. Оно находится в сростании с теллуридами (калаверит, гессит, алтаит).



Зона околорудных изменений имеет мощность от нескольких сантиметров до 15 м и характеризуется зональным строением. От контакта к периферии наблюдается оторочка диопсида, зона амфиболов и эпидотов, широкая зона кварц-биотитовых метасоматитов.

Золото на месторождении начали добывать 1000 лет до н.э. из окисленных руд. Подземная добыча ведется с 1880 г., всего получено около 850 т золота. Глубина шахтных выработок достигла 3500 м



ВУЛКАНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К этой группе относятся месторождения вулканических поясов, связанные с вулканитами да-цит-андезит-риолитового ряда. Обычно это близповерхностные золото-серебряные, золото-теллуридные и золотые руды, локализующиеся в вулканических постройках (палеокальдерах, вулканокупольных структурах). Такие месторождения встречаются в Охотско-Чукотском вулканическом поясе, в вулканических постройках Скалистых гор (США). Это обычно низкотемпературные месторождения со сложным составом руд и значительными концентрациями Ag.

Наконец, золотосодержащие колчеданные и полиметаллические (реже собственно золотые) месторождения гидротермального генезиса ассоциируют с базальтоидными вулканоплутоническими комплексами (Урал). Встречаются также месторождения золота, связанные со щелочными и субщелочными интрузиями (Центральный Алдан).

Основные рудные формации месторождений этого типа - золото-кварц-халцедон-сульфидная, золото-серебро-кварц-адуляровая, золото-сульфидная и другие.

Продуктивными являются докембрийская, каледонская, герцинская, киммерийская и альпийская эпохи. На территории России наиболее распространены гидротермальные месторождения золота двух эпох - герцинской (Урал, Алтай) и киммерийской (Забайкалье, Северо-Восток, Якутия, Дальний Восток).

Золото-кварц-халцедон-сульфидная формация

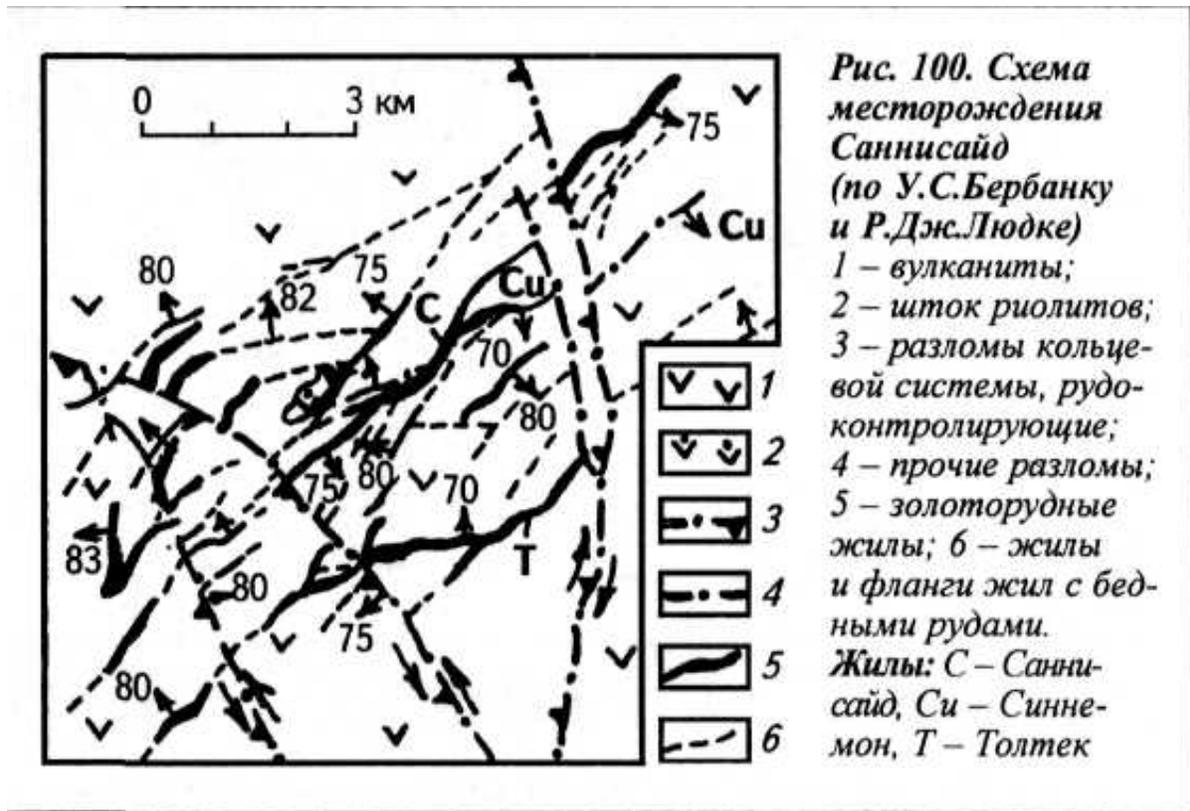
Сильвертон-Теллурид (США) — это рудное поле, которое состоит из нескольких месторождений.

Рудное поле сложено позднемезозойскими вулканическими толщами - лавами и пирокластами дацит-риолитовой и латит-риолитовой формаций; преобладают пепловые туфы кислого состава. Они прорваны гипабиссальными телами риолитов, латит-порфиров и трубообразными телами эруптивных брекчий (рис. 99). В южной части обнажаются породы древнего фундамента - граниты, кристаллические сланцы, гнейсы докембрия.

Характерная особенность рудного поля – приуроченность месторождений к кальдере Сильвертон и грабену Юрика, который расположен в северо-восточной части этой кальдеры. В пределах кальдеры и в ее ближайшем обрамлении выявлено восемь месторождений. Наиболее крупные из них - Саннисайд, Кемп-Берд и Идорадо - локализируются в краевых кальдерных и "закальдерных" разломах.



Месторождение Саннисайд приурочено к пучку радиальных разломов, пересекающих кольцевой сброс Росс Бейсин. Рудные жилы образовались в сколовых разломах северо-восточного простирания. Они имеют резкие изгибы, разветвления, участками переходят в прожилки и штокверки (рис. 100). Наиболее крупная жила месторождения протяженностью 3 км сопровождается множеством апофиз широтного направления.



Балей (Восточное Забайкалье) — это рудное поле, включающее Балейское и Тасеевское месторождения. Они локализируются в пределах Балейского грабена, сформированного в мезозое. Фундаментом рудоносного грабена являются палеозойские гранитоиды, перекрытые в южной и восточной частях порфиритами и туфами средней-верхней юры. Породы фундамента прорваны штоками и дайками диоритовых порфиритов.

Балейский грабен сложен раннемеловыми породами конгломератовой (нижней) и песчано-конгломератовой (верхней) свит общей мощностью 650 м, прорванными отдельными дайко-образными телами вулканических брекчий и окварцованных туфов. Разломы северо-западно-го простирания разделяют грабен на три блока. Центральный блок, наиболее раздробленный разрывами, вмещает промышленное золотое оруденение (рис. 101). Оно контролируется субмеридиональной зоной разломов, которая проходит в центральной части грабена.

Балейское месторождение находится вблизи северного борта грабена. Рудные тела представляют собой маломощные (0,1-0,2 м) короткие жилы, которые контролируются системой близширотных преимущественно пологих зон дробления. Оруденение встречается и в прилегающих к грабену гранитоидах.

Тасеевское месторождение, расположенное у южного борта грабена, отличается приуроченностью жил и жильных зон к протяженным крутопадающим сбросам северо-восточного простирания, пересекающим всю раннемеловую толщу (рис. 102). В породах верхней свиты эти "стволовые" рудные зоны сопровождаются сериями мелких коротких крутых и пологих жил. Слепые крутопадающие кварцевые жилы прослеживаются на 500-1500 м при мощности 1-2 м, в раздувах - 3-4 м.

Рудные жилы имеют часто симметрично-зональное строение, обусловленное чередованием полос кварца и халцедона. В жильной массе встречаются также адуляр, каолинит, карбонаты. Сульфиды (до 0,5 %) представлены пиритом, арсенопиритом, халькопиритом. Золото тонко-дисперсное, отличается высокой серебристостью и примесью Sb, Hg, Se и Te. Пробность золота - 650-750. Золоту постоянно сопутствует

пираргирит, а также блеклые руды. Гидротермальные изменения: серицитизация, окварцевание, адуляризация, каолинизация и карбонатизация. Золото выделялось при температурах 150-270 °С на глубинах 200-150 м.

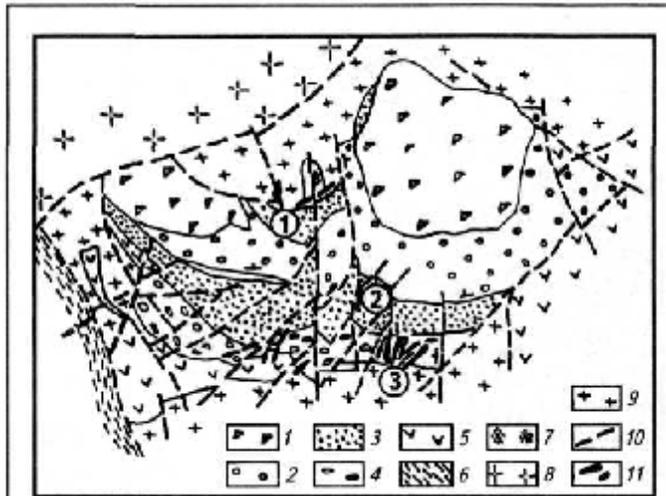


Рис. 101. Структурная схема Балецкого рудного поля
(по В.Г.Халичу и др.)

1 – конгломераты каменной свиты (Ж₁); 2-4 – раннемеловые отложения Балецкой свиты: 2 – конгломерато-песчанниковые, 3 – преимущественно песчанниковые, 4 – конгломератовые; 5 – эффузивные породы итаборской серии (Ж₂₋₃); 6 – кристаллические сланцы (РР); 7 – диориты (Д₁); 8 – граниты борцовского комплекса (М₂); 9 – гранодиориты, диориты удинского комплекса (Р₂); 10 – разрывные нарушения; 11 – золоторудные тела. Месторождения (цифры в кружках): 1 – Балецкое, 2 – Тасеевское, 3 – Нижнее-Кокунское

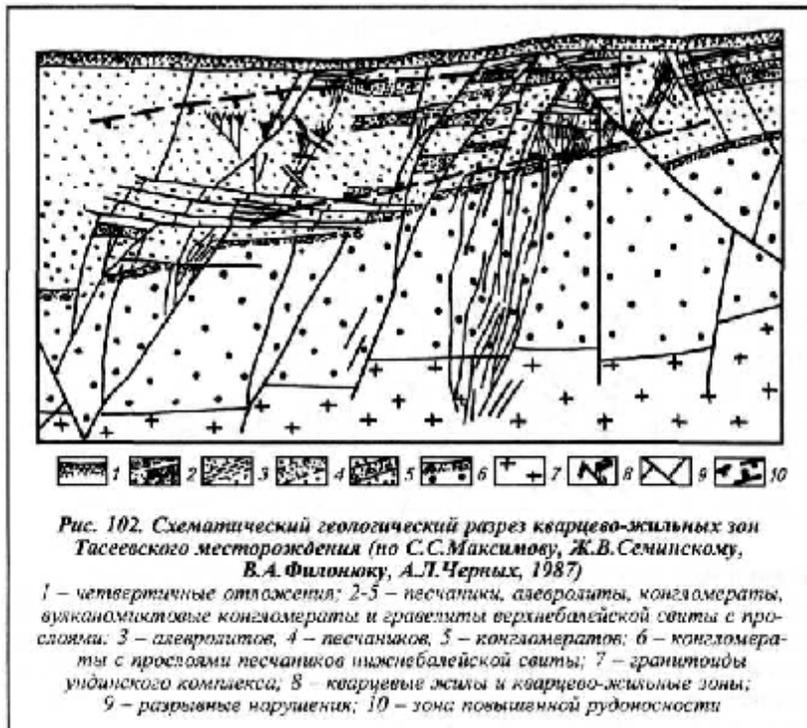


Рис. 102. Схематический геологический разрез кварцево-жильных зон Тасеевского месторождения
(по С.С.Максимову, Ж.В.Семилюкскому, В.А.Филонову, А.Л.Черных, 1987)

1 – четвертичные отложения; 2-5 – песчаники, алевролиты, конгломераты, вулканокластические конгломераты и гравелисты верхнебалецкой свиты с прослоями: 3 – алевролитов, 4 – песчаников, 5 – конгломератов; 6 – конгломераты с прослоями песчаников нижнебалецкой свиты; 7 – гранитоиды удинского комплекса; 8 – кварцевые жилы и кварцево-жильные зоны; 9 – разрывные нарушения; 10 – зона повышенной рудоносности

Золото-серебро-кварц-адуляровая формация

Карамкен (Северо-Восток). Месторождение находится в пределах Охотско-Чукотского вулканического пояса и приурочено к вулкано-тектонической структуре кальдерного типа. В основании разреза - нижнемеловая толща конгломератов,

песчаников и алевролитов (мощностью 400 м). Выше залегает верхнемеловой вулканоплутонический комплекс с миндалекаменными андезито-базальтами, андезитами, андезито-дацитами в основании и толщей риолитов, риолито-дацитов и их туфов в верхней части. Они прорваны гипабиссальными и субвулканическими телами гранодиорит- и плагиогранит-порфиров, андезитов, риолитов и насыщены мелкими экструзивными телами. Наиболее молодыми являются породы андезито-базальтов и туфов (палеоген). Разрывная тектоника представлена полукольцевыми и радиальными разломами кальдерной стадии развития и более молодыми разрывами северо-западного направления с оперяющими и близширотными трещинами. Один из таких разломов и контролирует рудное поле. В его пределах оруденение концентрируется на нескольких участках: на контакте интрузии плагиогранит-порфиров в зоне субширотного разлома; среди гидротермально измененных риолитов и риолито-дацитов в трещинах северо-восточного простирания.

Рудные тела представляют собой жилы мощностью до 1-3 м, которые концентрируются в виде пучков (рис. 103) в сколовых нарушениях. Характерной особенностью рудного поля является интенсивный метасоматоз, охватывающий большую часть площади. Он выразился в пропилитизации, кварц-гидрослюдистых, кварц-адуляровых, кварц-каолинитовых и кварц-алунитовых изменениях вулканитов.

Рудные жилы имеют кварцевый, кварц-адуляровый и карбонатно-кварцевый состав с содержанием кварца 50-90 % и адуляра до 25 %. Рудные минералы (1-2 % жильной массы) - пирит, халькопирит, сфаленит, галенит, марказит, теннантит, сульфосоли серебра, пираргирит, прустит, электрум, золото, серебро. Золото неправильной комковидной, пластинчатой формы пробностью 500-600 встречается в виде субмикроскопических (до 0,02 мм) выделений. Оно отлагалось после гидрослюдисто-кварцевой и карбонатно-кварцевой стадий в составе продуктивного кварц-адулярового комплекса с халькопиритом, пиритом, аргентитом, канфильдитом и серебром. Процесс завершился кварц-карбонатной стадией, в которую выделились только киноварь и антимонит. Запасы месторождения - 40 т.

Золото-сульфидная формация (золото-полиметаллическая и золото-колчеданная)

Ново-Широкинское (Восточное Забайкалье) золото-полиметаллическое месторождение вместе с Кочковским золотым и Лучинским полиметаллическим входит в состав Широкин-ского рудного поля. Рудное поле находится в пределах вулканотектонической впадины, вытянутой в северо-восточном направлении вдоль Урюмской зоны разломов.

Фундамент и обрамление впадины сложены кембрийскими и нижне-среднеюрскими осадочными породами (сланцы, песчаники, алевролиты, конгломераты). Впадина выполнена эффузивно-осадочной толщей верхней юры (рис. 104). В основании разреза залегают туфы, туфо-песчаники, туфобрекчии и плагиоклазовые андезитовые порфириты (мощностью 600-800 м). В центре впадины они перекрываются пироксен-плагиоклазовыми андезитовыми порфиритами (400-700 м) второй фазы. Встречающиеся повсеместно тела лавобрекчий и кластолав слагают жерловые и околожерловые фации. Эффузивно-пирокластическая толща прорвана малыми интрузивами и дайками комагматичных пород.

Разрывные нарушения имеют северо-восточную и северо-западную ориентировку. Разломы северо-западного простирания являются рудовмещающими. Это взбросы и сбросо-сдвиги протяженностью до 6 км, которые сопровождаются зонами дробления и гидротермальных изменений. Они веерообразно расходятся от интрузивного массива гранодиоритов в северо-западном направлении.

Ново-Широкинское месторождение приурочено к зоне Широкинского разлома мощностью до 180 м. В этой зоне локализуются жильобразные рудные тела, которые

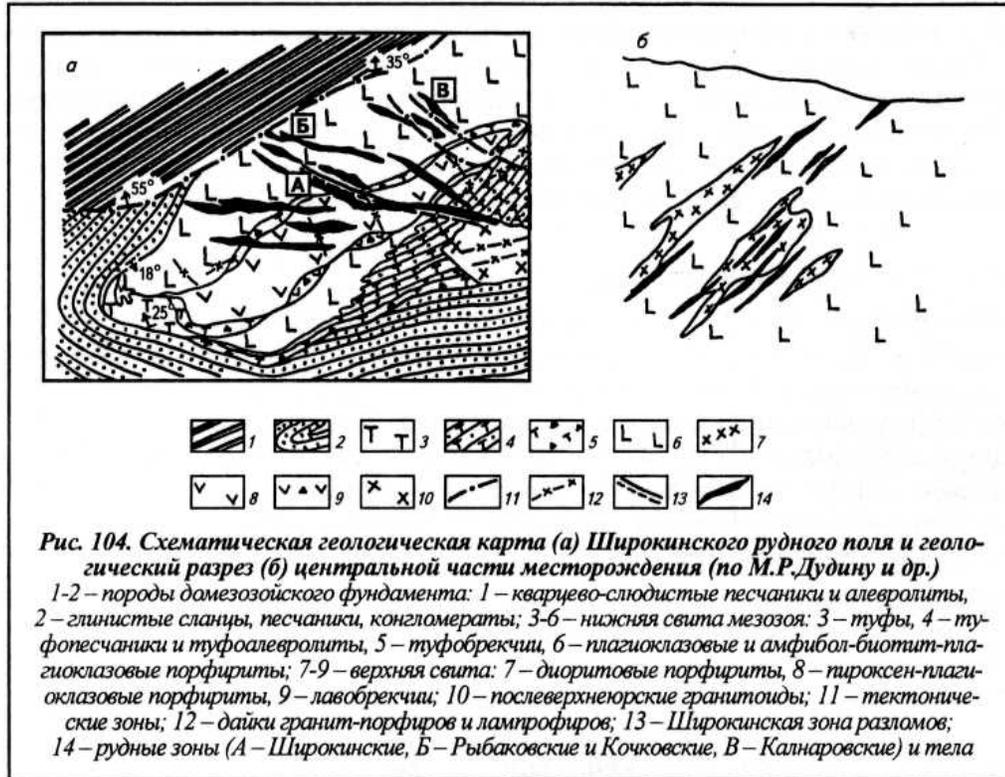
сопровождаются серией субпараллельных маломощных жил и прожилков. Рудные тела имеют нечеткие контакты, падение к юго-западу под углом 52-88°. Характерно кулисообразное расположение жил.



Выделяется три типа руд: колчеданные, кварцево-полиметаллические и карбонатно-полиметаллические. Главные минералы дорудного этапа - кварц, серицит, хлорит, кальцит, пирит, турмалин и рутил. Рудный гидротермальный этап разделяется на следующие стадии: турмалин-кварцевую с пиритом и сульфидами, колчеданную (кварц, пирит, блеклые руды, халькопирит, галенит), кварц-полиметаллическую (кварц, пирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, халькопирит), карбонатно-полиметаллическую (кварц, доломит, сфалерит, галенит, блеклые руды, марказит, буланжерит, барит), карбонатную (доломит) и халцедон-пиритовую.

Золото характерно для колчеданного типа руд. Оно выделялось в колчеданную и кварц-полиметаллическую стадии; образует зерна неправильной, изометричной, удлиненно-пластинчатой форм в ассоциации с сульфидами или отдельно от них в жильных минералах.

Основная масса руд представлена агрегатом сульфидов в сростании с жильными минералами или вмещающей породой. Околорудные изменения - окварцевание, доломитизация и пиритизация.



Баймакский рудный район (Южный Урал) представлен золотосодержащими колчеданно-полиметаллическими месторождениями. Площадь района сложена силурийскими вулканогенными породами и многочисленными прорывающими их субвулканическими и гипабиссальными интрузивами, которые перекрыты вулканогенно-осадочной толщей девона.

Месторождение Бакр-Тау (находится в поле вулканических пород, которое сложено (снизу вверх) кварцевыми риолито-выми порфирами (экструзивное тело мощностью 200 м), горизонтом слоистых туфов кислого состава (40-50), андези-тобазальтовыми порфиритами (100), горизонтом яшмовидных туфов (100) и вулканическими брекчиями. Эти породы прорваны экструзивными субвулканическими телами риодацитового состава (рис. 105).

Оруденение локализуется в узле пересечения разломов близмеридионального и северо-западного простирания и образует три рудные залежи. Они имеют вытянутую жило-образную или неправильную форму и залегают в зоне разлома на контакте кислых и основных эффузивов.



Месторождение Майское приурочено к вулcano-тектонической постройке, в которой экструзивное тело диабазов и дацитовых порфиритов окружено потоками андезито-базальтовых порфиритов и дацитов. Рудные тела находятся в зоне Главного разлома, имеющего северо-западное простирание. Они локализуются на пересечении этого разлома с кровлей межплатовой субвулканической интрузии риолито-дацитов (рис. 106). Рудные тела имеют сложную форму. Их верхние части залегают полого вдоль контакта интрузива, ниже они переходят в крутопадающие линзы, контролируемые разрывными нарушениями.

Главные рудные минералы - пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, борнит, золото. Жильная минерализация представлена кварцем, баритом, хлоритом, серицитом, кальцитом, альбитом, цеолитами. От других колчеданных месторождений эти объекты отличаются присутствием минералов Ва, Au и Ag.

Руды прожилково-вкрапленные или сплошные. Золото ассоциирует с баритом, галенитом и сфалеритом. Золотины встречаются в сростках с сульфидами или как включения в сфалерите, пирите и халькопирите. Размеры золотинок достигают 0,4 мм. Отношение Au:Ag составляет в среднем 0,5-1,5.



МЕТАМОРФОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

К этой генетической группе относятся многие крупные месторождения золота, известные в различных районах земного шара. Месторождения, связанные с процессами метаморфизма, отчетливо разделяются на два генетических типа: флюидно-метаморфогенные и осадочно-метаморфогенные.

Месторождения первого типа приурочены к областям метаморфизма и динамометаморфизма с интенсивным проявлением флюидных гидротермальных процессов. Флюидные системы, формирующие промышленное оруденение, имеют глубинное происхождение и часто являются золотоносными.

Ко второму типу относятся метаморфизованные месторождения с первично осадочным накоплением золота и последующим его перераспределением в процессе метаморфизма.

Флюидно-метаморфогенные месторождения

Эти месторождения составляют одну из наиболее важных промышленных групп. Они, как правило, содержат значительные запасы золота и имеют широкое распространение. К ним относятся месторождения США (Хоумстейк, Джуно), Бразилии (Морру Велью), Австралии (Калгурли). Из месторождений России следует назвать Сухой Лог, Советское, Зун-Холбинское (Восточная Сибирь), Дуэт-Бриндакитский рудный узел (Якутия).

Основные особенности таких месторождений - приуроченность к зонам метаморфизма в зеле-нокаменных поясах или древних прогибах; залегание среди метаморфических песчано-сланцевых, зеленокаменных или черносланцевых толщ в

виде согласных или согласно секущих тел, контролируемых зонами рассланцевания и элементами складчатых структур (замковые части складок, мульды, флексуры, зоны наложенной складчатости); приуроченность к толщам, обогащенным органическим веществом; метаморфические и метасоматические изменения (кварцевые жилы, сульфидизация и др.).

Процесс рудообразования в этих месторождениях был длительным и многоэтапным. Сперва шло накопление золота в стадию формирования вмещающих пород и при их метаморфизме; затем - формирование тектонических зон высокой проницаемости и рудовмещающих разломов; концентрация золота в виде рудных тел в связи с деятельностью глубинных флюидных систем. Наиболее правильно считать такие месторождения флюидно-метаморфогенными.

Главные эпохи формирования флюидно-метаморфогенных месторождений - докембрийская и раннепалеозойская. Наибольшим распространением пользуются формации: золото-малосульфидная в черносланцевых и песчано-сланцевых толщах; золото-сульфидная; золото-кварц-сульфидная в зеленосланцевых толщах.

Золото-малосульфидная формация в черносланцевых и песчано-сланцевых толщах

Сухой Лог находится в пределах Ленского (Бодайбинского) золотоносного района. Бодай-бинский синклинирий, вмещающий коренные месторождения и россыпи, сложен породами патомской серии позднего протерозоя. Преобладают кварцевые и полимиктовые песчаники, черные углистые сланцы, известковистые песчаники, доломиты, кварциты.

Коренные месторождения золота в пределах Бодайбинского синклинория относятся к двум типам: зоны рассланцевания и трещиноватости с прожилково-вкрапленной золоторудной и сульфидной минерализацией (Сухоложское рудное поле); существенно кварцевые жилы с золотом (Артемовское, Васильевское жильные поля). В пределах наиболее крупных рудных полей эти типы оруденения встречаются совместно.

Месторождение Сухой Лог находится в осевой части сжатой и опрокинутой на юг антикли-нальной складки. Ядро складки сложено углистыми, кварц-серицитовыми сланцами и алевролитами, крылья - известняками, песчаниками, известковистыми сланцами (рис. 107). Породы метаморфизованы до зеленосланцевой фации.

Оруденение локализуется в близширотной зоне позднекладчатого рассланцевания, которая вытянута в близширотном направлении на 15 км. Мощность зоны изменяется от 20 до 250 м. Главное рудное тело представляет собой пластообразную залежь прожилково-вкрапленных руд длиной несколько километров, мощностью 15-140 м (средняя мощность 70 м). По падению рудное тело прослежено на 1,5 км. Оно имеет раздувы и пережимы, а распределение золота в нем носит столбовый характер (рис. 108). Расположение рудных столбов контролируется общим простираем рудного тела, поперечными разрывными нарушениями и участками изгибов залегания пород в рудовмещающей зоне.

Руды отличаются простым химическим и минеральным составом. Сульфиды составляют 1,3-2,5 %, на 90-95 % они представлены пиритом. Также присутствуют халькопирит, пирротин, галенит, сфалерит, арсенопирит и пентландит. Среднее содержание золота в рудах составляет 2,5 г/т, золото высокопробное (890-950 и выше), запасы - 1450 т.

Золото мелкое, средний размер золотинок 0,1-0,14 мм. В рудном теле наиболее золотоносны сульфидные скопления с повышенным содержанием кварца. Кроме кварца в жильной массе присутствуют карбонаты, полевой шпат и слюды. Околорудные изменения - окварцевание, сульфидизация, карбонатизация.



Месторождение Юрское (Якутия, Южное Верхоянье) - это одно из месторождений Аллах-Юньского золотоносного района, расположенного в пределах Южно-Верхоянского синклинория.

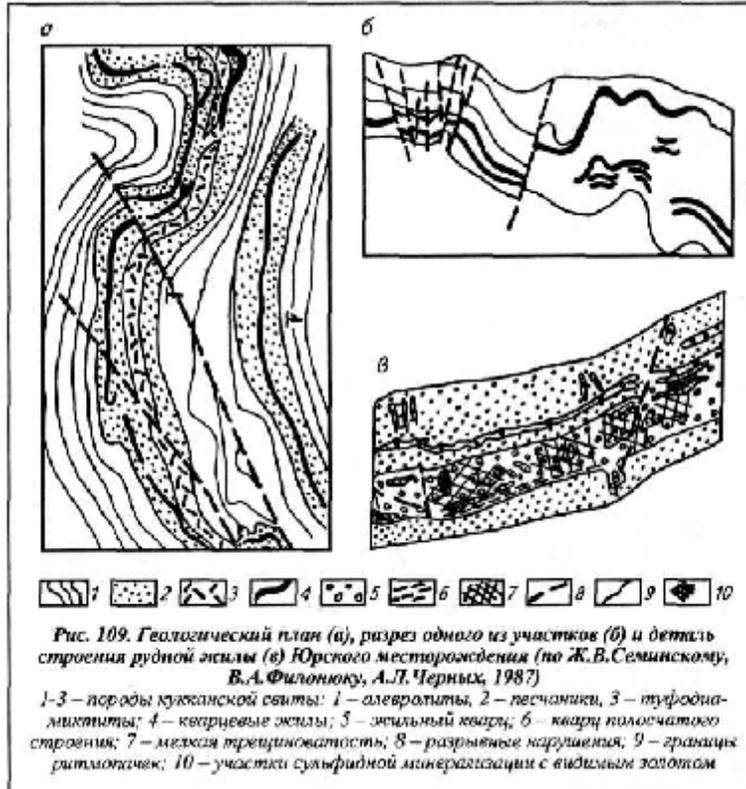
Структурная позиция месторождения определяется приуроченностью его к западному крылу синклинория, нарушенному поперечной складчатостью и разломами. Рудоносная толща прослеживается в близмеридиональном направлении в виде полосы шириной 0,5-1,0 км (рис. 109 а). Оруденение не выходит за пределы мульды, ограниченной поперечными складками.

Рудные тела представляют собой протяженные по падению и простиранию согласные кварцевые жилы (рис. 109 б). Наряду с ними встречаются секущие относительно мелкие жилы, характерные для других месторождений данного региона.

Большинство продуктивных кварцево-жильных тел локализовано в межпластовых срывах среди алевролитов, углисто-глинистых сланцев и карбонатных песчаников, которые характеризуются резко различными упругими, прочностными и фильтрационными свойствами. По простиранию жилы прослеживаются на несколько километров при мощности от нескольких сантиметров до 5-6 м. Рудные жилы имеют сложное внутреннее строение, обусловленное наличием ксенолитов вмещающих пород и весьма неравномерным распределением золота (рис. 109 в). Оно концентрируется в пределах "рудных лент", вытянутых по простиранию жил вдоль зон повышенной трещиноватости в кварце. В этих лентах золото вместе с рудными минералами образует гнезда в участках мелкой трещиноватости.

Рудное вещество в кварцевых жилах представлено сульфидной минерализацией (не более 2-4 %) с преобладанием арсенопирита, пирита, халькопирита, галенита. Процесс рудообразования включал несколько стадий. Минералы ранней кварц-арсенопирит-золоторудной стадии встречаются в зальбандах жил или в виде ксенолитов среди жильного кварца.

Вторая рудная стадия имеет более сложный состав. Минералы этой стадии (галенит, сфалерит, арсенопирит, золото, буланжерит, жильный кварц) занимают от 50 до 80 % объема рудных жил. Околорудные изменения – серицитизация и окварцевание, образующие маломощные (10 см) зоны вдоль жил. Во вмещающих песчаниках и углисто-глинистых сланцах распространена вкрапленность арсенопирита.



ОСАДОЧНО-МЕТАМОРФОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения этого промышленного типа являются главными источниками золота во мно-гих зарубежных странах (ЮАР, Канада, Бразилия). Их уникальность определяется как значи-тельными размерами, так и комплексным составом руд, в которых наряду с золотом и ураном содержатся серебро и платиноиды. Характерная особенность этих месторождений - их приу-роченность к толщам метаморфизованных кварцево-галечных конгломератов протерозойского возраста. Они представляют собой отложения дельтового выноса значительной мощности, которые содержат рудоносные слои нескольких стратиграфических уровней. Это древние россыпи, преобразованные при последующих деформациях и метаморфизме зеленосланцевой фации с локальной перегруппировкой первично накопленных металлов. Характерны пластовая и лентообразная форма рудных тел, наследующих расположение "рудных струй" русловых потоков, и веерообразная в плане структура рудных полей. В то же время наличие в рудах сульфидов и минералов четырехвалентного урана, неустойчивых в гипергенных усло-виях, региональных рудоконтролирующих зон разломов и некоторые другие данные могут свидетельствовать о проявлении флюидных процессов рудообразования.

Рудный район Витватерсранд (ЮАР, р-н г. Иоганнесбург). Рудная минерализация проявлена на пло-щади 350x200 км. Нижний структурный этаж сложен гранитогнейсами архея, которые про-рваны основными и кислыми интрузивными породами. Они образуют куполовидные под-нятия, разделенные опущенными блоками. В пределах этих блоков накапливались породы верхнего структурного этажа - протерозойские отложения витватерсрандского и других комплексов. Золотоносная толща Витватерсранда состоит из ритмичных серий конгломератов, песчаников, сланцев с горизонтами вулканитов (рис. 112). Пачки рудоносных конгломератов образуют так называемые "риффы", содержащие золоторудную и урановую минерализацию. Риффы представляют собой группы сближенных в разрезе горизонтов

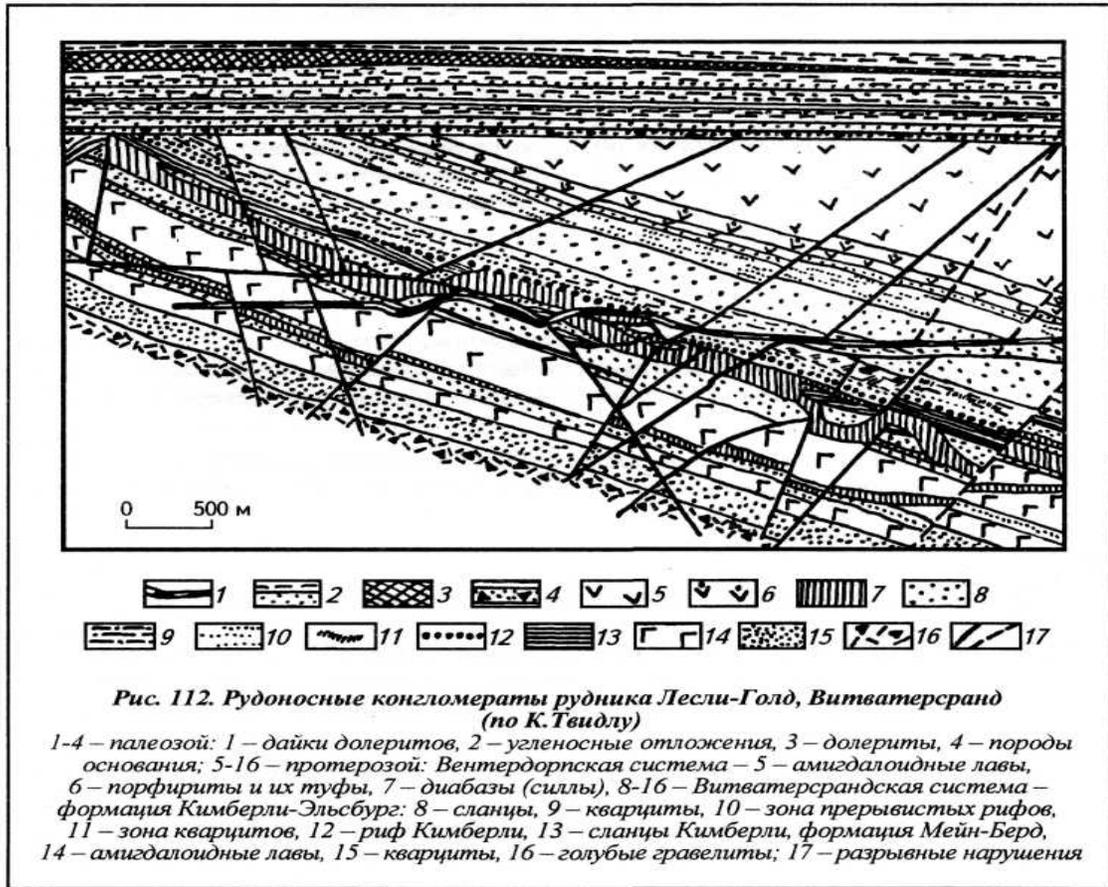
рудоносных конгломератов мощностью от первых метров до первых десятков метров. Мощность рифов - от 30 до 400 м, протяженность по простиранию - до 70 км, протяженность всей рудоносной полосы - около 200 км.

Наиболее рудоносными являются конгломераты, сложенные на 80 % окатанной галькой кварца или кварцита. Цемент имеет кварц-биотит-хлорит-эпидотовый состав, содержит углистое вещество и рудную минерализацию. Степень метаморфизма низкая. Рудная минерализация концентрируется в цементе конгломератов, содержащем до 5-10 % сульфидов. Установлено более 70 минералов, в том числе пирит (наиболее распространен), пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, молибденит, теннантит, кобальтин, ильменит, колумбит, касситерит. Урановая минерализация представлена уранинитом, тухолитом (урансодержащее углеродистое вещество), браннеритом, настураном, коффинитом, присутствуют ураноторит, монацит, эвксенит, циркон и лейкоксен. Обычным является содержание U_3O_8 - около 0,03 %, есть и более богатые руды - 0,22-0,34 % (район Клерксдорп, Трансвааль).

Золото содержится в сульфидах и в виде мелких частиц в цементе. Вторичное золото образует тонкие пленки в цементе и в обломках. Содержание золота 8-20 и даже до 3000 г/т, пробность -900-935. Встречаются самородное серебро, прустит, сплав серебра с золотом, платиноиды с осмием, иридием, родием.

Большая часть исследователей считает, что конгломераты Витватерсранда отлагались в конусах выноса рек и затем перемывались в прибрежных зонах. Переотложение урана и золота происходило многократно, о чем свидетельствует наличие кластогенных и вновь образованных рудных минералов. Кластогенная минерализация имеет возраст 3100 млн лет, эпигенетическая - около 2000 млн лет.

Из руд этого самого крупного месторождения золота в 1884-1978 гг. было извлечено 34600 т золота, 1500 т серебра, 1500 т платиноидов, 100 тыс. т урана (1952-1980 гг.). С 1979 по 1995 г. добыча золота составила 10725 т. Рудные тела вскрыты горными выработками протяженностью до глубины 3600 м и скважинами - до 4600 м.



МЕТАЛЛОГЕНИЯ

В геологической истории Земли установлены определенные закономерности образования месторождений золота и их распределения по континентам.

Для архея характерна приуроченность месторождений к древним вулканоплутоническим комплексам, которые слагают зеленокаменные пояса. Привнос золота происходил из подкорковых источников. Большое значение в перераспределении металла и его концентрации в виде месторождений имели гидротермальные и метаморфогенные процессы. Зеленокаменные трюги залегают среди гранитогнейсовых пород древних щитов и складчатых областей. Месторождения золота отличаются значительными размерами по площади и прослеживаются на большие глубины (до 2-3 км). Преобладают кварцевая и сульфидно-кварцевая формации с пиритовой, пирротин-пиритовой и теллуридовой минерализацией.

В протерозойское время, когда на сиалической земной коре формировались крупные длительно-живущие прогибы, заполнявшиеся терригенными осадками, существовали благоприятные условия для накопления значительных по размерам пластовых месторождений типа золотоносных конгломератов. Магматические процессы, проявившиеся в этих районах, способствовали перераспределению золота и его дополнительной концентрации в виде более богатых рудных тел. Также в это время формировались кварцево-жильные зоны и вкрапленные руды золото-сульфидной формации эндогенного гидротермального генезиса.

В палеозое происходило дальнейшее усложнение строения земной коры и образование складчатых поясов. В это время наряду с привносом металлов, в том числе золота, из верхней мантии осуществлялось его перераспределение в породах земной коры. Промышленные месторождения формировались часто в прогибах, сложенных терригенно-карбонатно-сланцевыми толщами. Перераспределение золота,

накопленного в этих толщах в процессе осадконакопления и привноса из мантии, происходило под воздействием метаморфизма и деятельности флюидов различного происхождения. Как правило, процессы рудообразования были не только многостадийными, но и многоэтапными. В это время значительно усложняется формационный состав месторождений золота. Наряду с преобладающими золото-кварцевой, золото-кварц-сульфидной и золото-сульфидной встречаются формации золото-халцедон-кварцевая, золото-алюмосиликатная и другие. Широко распространен пирит-арсенопиритовый тип минерализации. Месторождения часто приурочены к поднятиям внутри бассейнов осадконакопления и локализуются вблизи массивов гранитоидов.

В мезо-кайнозойское время во многих регионах Земли проявились активные тектоно-магматические процессы, которые привели к формированию крупных разломных зон и вулканических поясов (восточная часть Евразии, запад Америки). Многочисленные месторождения золота, образованные в это время, характеризуются многообразием рудных формаций и структурных обстановок. Среди рудных формаций известны золото-сульфидно-кварцевая, золото-халцедон-кварцевая, золото-карбонатно-сульфидная и другие. Рудоконтролирующими являются вулканотектонические и субвулканические постройки, очагово-купольные структуры, крупные разломы и узлы их пересечения. Характерны ассоциация золота с серебром и низкая проба самородного золота. Широко распространены россыпные месторождения.

К наиболее крупным золотоносным провинциям мира относятся: в Африке – Южно-, Западно-, Центрально-Африканская, в Австралии - Западно- и Восточно-Австралийская, в Северной Америке -Канадского щита (Киватин, Йеллоунайф, Черчилл и др.), западного побережья Северной Америки, в Южной Америке - Гвианская, Бразильская, западного побережья Южной Америки, в Евразии - Дарварская, Восточно-Сибирская, восточного побережья Азии (Северо-Восточная, Приамурско-Приморская, Юго-Восточная) и другие.

СЕРЕБРО

Серебро известно человечеству примерно с XV в. до н.э.

Области применения серебра изменяются по мере развития науки и техники. Первоначально оно применялось для изготовления монет и украшений. В настоящее время до 70 % серебра используется в различных отраслях промышленности: фото- и кинопромышленности, электротехнике и электронике. На долю ювелирных изделий и посуды приходится до 20 %, остальная часть употребляется для чеканки монет, медалей и других целей.

Запасы серебра оцениваются в 796,5 тыс. т (из них 537,8 тыс. т - подтвержденные). При этом 66,4 % общих и 60 % подтвержденных запасов приходится на девять стран, в том числе общих запасов (в тыс. т): США - 88, Польша - 81, Мексика - 60, Канада - 60, а также Австралия, Боливия, Перу, ЮАР и Чили. Ведущими являются две группы месторождений: собственно серебряные (30 % запасов зарубежных стран) и серебряносодержащие (70 %).

В России основные запасы серебра сосредоточены в серебряносодержащих месторождениях (медных, полиметаллических, медно-никелевых). Они находятся в Восточной Сибири. Основные запасы собственно серебряных руд (98 %) содержатся в месторождениях Охотско-Чукотского и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканических поясов.

Требования промышленности к серебряным рудам зависят от типа месторождений. В собственно серебряных месторождениях содержание металла должно составлять не менее 100 г/т. Из комплексных месторождений цветных металлов серебро может извлекаться и при более низких содержаниях (10-100 г/т). Мелкими считаются месторождения серебра с запасами 100-300 т, средними - около 1000-3000 т, крупными - 10000-30000 т и выше.

В 2008 г цена серебра изменялась в интервале 10-21 дол/тройскую унцию (~31,1 г).

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк серебра колеблется в различных магматических породах незначительно и составляет $(5-7) \cdot 10^{-6}$. Коэффициент концентрации равен 1000. В природе существуют два стабильных изотопа серебра ^{107}Ag и ^{109}Ag . Ионы серебра входят в решетку самородного золота, достигая в экстремуме почти 50 % мас. В небольших количествах серебро может входить в решетку сульфидов и сульфосолей меди и в состав теллуридов. В виде микровключений минералы серебра находятся в галените и блеклых рудах, в меньших количествах - в сфалерите, пирите, халькопирите. В эндогенных процессах серебро имеет ювенильный мантийный источник и связано с щелочно-базальтоидным магматизмом в сульфидных медно-никелевых месторождениях. В то же время собственно серебряные и серебряно-полиметаллические месторождения гидротермального генезиса связаны с магмами среднего и кислого состава; рудоносные растворы, отлагавшие серебро, могли иметь различное происхождение: магматическое, метеорное и океаническое. В гидротермальных растворах серебро находится в виде подвижных тиосульфатных и хлоридных комплексов.

В экзогенных условиях серебро переходит в раствор в виде сульфата или тиосульфата и переотлагается в самородной форме или в форме галоидов. В элювиальных, делювиальных и коротких аллювиальных россыпях серебро накапливается в незначительных количествах.

В природе известно 60 серебряных и серебряносодержащих минералов. Главным из них является самородное серебро. Оно может содержать до 20 % примесей различных металлов - Au, Cu, Fe, Bi, Sb и Hg. Серебро образует пленки, дендриты,

округлые, волосовидные выделения. Важное значение имеют (в %): аргентит Ag_2S (87,1 серебра), электрум Au, Ag (15-50), прустит Ag_3AsS_3 (65,5), пираргирит Ag_3SbS_3 (60), полибазит $(\text{Ag, Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ (62,1-84,9).

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Главные промышленные месторождения серебра относятся к эндогенным постмагматическим образованиям. По генезису среди них выделяются гидротермальные плутоногенные и вулканогенные месторождения. Иногда серебро содержится в повышенных количествах (до 130 г/т) в собственно магматических сульфидных медно-никелевых рудах (Норильский район) и в скарновых сульфидных месторождениях (Санта-Еввалия, Мексика), где его содержание достигает 600-850 г/т.

ПЛУТОНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Среди плутоногенных выделяются месторождения: связанные с базальтоидным магматизмом докембрийских платформ и щитов, где серебро вместе с никелем и кобальтом входит в состав серебряно-арсенидных руд (Кобальт, Канада; Конгсберг, Норвегия); ассоциирующие с кислыми интрузиями гра-ниитоидов палеозойского и мезозойского возраста в составе серебряно-арсенидных и серебряно-свинцовых руд (Яхимов, Чехия; Грейберц Германия). Эти месторождения представлены жильными полями в гранитоидах или согласными рудными жилами межпластового типа.

Серебряно-свинцовая формация

Важным источником серебра являются многие свинцовые и свинцово-цинковые месторождения. В СНГ это месторождения известных полиметаллических провинций (Забайкальской, Средне-Азиатской). Среди полиметаллических месторождений встречаются объекты с ведущей ролью серебра и подчиненным значением свинца или цинка.

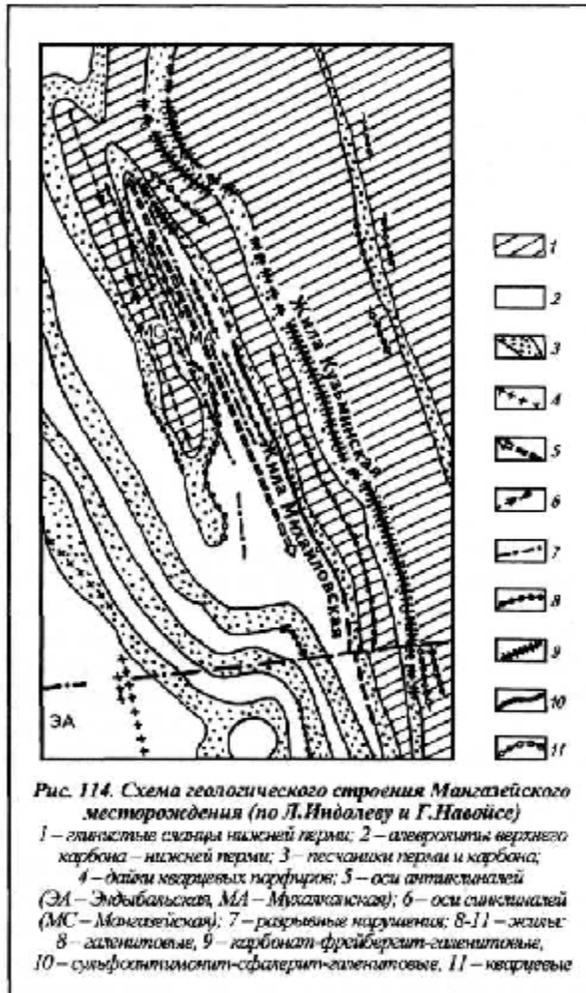
Мангазейское месторождение (Якутия). Вмещающими породами являются песчаники, сланцы и алевролиты верхнего карбона и перми, собранные в складки и прорванные штоками и дайками кварцевых порфиров и гранитов мелового возраста.

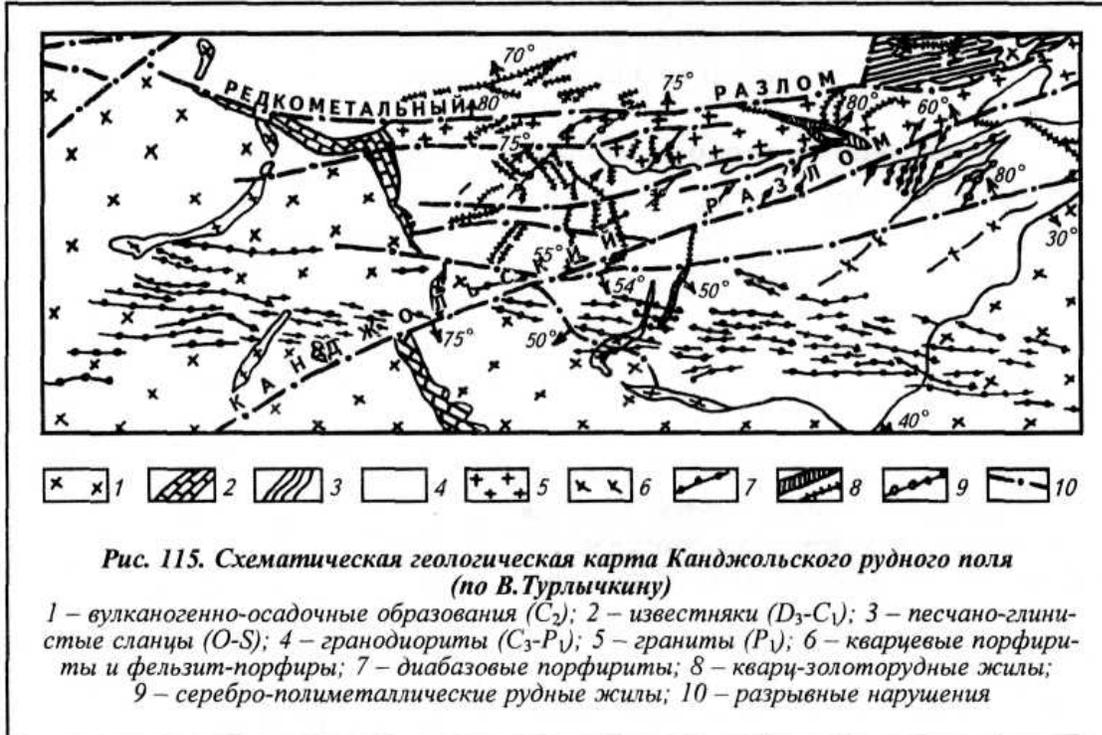
Межпластовые рудные жилы месторождения залегают среди сланцев в антиклинальной складке, осложненной узкой синклиналью (рис. 114). Жилы сложены кварц-сульфидными рудами, которые формировались в два этапа. Ранний этап - маломощные прожилки кварца с галенитом, сфалеритом и тетраэдритом. Поздний этап (главный) разделяется на ряд стадий: 1 - кварц, пирит, арсенопирит; 2 - кварц, сфалерит, манганосидерит; 3 - кварц, галенит, манганосидерит, штернбергит (AgFe_2S_3); 4 - кварц, анкерит, фрейбергит ($(\text{Cu, Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), овихиит ($\text{Ag}_2\text{Pb}_5\text{Sb}_6\text{S}_{15}$), диафорит ($\text{Ag}_3\text{Pb}_2\text{Sb}_3\text{S}_8$), миаргирит (AgSbS_2), пираргирит, самородные золото и серебро; 5 - манганосидерит, сфалерит; 6 - кварц, манганосидерит, кальцит. Отношение $\text{Ag} : \text{Au} = (500-100) : 1$.

Канджольское месторождение (Узбекистан). Оруденение локализуется в гранитоидах Ку-раминского батолита верхнепалеозойского возраста (рис. 115). В рудном поле встречаются ранние убогосульфидные кварц-золоторудные жилы с серебром и поздние свинцово-серебряные руды в кварц-сульфидных жилах, имеющие главное промышленное значение. Кварц-сульфидные жилы контролируются разломами северо-восточного простирания. Они представляют собой неправильные плитообразные тела протяженностью 50-1000 м, соединенные прожилками и жилами лестничного типа. На глубину оруденение прослеживается до 1500 м.

По минеральному составу это кварц-карбонатно-сульфидные руды, сложенные комплексом сульфидов и сульфосолей.

Серебряные минералы широко распространены в восточной части рудного пояса, где образуют прожилки и мономинеральные жилы. В зоне окисления, которая достигает 150 м, происходит значительное обогащение глинисто-лимонитовой фракции серебром (сотни граммов на тонну).





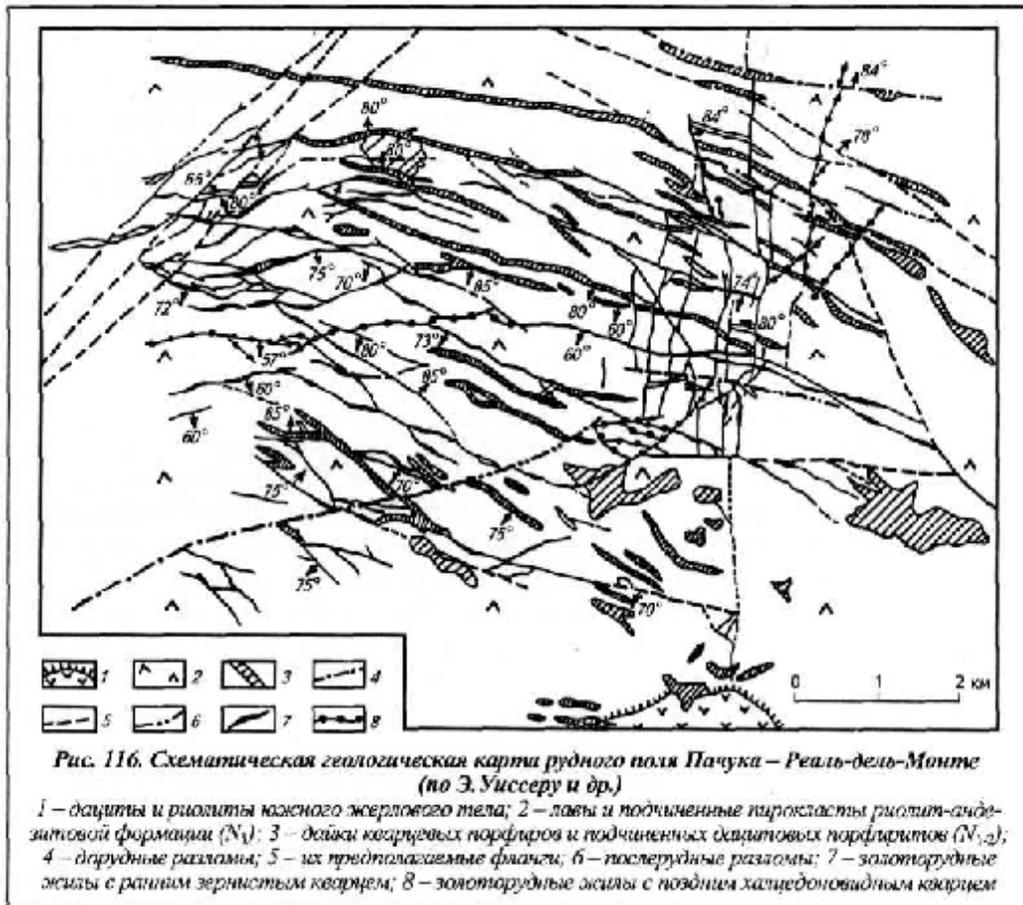
ВУЛКАНОГЕННЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Характерная особенность большинства таких месторождений - их локализация в полях вулканических пород. При этом рудовмещающими являются вулканические постройки: палеокальдеры, вулканокупольные структуры, вулcano-тектонические впадины. В отдельных случаях месторождения формируются в породах фундамента или обрамления вулканических построек. Однако и здесь они связаны с различными элементами вулканотектоники – вулканическими разломами, дайково-субвулканическими образованиями. Рудные тела имеют жильную форму. Они контролируются разрывными нарушениями, образованными (или подновленными) в поствулканический период.

По составу руд среди вулканогенных гидротермальных месторождений выделяются главные рудные формации: серебро-золотая, серебро-оловянная, серебро-сульфидная и др.

Пачука (Мексика). Рудное поле формировалось в пределах вулканокупольной постройки, сложенной средними и кислыми эффузивами (рис.116). Рудная минерализация концентрируется в двух системах жил. Основное количество серебра и золота заключено в рудных столбах. Они вытягиваются вдоль жил почти горизонтально на 200-1000 м.

Основной минерал рудных жил – кварц, второстепенные - кальцит, родонит, родохрозит, доломит и барит. Ранние сульфиды представлены пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом. С поздним аметистовидным кварцем связана уникальная по разнообразию минеральных форм серебряная минерализация. Главный минерал - аргентит. Широко распространены полибазит, акантит, миаргирит, пираргирит, прустит, стефанит, штернбергит. Самородное серебро характерно для зон окисления. Золото проявлено в виде электрума. Отношение золота к серебру 1:200.



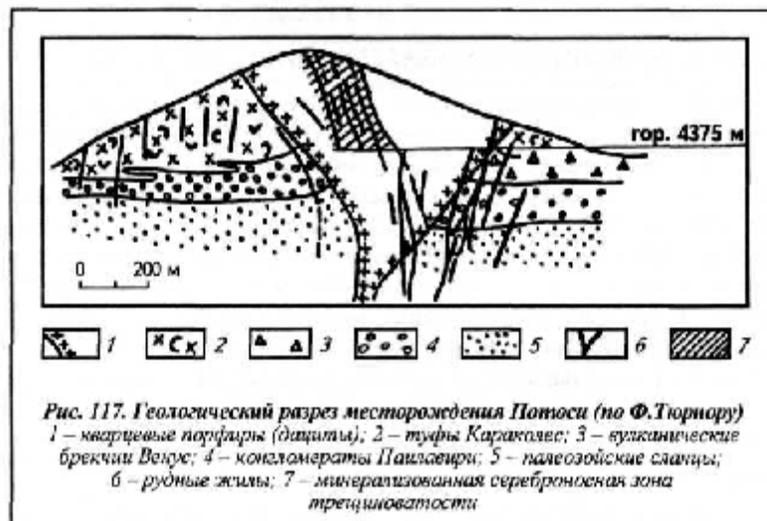
Дукатское серебро-полиметаллическое месторождение (Магаданская область) расположено в пределах рифтогенного прогиба, заложенного в раннемеловое время и представляющего собой ответвление Охотско-Чукотского вулканического пояса. Оно отрабатывается с 1976 г.

Месторождение приурочено к крупной вулcano-тектонической депрессии, осложняющей рифто-генный прогиб в участке пересечения крупных разломов меридионального и северо-восточного направлений. Депрессия выполнена высококалийевыми риолитами, их туфами и игнимбритами. Центральная часть депрессии представлена купольной структурой площадью 5x8 км, с падением вулканитов на крыльях под углами 10-30°.

Месторождение локализовано в пределах купольного поднятия и представлено минерализованными зонами мощностью 10-20 м, протяженностью 300-1200 м и рудными жилами мощностью 0,5-2 м, протяженностью 200-300 м. Главные рудные минералы - аргентит, самородное серебро, электрум, сульфосо-ли серебра, сульфиды цветных металлов. Жильные минералы - кварц, родонит, адуляр, альбит, кальцит, фанат. Продуктивные рудные ассоциации: серебро-кварц-хлорит-сульфидная, адуляр-кварц-серебряная, серебро-кварц-родонитовая. Золото-серебряное отношение в кварц-адуляровых рудах - 1:340, в кварц-родонитовых - 1:550. Околорудные изменения - пропилитизация и адуляризация.

Серебро-оловянная формация

Месторождение Потоси (Боливия, Восточные Кордильеры) находится в Центрально-Андийской (Боливийской) олово-серебряной провинции, в участке изменения простираения Южно-Американского вулканического пояса от меридионального к северо-западному. В этом участке, где проявились крупные поперечные разломы близширотной ориентировки, сосредоточена основная масса третичных вулканитов, и располагаются крупнейшие олово-серебряные месторождения Потоси и Оруру. Из руд Потоси в период с 1545 г. было добыто 30 тыс. т серебра. Богатые жилы в основном отрабатаны, но весьма значительные запасы серебра сосредоточены в рудах средних и низких сортов. Кроме того, на более глубоких горизонтах залегают промышленные руды олова с вольфрамом и сурьмой.



Рудное поле находится в северо-западной части крупного свода. В основании разреза залегают филлиты, песчаники и аргиллиты ордовика. Они перекрыты неогеновыми вулканическими породами - агломератами, вулканическими брекчиями, туфами и лавами андезитового, дацитового и риолитового состава мощностью до 1500 м. Структурная позиция рудного поля определяется куполовидным субвулканическим телом кварцевых порфиров Серро-Рико. В плане оно имеет овальную форму и площадь 1700x1200 м (на поверхности). На глубине 500-600 м это тело переходит в дайку мощностью около 100 м.

В верхней части купола кварцевых порфиров и по его периферии развиты трещины трех систем с простиранием 53, 31 и 6°. К ним и приурочены жилы месторождения Потоси. Жилы второй системы образуют крупную зону общей мощностью 175 м в верхней части купола. На нижних горизонтах продуктивными являются жилы других систем. Здесь они переходят из кварцевых порфиров в сланцы.

Длина жил достигает 700 м, мощность колеблется от 5 см до 1-1,5 м. На глубину жилы прослеживаются до 600-875 м, но богатые руды - до 350 м.

Жилы формировались в пять стадий. В первую выделялись кварц, касситерит, вольфрамит, висмутин, арсенопирит, пирротин. Вторая стадия представлена станнином и халькопиритом. В третью продуктивную стадию отлагались высокосеребристый тетраэдрит, сфалерит, андорит (AgPbSb_5Se), матильдит (AgBiS_2). С четвертой, также продуктивной на серебро, связано образование так называемой "красной серебряной руды", состоящей из пираргирита, прустита, а также джемсонита, буланжерита, сфалерита, галенита. Для пятой стадии характерны прожилки алунита.

Вертикальная зональность выражается в распространении серебряных руд (тетраэдрит, андорит, прустит, пираргирит) на верхних горизонтах, с глубиной начинают преобладать станнин, халькопирит, висмутин и вольфрамит. Околорудные изменения: окварцевание (на верхних горизонтах), серицитизация, аргиллизация и алунитизация. Содержание серебра составляет 300-3000 г/т, олова - в среднем до 4 %.

Серебросодержащие формации медных руд

Серебро добывается попутно из некоторых меднопорфировых, медноколчеданных руд и медистых песчаников. К последним относится известное Джеккаганское месторождение меди, описанное в подразделе "Медь". Серебро присутствует в рудах в самородной форме или в других минеральных видах. Как самородная примесь оно входит в решетки сульфидов. По возрастанию содержания серебра выделяется ряд "галенит - халькопирит - борнит - халькозин". Серебряная минерализация установлена в рудах Удоканского месторождения меди.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Эволюция интенсивности серебряного рудообразования в геологической истории носит циклический скачкообразный характер. При этом наиболее продуктивными являются две металлогенические эпохи: позднепротерозойская и альпийская.

Крупные концентрации серебра начали формироваться в позднепротерозойское время, когда были образованы высокосеребристые месторождения колчеданно-полиметаллической и пятиэлементной формаций Канадского, Австралийского и Индостанского щитов. Источником серебра в это время были глубинные базальтоидные магмы. Месторождения часто приурочены к

метаэффузивам базальт-андезит-риолитовых серий или к дайковым комплексам основного состава.

Отдельные "вспышки" серебряного рудообразования имели место в каледонскую, герцинскую и киммерийскую эпохи. Так, обогащены серебром герцинские и каледонские полиметаллические формации Уральской, Казахстанской, Алтае-Саянской, Тянь-Шаньской провинций, связанных с различными этапами формирования складчатых поясов. Установлено, что наиболее богатыми серебром являются месторождения поздних орогенных этапов образования этих поясов. Ко времени орогенеза увеличивается количество серебрянорудных формаций, серебряносодержащие золото-кварцевые формации сменяются более продуктивными золото-серебряными и серебро-оловянными.

Главнейшей является альпийская эпоха серебряного рудообразования, в течение которой формировались уникальные месторождения серебро-свинцово-цинковой и золото-серебряной формаций Тихоокеанского и Средиземноморского складчатых поясов. Для этой эпохи характерна тесная связь месторождений серебра с процессами вулканизма. Так, в крупнейшей Мексиканской провинции зона серебрянорудных районов и полей приурочена к восточному краю вулканического пояса Сьерра-Мадре. Оруденение ассоциирует с контрастной риолит-андезит-базальтовой вулканоплутонической серией. В Средиземноморском поясе месторождения серебра связаны с андезит-дацит-риолитовым комплексом вулканитов. Рудные поля контролируются вулканическими постройками (куполами, кальдерами, диа-тремами) или субвулканическими интрузивами. Серебро поступало в гидротермальные системы из мантийных и коровых источников.

По данным А.Е.Антонова, месторождения серебра приурочены к самым разнообразным блокам земной коры - континентальным различного режима, островодужным и океаническим, в соответствии с чем можно выделить серебрянорудные провинции нескольких типов.

Окраинно-континентальные провинции расположены в пределах краевых вулканических поясов, что наиболее характерно для Тихоокеанского кольца и центральной части Средиземноморского пояса. Провинции окраинно-океанического типа находятся в пределах островодужных вулканических поясов, которые приурочены к глубинным разломам линии Беньофа, и обрамления океанических впадин (Японская и другие провинции). Крупнейшие месторождения серебра приурочены к металлогеническим провинциям совмещенного окраинно-континентального и окраинно-океанического типов (Мексиканско-Центрально-Американская система провинций).

Континентальные металлогенические провинции формировались на активизированных в мезо-кайнозойских окраинах платформенных областей (Боливийская оловянно-серебряная, Центрально-Европейская провинции).

Серебрянорудные провинции древних платформ связаны с зеленокаменными поясами докембрийских метавулканитов (оз. Верхнего на Канадском щите), с зонами регионального метаморфизма и гранитизации (Большого Медвежьего Озера на Канадском щите, Северокарельская на Балтийском щите и др.). В последние годы получены данные о высокой серебряносности срединно-океанических хребтов (Восточно-Тихоокеанская, Красноморская провинции). Здесь серебро ассоциирует с рудами цинка и меди, образует участками значительные по масштабам скопления и в будущем может быть извлечено вместе с другими компонентами этих залежей.

Наиболее важные в промышленном отношении серебрянорудные провинции мира находятся в пределах мезо-кайнозойских окраинных складчатых поясов с интенсивным проявлением вулканизма. Это провинции Американской ветви Тихоокеанского кольца (провинции Мексиканская, Западных щитов США, Перуанская, Чилийско-Боливийская) и его Восточно-Азиатской ветви (провинции Японская, Филиппинская, Охотско-Чукотская, Сихотэ-Алинская и др.).

Вторым по значимости после Тихоокеанского является Средиземноморский складчатый пояс, который включает серебрянорудные провинции - Западно-Средиземноморскую, Карпато-Балкано-Динар-скую, Центрально-Европейскую, Ирано-Афганскую, Индокитайскую и другие.

В Атлантическом поясе известны две серебряносные провинции - Северо-Аппалачская и Британская, которые по продуктивности не имеют особо важного значения. Более продуктивны на серебро провинции древних щитов - Канадского (Северо- и Южно-Канадская провинции), Балтийского (Центрально-Балтийская), а также ряд провинций Африканского и Индостанского щитов.

МЕТАЛЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

(Платина, палладий, иридий, родий, осмий и рутений)

Самородная платина с древности известна в Египте, Эфиопии, Греции и Южной Америке. В России первые россыпи платины найдены в Верхне-Исетском округе (Урал) - 1819 г. и в Гороблагодатском округе - 1824 г. В конце XIX в. платину находят в золотых россыпях Восточной Сибири и в Виллойском районе Якутии.

Основные ценные свойства: тугоплавкость, химическая стойкость, электропроводность, пластичность, свариваемость.

Области применения: как катализаторы (50 %), в электротехнической, нефтехимической, автомобильной, медицинской отраслях промышленности (25 %), при производстве химической аппаратуры и антикоррозийных покрытий (15 %), в ювелирном деле (10 %).

Запасы: общие - 50,98 тыс. т (платины - 24,4), из них в ЮАР - 49,9 тыс. т платиноидов (платины - 23,9), в Канаде - 323 т (125 т), в США - 267 т (72 т).

- Более 99 % запасов - в платиновых месторождениях магматического происхождения (ЮАР, США и Зимбабве).

- Около 0,7 % - в сульфидных медно-никелевых месторождениях Канады, Австралии, Финляндии.

- По 0,1 % в меднопорфировых и россыпных месторождениях США, Югославии и Колумбии.

Коренные месторождения в России: сульфидные медно-никелевые месторождения Норильска и Кольского полуострова - 99,4 % запасов, в Амурской области и Карелии.

Россыпные месторождения в России: платиновые россыпи на Урале (разрабатываются 170 лет), Кондерская россыпь в Хабаровском крае.

Добыча: суммарная за весь период - более 3 тыс. т, за последние 10 лет - 1,2 тыс. т.

87 % производства - Бушвельдский комплекс ЮАР (202 т платиноидов, 115 - платины); 6 % - месторождение сульфидно-никелевых руд Садбери, Канада (13 т платиноидов); 8,3 т добыто в США, 2,2 т - в Колумбии.

Кондиции: содержание платиноидов от 3-5 до 10-15 г/т, запасы - 1 т и выше. Средние месторождения - 10-50 т запасов, крупные - 100-500 т.

Цены на платиноиды в 2008 г. составляли (в долларах за грамм): платина - 26,2, палладий - 9,65, родий - 192,92, иридий - 6,43, осмий - 13,67, рутений - 12,86. Цены на платиноиды могут существенно изменяться в течение года.

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларки (в процентах): платина - 5×10^{-7} , палладий - 13×10^{-7} , иридий - 1×10^{-7} , осмий - 50×10^{-7} , рутений - 5×10^{-7} , родий - 1×10^{-7} . Известны два изотопа иридия, по шесть изотопов - платины и палладия, по семь - осмия и рутения. Коэффициент концентрации их составляет 1000, кроме осмия (50) и рутения (200).

Источник: глубинные ультраосновные и основные магмы.

Концентрация:

1. В сульфидных медно-никелевых месторождениях - при дифференциации магм (вкрапленные руды) или путем инъекций сульфидного расплава (массивные руды).

2. В хромитовых месторождениях - при сегрегационно- и ликвационно-магматических и пневматолитово-гидротермальных процессах.

3. В постмагматических скарновых и гидротермальных месторождениях, связанных с базальтоидными магмами – очень редко.

Поведение в экзогенных условиях: устойчивые к химическому выветриванию, накапливаются в аллювиальных и других россыпях.

Минералы:

1. Самородные платиноиды;
2. Сплавы - изоферроплатина Pt_3Fe , осмирид Ir,Os ; иридоосмин Os,Ir ; рутениридоосмин Ru,Os,Ir ;
3. Интерметаллические соединения с оловом, свинцом, висмутом, сурьмой и теллуrom - рустенбургит (Pt_3S_{11}), паоловит (Pd_2Sn); плюмбопалладинит (Pd_3Pb_2); соболевскит ($PdBi$); мончеит ($PtTe_2$);
4. Сульфиды, арсениды, сульфоарсениды - куперит PtS , бреггит (Pt,Pd,Ni) S , высокоцит (Pd,Ni) S , лаурит RuS_2 , сперрилит $PtAs_2$, холингвортит $RhAsS$.

ТИПЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Магматические

- ликвационные,
- раннемагматические,
- позднемагматические.

Россыпные.

МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Связь с магматизмом: ритмически и циклически расслоенные плутоны основного - ультраосновного состава (тела пластовой формы), массивы центрального типа, содержащие карбонатиты (более сложная морфология оруденения).

Промышленные типы:

1. Собственно платиноносные месторождения:
 - раннемагматические - риф Меренского в Бушвельдском массиве (платина-хромит-медно-никелевая формация),
 - позднемагматические - Нижне-Тагильское месторождение (хромит-платиновая формация).
2. Платиносодержащие месторождения:
 - ликвационные медно-никелевые и сульфидные никелевые Норильска (медь-никель-платиновая формация);
 - хромитовые с платиноидами кордильерского типа;
 - комплексные медно-и молибден-меднопорфировые.

Примеры месторождений: Бушвельдский комплекс ЮАР, месторождения Канады (Садбери, Гудньос-Бэй), Колумбии, Эфиопии, США (Бингем, Сан-Мануэль). В России - в Норильском районе, в "платиновом поясе" Урала, на Алдане.

Платина-хромит-медно-никелевая формация: Риф Меренского (ЮАР)

Вещающие породы: серия пород Бушвельдского массива от гарцбургитов, норитов, бронзититов (нижняя зона) до габбро и диоритов (верхняя зона), фельзиты и граниты заключительной фазы. Платиноносной является Критическая зона расслоенной серии Бушвельда, в нижней части которой залегают пироксениты, гарцбургиты, хромититы, а в верхней - нориты, анортозиты, хромититы (Риф Меренского).

Форма рудных тел: три крупных пласта - риф Меренскоо, Плэтриф и UG-2.

Риф Меренского сложен порфиrowыми и пегматоидными пироксенитами с гнездами и прожилками хромитов, прослежен на 230 км при средней мощности 0,8 м, на некоторых участках встречаются столбообразные залежи диаметром 15-50 м, прослеживающиеся на глубину до 30 м.

Риф UG-2 располагается на 20-300 м ниже по разрезу Рифа Меренского. Его мощность 0,5-2,5 м, протяженность 250 км.

Минералы: ромбический пироксен, битовнит, биотит, хромит, магнетит, ильменит; сульфиды - пирротин, пентландит, халькопирит, кубанит, миллерит, валлериит, никелистый пирит; рудные - ферроплатина, браггит, куперит, сперрилит, лаурит, теллуриды платины и палладия.

Содержание платиноидов:

Риф Меренского - 5-15 г/т (при фоновом до 50 мг/т). Доля платины в рудах - 60 %, палладия - 25, рутения - 3.8, родия - 6-9, иридия - 0.6-1.8, осмия - 0.4-0.8 %. Содержание сульфидов около 1,2 %.

Риф UG-2 - 5.5-7.5 г/т., доля платины составляет 45-50 %,

Ресурсы платиноидов: риф Меренского - 18 тыс. т., Риф UG-2 - около 12.2 тыс. т.

Генезис руды: поступление дополнительных порций глубинного расплава в камеру с остаточным расплавом, конвекция и гравитационное осаждение капель сульфидного расплава в депрессиях (впадинах) рифов.

- Руды рифа Меренского рассматриваются как раннемагматические,

- Крутопадающие трубообразные залежи платиноносных дунитов в районе Лиденбурга известны как позднемагматические.

- В зоне экзоконтакта массива среди доломитов установлены платиноносные скарны (район Потдиетерсраст) и гидротермальные кварцевые жилы с платиной и осмистым иридием (район Уотербург).

Хромит-платиновая формация: Нижне-Тагильское месторождение (Средний Урал)

Геологическая позиция: дифференцированный массив форстеритовых дунитов, внедрившийся в толщу карбонатно-сланцевых пород девонского возраста. В центральной части массива - платиноносные дуниты, местами серпентинизированные, на периферии - зоны пироксенитов и габбро.

Контроль оруденения: контракционная трещиноватость дунитов.

Рудная минерализация: рассеянная вкрапленность; гнезда, шпирьы, линзы, скопления ветвящихся жил, сложенных массивными и густовкрапленными хромитовыми рудами с повышенной концентрацией платиноидов. Минералы платиноидов играют роль цементирующего материала для зерен хромшпинелидов.

Минералы: рудные - хромшпинелиды, поликсен, иридиястая платина, осмистый иридий, платинистый иридий, лаурит, стибнопалладинит, пентландит, кубанит, встречены платиновые самородки, наиболее крупный из которых весил 427 г.

**Медь-никель-платиновая формация:
Норильский рудный район (Северная Сибирь)**

Включает ряд месторождений сульфидных медно-никелевых руд с платиной (Талнах-Октябрьская группа).

Геологическая позиция: стратифицированные интрузивы трапповой вулканоплутонической ассоциации Сибирской платформы: такситовые, троктолитовые и пикритовые габбро-долериты.

Контроль оруденения: сульфидные руды нижних рудоносных "толщ" интрузивов, экзоконтактовые метасоматиты.

Рудные тела:

- пластообразные пологозалегающие слои с вкрапленностью пентландит-халькопирит-пирротинового состава;
- инъекционно-магматические сплошные руды плитообразных залежей, линз и жил – наибольшие концентрации;
- инъекционно-метасоматические прожилково-вкрапленные руды различного состава; брекчиевидные эпигенетические пирротиновые и халькопиритовые руды эндоконтактов.

Минералы: более 50 рудных минералов, главные на Октябрьском месторождении - паоловит Pd_2Sn и соболевскит $PdBi$, на Норильском - тетраферроплатина (Fe, Ni, Cu) Pt и рустенбургит $(Pt, Pd)_3Sn$, второстепенные - железистая платина Pt_3Fe_2 , атокит $(Pd, Pt)_3Sn$, плюмбопалладинит Pd_3Pb_2 , сперрилит $PtAs_2$.

Минералы платиноидов образуют микроскопические мономинеральные выделения размером 1-15 мкм или полиминеральные сростки до 70 мкм. Сперрилит образует кристаллы до 1 см.

РОССЫПНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Источник материала: разрушение сравнительно бедных, но значительных по площади и запасам платиноносных интрузивных массивов габбро-пироксенит-дунитового состава.

Типы россыпей: элювиальные, делювиальные и аллювиальные, тесно связанные с коренными источниками платиновых минералов.

Минералы: хромшпинелиды, оливин, пироксены, титаномагнетиты в сростках с минералами платиноидов, рудные - поликсен, самородная платина, ферроплатина, купроплатина, иридная платина, иридное и платинистое золото.

Содержание платиноидов: аллювиальные россыпи - от нескольких миллиграммов до сотен граммов на $1 м^3$.

Россыпи платиноидов известны в России (Урал, Сибирь), США, Колумбии, Зимбабве, Заире, Эфиопии и других странах.

Россыпи Инаглинского месторождения (Восточная Сибирь, Алдан)

Источник материала: щелочной комплекс мезозойского возраста, имеющий концентрически-зональное строение - сиениты, сиенит-порфиры, форстеритовые дуниты.

Тип россыпи: элювиально-аллювиальная.

Разрез россыпи: снизу - дресва дунитов с платиноносными шлирами, выше - аллювий с продуктивным пластом красно-бурых мелкозернистых песков.

Содержание платиноидов: от 1-2 до 35-40 г/т.

***Древние погребенные и метаморфизованные россыпи:
Рудный район Витватерсранд, ЮАР***

Источник материала: метаморфизованные древние конгломераты

Тип россыпи: дельтовые россыпи

Минералы: осмистый иридий, платинистый иридий, сперрилит, бреггит и куперит.

Источники попутного получения платиноидов

- Рудные объекты Мирового океана - железо-марганцевые конкреции, корки и нодулы, глубоководные полиметаллические сульфидные образования,
- Платиноносные офиолитовые, троктолит-феррогаббровые и черносланцевые комплексы,
- Продукты переработки платиноидных, хромитовых, полиметаллических, медно-молибденовых, медных и россыпных золоторудных месторождений.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Месторождения платиноидов формировались практически во все металлогенические эпохи, главные - протерозойская, герцинская и киммерийская.

1. Протерозой:

- платиноносные расслоенные мафические-ультрамафические комплексы (Бушвельд), в стабильных континентальных блоках земной коры, содержащие горизонты с крупными запасами платиноидов ранне- и позднемагматического происхождения.

- зеленокаменные пояса интрузий толеитового состава (Кольский п-ов, Канада) с ликвационными месторождениями меди, никеля и платиноидов.

2. Палеозойская (герцинская) эпоха:

- Габбро-дунитовые интрузии с платиноносными хромшпинелидами (Урал), приуроченные к рифтовым зонам ранних стадий развития складчатых поясов.

3. Киммерийская эпоха

- Расслоенные интенсивно дифференцированные интрузии габброидного состава в континентальных рифтовых зонах с платиносодержащими сульфидными медно-никелевыми рудами (Сибирская платформа).

- Ультраосновные-щелочные платиносодержащие кольцевые комплексы,

4. Неоген-четвертичное время:

- Россыпные месторождения, содержащие платиноиды.

Тектонические обстановки формирования месторождений:

- Зеленокаменные пояса архея-протерозоя,
- Зоны протоактивизации,
- Геосинклинально-складчатые пояса
- Зоны мезозойской активизации на древних платформах.

Наиболее крупные месторождения образовались в зонах высокой динамической активности кратонов и древних платформ в период рифтообразования, когда существовали благоприятные условия для внедрения глубинных магм и их интенсивной дифференциации.

Платиноносные провинции: Южно-Африканская, Западно-Канадская, Северо-Сибирская, Кольская, Уральская и другие.

ЛИТИЙ

Открыт в 1817 г. шведским химиком А. Арфведсоном в петалите. Природный литий - смесь двух стабильных изотопов: ${}^6\text{Li}$ (7,42 %) и ${}^7\text{Li}$ (92,58 %).

Свойства: большая пластичность и вязкость, способность легко сплавляться почти со всеми металлами, образуя твердые растворы или интерметаллические соединения, обладающие большой твердостью, хрупкостью и тугоплавкостью. Некоторые соединения имеют полупроводниковые свойства.

Применение: военная техника, стекольная и керамическая отрасли, производство флюсов, припоев, консистентных смазок, щелочных аккумуляторов, рафинирование меди и кондиционирование воздуха, получение алюминия, химических источников тока, в легких конструкционных материалах. ${}^6\text{Li}$ - источник трития - основного компонента водородных бомб. ${}^7\text{Li}$ - теплоноситель ядерных реакторов.

Мировые запасы: (без России и КНР) 10 млн т, годовая добыча 11 тыс. т.

Цена: петалитового концентрата - 147, сподуменного - 410 долларов за тонну (на конец 1996 г.)

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Кларк лития - 27 г/т, содержание в ультраосновных породах - 5, в кислых до 38 г/т.

Минералы: 54 минерала - силикаты, фосфаты, борат, два оксида и фторид. Содержание оксида лития в его минералах обычно 1,2-9 %, у литиофосфата - 37 %, либерита - 23 и криолитонита - 12. Литий с трудом строит самостоятельные кристаллические структуры.

Промышленные минералы: сподумен $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, лепидолит $\text{K}_2\text{Li}_3\text{Al}_5\text{Si}_6\text{O}_2(\text{F-OH})_4$, петалит $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$, монтебразит LiAlPO_4F .

Геохимические свойства: изовалентный изоморфизм с другими щелочными металлами затруднен. Тем не менее, калий, натрий, цезий, рубидий, кальций, барий и стронций находятся в его минералах в заметных количествах - парагенные минералы. Широко проявлено изоморфное замещение литием магния и двухвалентного железа.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

20 типов месторождений в составе семи магматогенных и двух экзогенных формаций.

ГРАНИТНЫЕ ПЕГМАТИТЫ

Альбит-сподуменные пегматиты с колумбитом и бериллом

Вмещающие породы: метаморфиты от амфиболитовой до зеленосланцевой фации, реже - интрузивные.

Геологическая позиция: наиболее удалены от материнских гранитов, а в свитах моноклинально падающих жил занимают самое высокое положение.

Возраст оруденения: от протерозоя до мезозоя.

Рудные тела: серии по 2-10 плитообразных жил или даек протяженностью - 500-3000 м и мощностью 10-40 м. Залегание жил согласное с вмещающими.

Минералы: главные - кварц, альбит и сподумен, микроклин (мало); второстепенные - чешуйчатый ярко-зеленый мусковит или жильбертит, сине-черный турмалин, гранат,

апатит, касситерит; рудные – сподумен, берилл, колумбит, холмквистит, трифилин-литофилит и монтебразит. Отсутствуют – лепидолит, поллуцит.

Зональность: проявлена слабо, как и дифференциация

1. Мелкозернистая (порфиробластовая) кварц-альбитовая зона – ранняя, у пологозалегающих тел часто развита только у лежачего бока;

2. Кварц-альбит-сподуменовая зона – занимает основной объем;

3. Зона блокового микроклина – поздняя, часто отсутствует или выклинивается с глубиной.

Иногда с глубиной появляется кварц-альбит-петалитовая зона мощностью до 15 м.

Попутные компоненты: тантал и бериллий.

Запасы: Li_2O - сотни тысяч тонн, BeO - несколько десятков тысяч тонн, а TaO_5 - нескольких тысяч тонн.

Содержания:

- Li_2O – 1.1-1.5 %, по падению жил постепенно возрастает либо остается на одном уровне;

- BeO – 0.025-0.040 %, в краевой кварц-альбитовой зоне больше, чем в центральной кварц-альбит-сподуменовой, по падению жил постепенно возрастает либо остается неизменным.

- оксида ниобия – 0.008-0.012 %, тантала – 0.004-0.010 %;

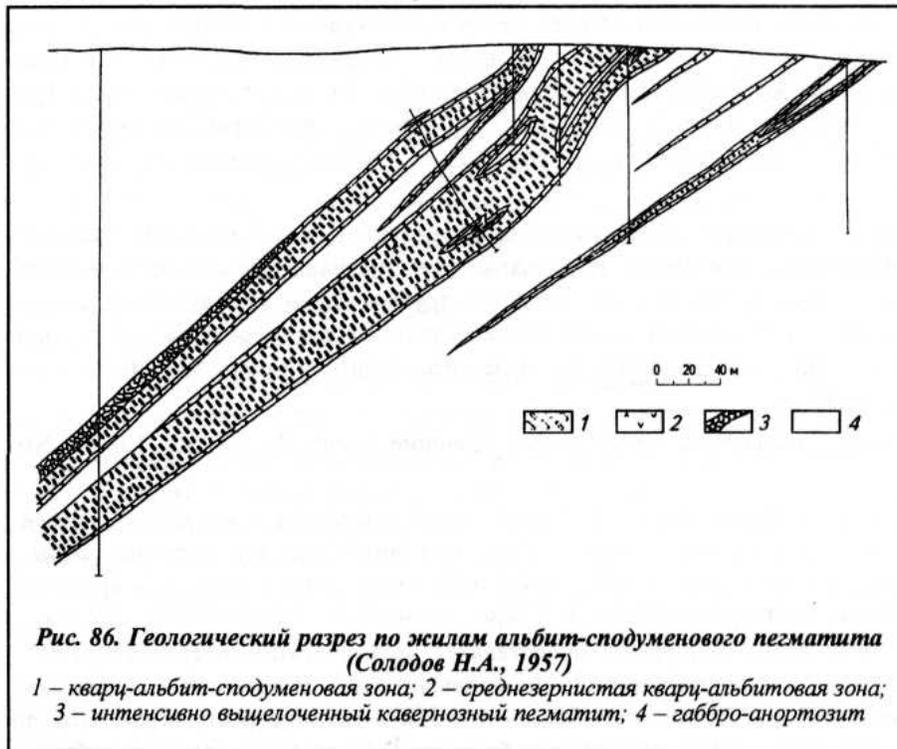
- рубидий и цезий на уровне кларка.

Рудные минералы:

- лития - сподумен, призматические кристаллы серо-зеленого цвета размером от 1 мм до 50 см, редко до 2 м;

- бериллия - берилл, мелкие выделения неправильной формы размером 5-20 мм.

Примеры: Колмозерское, Полмостундровское, Тастыгское месторождения (Россия), Кингз-Маунтин (США), Дарае-Пич (Афганистан).



***Сподумен-микроклин-альбитовые пегматиты
 с лепидолитом, петалитом, поллуцитом, танталитами и бериллом***

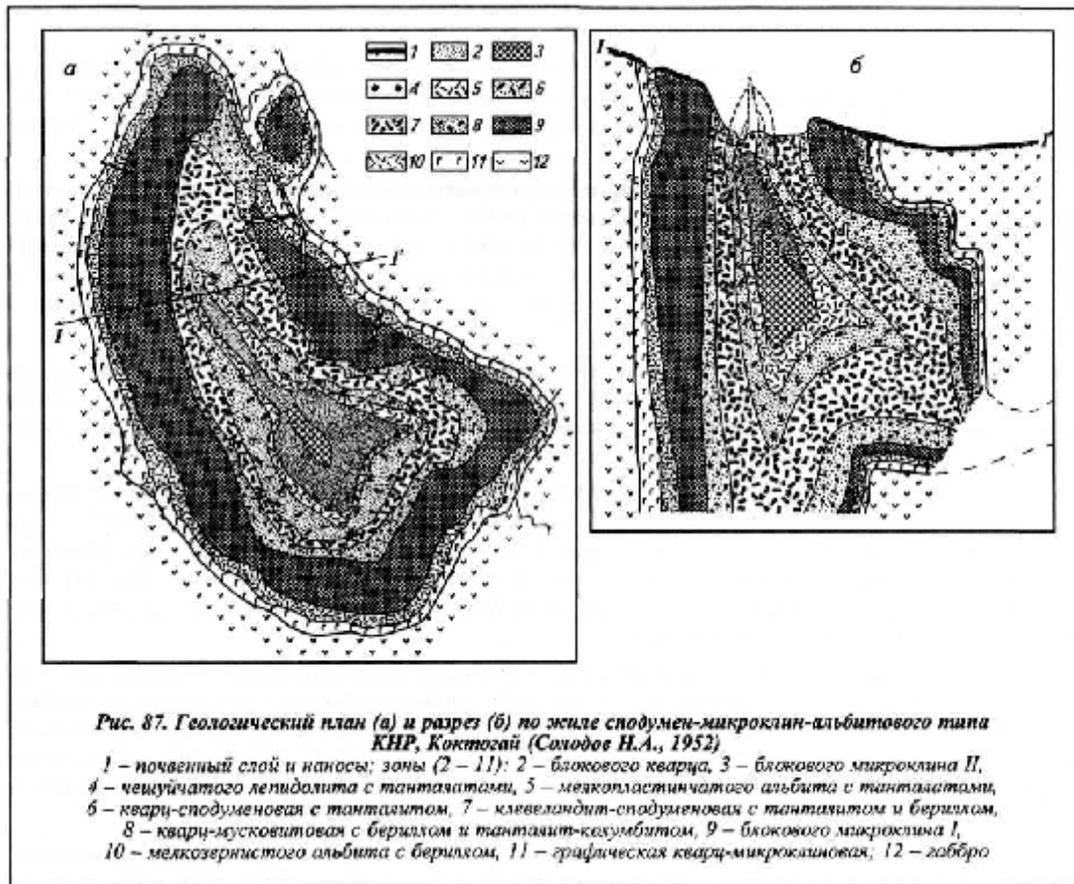
Один из наиболее важных типов промышленных редкометальных месторождений
 Возраст оруденения: от позднеархейской эпохи до герцинской.

Рудовмещающие породы: микроклиновые, микроклин-альбитовые и альбитовые пегматиты в метаморфитах амфиболитовой фации.

Геологическая позиция: сподумен-микроклин-альбитовые пегматиты обычно более удалены от магматического очага, чем микроклиновые и микроклин-альбитовые, но находятся ближе альбитовых и альбит-сподуменовых.

Рудные тела: единичные крупные линзо- и жиллообразные пологозалегающие тела длиной сотни метров (редко – более 1 км) и мощностью 5-50 м (до 150).

Попутные компоненты: Та, Cs (промышленный – только в этих месторождениях), Rb, Be, Nb, а иногда Sn, Ln.



Минералы пегматитов: главные -альбит, микроклин и кварц, мусковит, апатит, гранат; черный, розовый и полихромный турмалин, рудные - сподумен, петалит, лепидолит, амблигонит, эвкрипит, поздние и вторичные фосфаты лития, поллуцит, берилл, воробьевит, танталит, симпсонит, микролит, стибиотанталит, водженит и др.

Рудные минералы:

- Сподумен – источник лития. Крупные белые, иногда розоватые пластинчатые кристаллы длиной от 0.2 до 10 м, которые легко извлекаются вручную;

- Петалит, эвкрипит и амблигонит-монтебразит – источники лития.

- Лепидолит – источник лития, цезия и рубидия. Извлекается только если обособляется в виде самостоятельной зоны. Лепидолитсодержащие зоны имеют длину 100 м и более при мощности 10 м и глубине распространения до 150 м;

- Поллуцит – источник цезия, рубидия (до 1 % Rb₂O). В виде белых выделений неправильной формы размером от 0.5 до 50 см. Максимальные концентрации - в центральных зонах мелкопластинчатого альбита и чешуйчатого лепидолита, самостоятельных зонах протяженностью в десятки метров и мощностью до 7 м.

- Рубидиевый мусковит, содержащий до 4 % Rb₂O.

- Микроклин – источник рубидия (1-2 % Rb₂O).

Зональность: высоко дифференцированы, в единичных жилах выделяется 11 зон, в большинстве пегматитов всего три-семь зон.

Содержания: Li₂O - 0,5-0,9 %, цезия - 0,2-0,8 %, рубидия - 0,5 % (наивысшее их всех природных образований), BeO - 0,04-0,05 % (наивысшее - до 1 % и более - в зоне блокового микроклина и в центральной зоне чешуйчатого лепидолита).

По падению жил промышленное оруденение прослеживается на глубину до 200-300 м. При этом наибольшей выдержанностью характеризуются содержания Nb, Be, Li, отчасти Ta и Sn, а наименьшей - Rb и особенно Cs.

Запасы: лития в отдельных жилах - много десятков тысяч тонн, редко свыше 100 тыс. т., лепидолита - сотни тысяч и даже миллионы тонн, цезия - много десятков тысяч тонн, бериллия – десятки, сотни, а в отдельных случаях - свыше тысячи тонн.

Примеры: месторождение Бикита (Зимбабве), Карибиб (Намибия), Берник-Лейк (Канада), Блек-Хиллс (США), Варугреск (Швеция), Васин-Мыльк (Россия).

Природные высокоминерализованные воды

Содержание редких элементов определяется сочетанием макрокомпонентов (калия, натрия, магния, кальция и др.)

1. Термальные хлоридные калиево-натриевые воды

Положение: районы повышенной современной вулканической активности – в Новой Зеландии, Японии, Эквадоре, США, Исландии, Италии, на Камчатке и Курильских островах.

Добыча: воды самоизливаются из естественных термальных источников, гейзеров, фумарол либо из скважин.

Свойства: температура воды или перегретого пара - выше 100 °С, нередко -180-250 до 500.

Минерализация: от 1 до 75 г/л (в среднем 14 г/л); Li - 4,2-27 мг/л; Rb – 0,5-9,4; Cs – 0,4-3,8; В - 12-111, иногда присутствует Sc и Re. Невысокая минерализация вод позволяет использовать методы селективной экстракции из них редких металлов.

2. Глубокозалегающие хлоридные натриевые, кальциевые или магниевые рассолы

Положение: на платформах и в краевых прогибах, глубина залегания вод измеряется километрами.

Добыча: в большинстве случаев - с принудительным откачиванием, поначалу скважины фонтанируют с большим дебитом, достигающим многих тысяч кубометров в сутки.

Свойства: температура - от 20 до 100°С и более, чаще всего 40-80; pH - от 4,5 до 7,5; плотность - 1,1-1,3 г/см³.

Минерализация: от нескольких десятков граммов в литре до 320 г/л, обычно 150-250 г/л, Li - 10-150 мг/кг (до 300); Rb - 0,5-5; Cs - 0,5-1,5; Sr - 300-2000.

Запасы: лития в водах нефтеносных районов Мексиканского залива - 11 млн т при концентрации лития до 700 мг/л.

В промышленных масштабах как сырье на редкие металлы не используются. Перспективна добыча попутно с нефтью и газом. Из добываемых в США за год попутных вод можно получить: 30 тыс. т лития, до 500 тыс. т стронция, несколько тысяч тонн рубидия и многие сотни тонн цезия, большое количество брома, бора, йода, солей калия, натрия, кальция, магния и др.

3. Погребенная хлоридная натриевая рапа с литием (месторождение Сильвер-Пик (шт. Невада, США)

Положение: бессточная долина Клайтон, в 200 км к северу от оз. Серлз, дно высохшего послеледникового озера.

Вмещающие породы: галечники, пески и суглинки, перекрытые тонким плотным слоем практически водонепроницаемых глин.

Руда: рапа хлоридного натриевого состава, представляющая собой уникальное комплексное химическое сырье.

Минерализация: выше 200 г/л., Na - 62 г/кг; K - 8; Ca - 0,5; Mg - 0,4; Li - 0,4; Cl - 100,6; SO₄ - 7,1.

Запасы: несколько миллиардов тонн солей, 7,4 млн. т Li₂O при среднем содержании более 0,08 %.

4. Салары

Положение: закрытые депрессионные структуры внутри пустынных поясов с крайне аридным климатом и интенсивным испарением, связаны с галогенными отложениями солеродных бассейнов плейстоценового возраста.

Руды: отложения соли переслаивающиеся с песками и глинами, соляные слои обычно пористые, поры заполнены крепким рассолом - рапой.

Запасы: Салар-де-Атакама – 4.5 млн. тонн лития, подтвержденные - 1,67 млн. т.; оз. Серлз - 400 тыс. тонн лития и 2-3 тыс. тонн рубидия.

Содержания:

- Салар-де-Атакама -- 0,14% лития; 1.87 - K; 6.92 - Na; 0.91 - Mg; 0.04 - В, небольшие количества рубидия и цезия.

- Оз. Серлз - 96-115 мг/кг лития; 850 - Br; 30 - J; 18 - NH₄; 20 - F; 70 - W; 0.7 - Mo; 0.3 - Ge; 6 - Sb;.

Технология извлечения: постадийное солнечное упаривание (увеличивающее концентрацию металла в рассоле в 25 раз) и извлечение действием кальцинированной соды.

Примеры: Салар-де-Уюни (Боливия) и Салар-де-Атакама (Чили).

5. Поверхностная хлоридная натриево-магниевая рапа

Мертвое море (Израиль). Участок грабенообразного опускания, образующий современную рифтовую зону.

Минерализация рапы от 273 до 315 г/л, возрастает с глубиной. Содержание лития - 180, рубидия - 60 мг/л.

6. Поверхностная сульфатно-хлоридная магниевая натриевая рапа

Большое Соленое озеро (шт. Юта, США), площадь - около 2,5 тыс. км², глубина - до 8-15 м.

Общая минерализация - 275-370 г/л; плотность – 1.21-1.23 г/см³; pH – 7.4-7.7.

Запасы Li₂O - 1,3 млн. тонн при содержании лития 42-66 мг/л.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

Для лития характерны:

1. Равный вклад эндогенного и экзогенного рудообразования;
2. Связь месторождений с кислыми породами (внутрикоровыми гранитами);
3. Сосредоточение эндогенных запасов - в редкометальных пегматитах, экзогенных - в природных высокоминерализованных водах.

Эпохи литиеносного рудообразования:

1. Позднеархейская (на границе архея и протерозоя),
2. Ранне- и среднепротерозойская,
3. Раннерифейская.

С учетом длительности эпох наивысшей удельной интенсивностью литиевого оруденения характеризуются фанерозойские эпохи.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕРИЛЛИЙ

Открыт в 1798 г. французским химиком Л. Вокленом в берилле. Известен один стабильный изотоп и четыре радиоактивных ^6Be , ^7Be , ^8Be , ^{10}Be .

Свойства: малая плотность (1.848 г/см³), высокая удельная прочность, упругость, способность сохранять стабильность размеров деталей, температурная устойчивость, высокая жесткость, теплопроводность, коррозионная стойкость, очень малое поперечное сечение захвата тепловых нейтронов и большое поперечное сечение их рассеяния, устойчивость в условиях воздействия облучения и высоких температур.

Использование: в машино- и приборостроении; атомных реакторах и АЭС; авиа- и космической технике; судостроении - гироскопы и акселерометры; военной технике - атомное оружие и др.; силикатной отрасли; электротехнике; радиоэлектронике; металлургии чугуна, стали и сплавов; термоядерных электростанциях.

Запасы: 1100 тыс. т BeO (в основном в США, Бразилии и Индии) большая часть - в пегматитовых и грейзеновых месторождениях, меньше - в гидротермальных.

Примеры: Спер-Маунтин в США - метасоматиты с гельбертрандитом, бехоитом и бертрандитом, Боа-Виста в Бразилии - бериллиеносные грейзены, Агуачилла в Мексике - метасоматиты с бертрандитом, Силл-Лейк в Канаде - фениты с барилитом.

Добыча: началась еще в прошлом веке, в 1979-1982 гг. достигла 700-800 т BeO, в 1993 г. - 806 т.

Страны-поставщики: ранее - Бразилия, Аргентина, Индия; в настоящее время - США, Китай.

Цена: 850 дол за 1 т. концентрата (10 % BeO), 495 дол/кг металла 98,5 %-ной степени очистки.

Кондиции: Богатые руды содержат 0,5 % BeO и более, бедные - 0,04-0,1 %. Крупные месторождения 100-40 тыс. т BeO, рядовые - 40-10 тыс. т.

Геохимия и минералогия

В природе известно 59 минералов бериллия. Из них - 34 силиката, 12 фосфатов, семь оксидов, три бората, два арсената и один карбонат. 10 минералов содержат свыше 30 % BeO.

Источником бериллия в рудах являются: кислые и щелочные породы.

Условия концентрации: пневматолитовые, метаморфогенные, реже - гипергенные (сферобертрандит, бериллит, тугтупит, беарсит, бехоит).

Химические свойства: малый размер ионного радиуса, низкое координационное число, высокий потенциал ионизации валентного электрона и амфотерность.

Отношение с другими элементами: оксифилен, образует парагенезис с натрием, кальцием и алюминием. Характерно полное отсутствие калия в минералах Be. Замещение бериллием кремния энергетически невыгодно и наблюдается очень редко. Со фтором образует устойчивые комплексы.

Поведение: Одинаково легко образует минералы и в кислотной и в щелочной среде.

Главный экстрактор и переносчик бериллия в магматогенных месторождениях - фтор.

Распространенность:

- кларк - 1,5 г/т;
- в магматических породах щелочно-земельного ряда - от 0.2 г/т в ультраосновных до 3,5 г/т в кислых;
- в щелочных породах - от 2 (кимберлиты) и 3.9 (миаскиты) до 18 г/т (агпайтовые нефелиновые сиениты);

- содержание в породообразующих минералах - тысячные доли процента, лишь в касситерите, циртолите, ортите, везувиане, тортвейтите и гранате - сотые и десятые доли.

Типы промышленных месторождений

Свыше 30 типов месторождений: 20 связанных с внутрикоровыми гранитами, восемь - с щелочными породами и два экзогенных типа.

Редкометалльные гранитные пегматиты

Бериллий характерен для всех типов редкометалльных пегматитов. Наиболее крупные месторождения бериллия - в литийсодержащих пегматитах (сподумен-микроклин-альбитовых и альбит-сподуменовых), основной поставщик - микроклиновые и микроклин-альбитовые.

Рудные минералы: берилл, кристаллы весьма крупные (до 2х0.6 м) и правильной призматической формы, легко извлекаются ручной выборкой (в сподумен-микроклин-альбитовых и альбит-сподуменовых – только флотацией); танталит-колумбит (в альбитовых пегматитах).

Рудные тела: линзо- и жилообразные, длиной 100-150 м, мощностью 5-30 м.

Содержания: микроклиновые и микроклин-альбитовые пегматиты - несколько сотых долей процента BeO, альбитовые - 0,1-0,2 % BeO, 0.012-0.022 % Ta₂O₅

Примеры: месторождения Бразилии, Заира, Зимбабве. Возраст пегматитов рифейский или фанерозойский.

Редкометалльные грейзены

Разрабатываются только два типа: олигоклаз-флогопитовые жилы и кварц-вольфрамит-берилловые жилы.

1. Олигоклаз-флогопитовые жилы с бериллом и изумрудом известны в Египте, Южной Африке, Австрии, Индии и России (Изумрудные копи).

Контроль оруденения: экзоконтакт крупных гранитных интрузий в метаморфических толщах сложного состава с останцами серпентинизированных ультраосновных пород. Изумрудоносные жилы располагаются только в измененных ультраосновных породах.

Рудные тела: олигоклаз-флогопитовые жилы мощностью от 0.5 до 6 м, сложные свиты ветвящихся тел общей мощностью до десятков метров, по простиранию и падению - сотни метров.

Зональность:

1. В центре – плагиоклазит в виде линз либо выдержанных линзообразных тел мощностью от 3 до 20 см, небольшие линзы темно-серого кварца размером от нескольких сантиметров до 20 см.

2. По обе стороны от плагиоклазитов - флогопитовая (или биотитовая), актинолитовая и тальковая зоны.

Рудные минералы:

- Изумруд – призматические кристаллы размером от 1х1х3 до 1.5х1.5х8 см, изредка более - во флогопитовой (или биотитовой) зоне и на контакте ее с плагиоклазитом.

- Берилл - кристаллы размером от 0,5х0,5х1,5 до 5х6х15 см, светло-зеленые (во флогопите) и голубовато-зеленые (в плагиоклазите).

- Бериллийсодержащий маргарит - каемки толщиной до 5 см на контакте плагиоклазитового ядра с флогопитовой зоной или скопления отдельных кристаллов во флогопитовой зоне.

- Фенакит, хризоберилл, александрит, бавенит и бертрандит (редки).

Попутные компоненты: изумруд, изумрудная зелень, редкие щелочные металлы (во флогопитовой зоне). Во флогопите - 0,15-0,35% Li₂O, 0,15-0,25 - Rb₂O; 0,04-0,06 - Cs₂O, количество флогопита в руде - 55-65 %.

Запасы: выше 10 тыс. т BeO при содержании до 0.15 %, запасы щелочных металлов невелики, но для попутной добычи рентабельны.

2. Кварц-вольфрамит-берилловые жилы и кварц-молибденит-вольфрамитовые грейзены с бериллом часто располагаются в пределах одного месторождения и имеют взаимные переходы. Пример – месторождение Акчатау, Казахстан.

Вмещающие породы: олигоклаз-хлорит-кварцевые сланцы и другие слабометаморфизованные породы.

Контроль оруденения: апикальная часть альбитизированных и грейзенизированных мусковитовых гранитов с аксессуарной минерализацией, характерной для бериллиеносных апогранитов.

Рудные тела: грейзены по апогранитам апикальной части гранитного купола, кварце-вые жилы с маломощными (до 1,5 см) околожилными слюдными оторочками, штокверково-прожилковые зоны. Протяженность жил на глубину 300 м.

Минеральные ассоциации: кварц-вольфрамит-молибденит-берилловая, кварц-берилловая, флюорит-мусковит-кварц-берилловая, топаз-кварц-берилловая.

Минералы: жилные - кварц; второстепенные - мусковит, топаз; рудные - берилл, молибденит, вольфрамит, берtrandит, сфалерит, висмутин.

Содержания: в 5-10 раз богаче бериллоносных пегматитов, берилл извлекается флотацией.

Запасы: тысячи тонн BeO.

Редкометалльные слюдисто-флюоритовые метасоматиты

1. Мусковит-турмалин-флюоритовые метасоматиты с хризобериллом и мусковит-литийнит-флюоритовые метасоматиты с фенакитом известны в США (Аляска, Нью-Мексико), КНР, Норвегии и Аргентине, в России (Вознесенское, Д.Восток).

Геологическое положение: приурочены к известнякам экзоконтакта штокообразного гранитного интрузива.

Рудные тела: метасоматические трубообразные, линзообразные, пластовые и сложной конфигурации с апофизами, распространенные на глубину 300-350 м.

Руды: силикатно-флюоритовые (слюдисто-флюорит-фенакитовые), в верхних горизонтах, и труднообогатимые карбонатно-флюоритовые (кальцит-слюдисто-фенакитовые) - 7-15 % кальцита, в нижних горизонтах и приконтактных частях на верхних.

Минералы: главные - флюорит (50-75 %) и слюды (мусковит, циннвальдит, протолитийнит) (20-40 %), иногда широко развит топаз (до 30 %); второстепенные - турмалин, фенакит (призматические кристаллы до 0.4 мм и радиально-лучистые сростки) и хризоберилл (в слюдисто-эфеситовых и эфесит-флюоритовых прожилках, мелкозернистые агрегаты в мусковит-турмалин-флюоритовых рудах).

Основные рудные минералы: мусковит, хрупкие слюды (эфесит), циннвальдит и протолитийнит. Содержания в концентрате - BeO - 1 %, YBeO - 0,5, SвгO 0,02.

2. Кварц-мусковитовые метасоматиты с берtrandитом и эвклазом

Пример таких месторождений находится в пределах горно-рудного района Лейк-Джордж (шт. Колорадо, США).

Геологическая позиция: шток Редскин в южной части батолита Пайс-Пик, центральная часть которого сложена тонкозернистыми аплитовидными, а периферия - крупнозернистыми порфиroidными гранитами.

Контроль оруденения: аплитовые граниты.

Рудные тела: жилообразной и неправильной формы.

Минеральные типы руд:

- с бериллом,

- с берtrandитом, бериллом, эвклазом, иногда – броммелитом (большое содержание флюорита, преобладание берtrandита!).

Запасы: 30-50 тыс. т при содержании BeO от десятых долей до 4 % (в среднем около 1 %).

Бериллиеносные флюоритовые метасоматиты

1. Флюоритовые метасоматиты с фенакитом и берtrandитом

Пример - месторождение Ермаковское (Бурятия, Россия)

Геологическая позиция: северный борг грабена, выполненного мезозойскими континентальными отложениями. Грабен приурочен к протерозойскому останцу осадочно-метаморфических формаций, залегающему среди различных гранитоидов от мезозойского до позднепротерозойского возраста.

Контроль оруденения: в экзоконтакте апикальной части аляскитовых гранитов.

Рудные тела: неправильной и линзообразной формы, мощностью до первых десятков метров и протяженностью до первых сотен.

Рудные минералы: берtrandит в верхних горизонтах и фенакит - в нижних.

Содержание: BeO в рудах местами достигает нескольких процентов, в среднем - 1,2 %.

2. Халцедон-монтмориллонит-флюоритовые метасоматиты с бехоитом и гельберtrandитом

Пример - месторождение Спер-Маунтин (шт. Юта, США).

Геологическое положение: краевые части стабилизированных структур в пределах молодой активизированной зоны Северо-Американской платформы.

Контроль оруденения: пепловые туфы щелочных риолитовых порфиритов плиоцена.

Рудные тела: серия крупных межпластовых залежей мощностью до 15 м, вытянутых по простиранию на сотни и тысячи метров (до 4 км) и состоящих из согласозалегающих пластообразных тел.

Запасы: миллионы тонн руды, содержащей не менее 0,5 % BeO.

Попутные компоненты: значительное количество лития и цинка, повышенные концентрации цезия.

Подвергнуты экзогенной переработке в четвертичное время - в слоистых залежах монтмориллонитовых глин содержание BeO возрастает до 3 %.

3. Гакманит-чкаловитовый штокверк в науяитах. Е.И. Семеновым (1969) среди науяитов (пойкилитовых содалитовых сиенитов) в нефелин-калишпатовом массиве Илимауссак (Гренландия) встречены пегматитовые жилы гакманит-чкаловитового состава, образующие штокверк. Жилы, в основном маломощные (до 10 см толщиной), содержат около 50 % чкаловита, который образует овальные выделения белого цвета размером до 6 см, ориентированные под большими углами к стенкам жил. Отчетливо замещается тугтупитом. В чкаловите содержится около 12 % BeO. Чкаловит, вероятно, встречается и

непосредственно в науяите, где он трудно отличим макроскопически от нефелина. Не исключено, что жилы штокверка представляют собой результат собирательной перекристаллизации в трещины среди науяитов.

По оценке датских геологов, на площади 100 тыс. м², оконтуренной бериллиометрической съемкой, до глубины эрозионного среза в 100 м насчитывается 10 тыс. т BeO при содержании 0,1 %.

Металлогения

Наиболее крупные и богатые руды связаны с щелочными породами, в частности с щелочными гранитами.

Интенсивность бериллиевого рудообразования возрастает от докембрия к кайнозойю. Запасы в пегматитовых месторождениях остаются примерно на одном уровне, в бериллиеносных слюдисто-флюоритовых и флюоритовых метасоматитах возрастают с омоложением возраста.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ И ТАНТАЛА

Ниобий открыт в 1801 г. английским химиком Ч. Гетчеттом. Тантал открыт в 1802 г. шведским химиком А. Экебергом.

Чистые Nb и Ta металлы легко поддаются механической обработке. Ниобий стоек по отношению к органическим и минеральным кислотам, за исключением плавиковой и ее смеси с азотной. Концентрированная серная кислота растворяет его при высокой температуре. При нормальной температуре на тантал не действует ни влага, ни воздух. При нагревании на воздухе выше 360 °С тантал поглощает азот и другие газы, выше 600 °С он сгорает, образуя Ta₂O₅. Максимальная растворимость водорода в тантале, как и в ниобии, наблюдается при обыкновенной температуре. При повышенной температуре металлический тантал устойчивее, чем ниобий. Соляная, азотная и разбавленная серная кислоты, а также царская водка не оказывают на него действия даже при нагревании.

Мировое потребление ниобия в 1996 г. составило 18 тыс. т; мировые запасы 16 млн т Nb₂O₅. Цена пирохлорового и колумбитового концентратов 3,6-3,8 дол/кг пятиоксида в концентрате. Металл в слитках стоит 55-70 дол/кг (2008 г). Мировое потребление тантала в 1994 г. превысило 1000 т; запасы Ta₂O₅ 197 тыс. т. Цена за 1 кг Ta₂O₅ в танталитовом концентрате 35 дол., металлический тантал стоит около 350 дол/кг (2008 г.).

Добыча тантала в России осуществляется только на Ловозерском комплексном Се-TR-Nb-Ta месторождении в Мурманской области компанией ЗАО «Ловозерский ГОК», которая производит лопаритовый концентрат с содержанием Ta₂O₅ в концентрате – 0,5-0,6%.

Геохимия и минералогия

Среднее содержание ниобия в земной коре 0,00172, тантала - 0,00015 %. Наибольшие содержания отмечаются в щелочных породах (0,0122 % Nb и 0,0011 % Ta). Nb и Ta – типичные оксифильные элементы. В природе известны только кислородные соединения Ta и Nb.

Минералогия этих металлов исключительно богата. Известно 47 минералов Ta и 108 - Nb.

Ta и Nb легко замещают друг друга и часто замещаются титаном и оловом. Во многих оксидах Ti преобладает над Nb. Для минералов тантала гораздо характернее присутствие Sn. Редкие земли в количестве до 50 % являются самой распространенными компонентами сложных оксидов Ta и Nb. При этом в минералах тантала преобладают иттрий и Y-лантаноиды, тогда как в минералах ниобия преобладают Се-лантаноиды. В большей части сложных оксидов тантала и ниобия присутствует уран, иногда вместе с торием.

Из 108 минералов Nb практическое значение имеют пирохлор - NaCaNb₂O₆F, в меньшей мере - колумбит FeNb₂O₆ и лопарит – (Ce,Na,Ca)(Ti,Nb)O₃. Из 47 минералов Ta практическое значение имеют танталит FeTa₂O₆, микролит NaCaTa₂O₆F и воджинит MnSnTa₂O₈

По запасам месторождений ниобия среди эндогенных выделяют: уникальные – свыше 5 000 тыс. т.; крупные – 500–5 000 тыс. т.; средние – 100-500 тыс. т. мелкие – менее 100 тыс. т. Среди экзогенных - уникальные – более 500 тыс. т.; крупные – 50-500 тыс. т.; средние – 10-50 тыс. т.; мелкие – менее 10 тыс. т.

Эндогенные руды Nb при содержании (в %) 0,1-0,3 – бедные; 0,3-0,6 - рядовые, свыше 0,6 - богатые. Экзогенные руды Nb: до 0,1 - бедные, 0,1-0,3 - рядовые, свыше 0,3 - богатые. По запасам месторождений тантала среди эндогенных выделяют крупные – более 5 тыс. т.; средние – 0,5-5 тыс. т.; мелкие – менее 0,5 тыс. т.

Эндогенные руды Ta при содержании до 0,012 - бедные, 0,012-0,018 - рядовые, свыше 0,018 % - богатые. Экзогенные руды Ta: до 0,004 - бедные, 0,004-0,008 - рядовые, более 0,008 - богатые.

Металлогения

подавляющая часть мировых запасов Nb (99 %) и большая часть Ta (70 %) приходится на магматогенные месторождения, связанные с щелочными породами и карбонатитами.

Средние содержания Nb в месторождениях, связанных с кислыми породами, варьируют в узких пределах - от 0,006 до 0,015 %, в месторождениях, связанных с щелочными породами, в 10-50 раз выше, варьируя в пределах от 0,1 до 0,8 %. Среднее содержание Ta в месторождениях, связанных с кислыми породами, колеблется от 0,004 до 0,03 %, а в щелочных месторождениях - от 0,015 до 0,03 %. Для месторождений, связанных с кислыми породами, отношение Nb/Ta колеблется от 0,3 до 3. В щелочных месторождениях оно близко к 10, в пироксеноносных карбонатитах щелочно-ультраосновных массивов достигает 40 и более, а в карбонатитах, связанных с миаскитами, - даже 200.

подавляющая часть всех мировых магматогенных запасов Ta и Nb сосредоточена в месторождениях древних платформ и докембрийских срединных массивов. Основная масса мировых магматогенных запасов Nb приходится на герцинскую и киммерийскую эпохи, а у Ta - на позднегерцинскую, каледонскую и герцинскую.

Ведущая роль как по добыче, так и по запасам Nb принадлежит корам выветривания, на которые приходится свыше 2/3 всей его мировой добычи и свыше 40 % мировых запасов. Основным промышленным типом ниобиеносных кор выветривания являются остаточные россыпи на карбонатитах с пироксеном, нередко колумбитизированным (Бразилия, Африка, Россия). Самым крупным из разрабатываемых объектов этого типа в настоящее время является месторождение Боррейро-ди-Араша (Бразилия), кора выветривания которого содержит до нескольких процентов Nb₂O₅.

Хотя на экзогенные месторождения приходится всего 8,4 % всех мировых запасов тантала, за рубежом до недавнего времени они служили основным источником добычи и сейчас поставляют более половины танталовых концентратов на мировой рынок. Из экзогенных мировых запасов тантала 60 % приходится на коры выветривания, 40 % - на россыпи.

Промышленные типы месторождений

1) собственно ниобиевые месторождения (карбонатиты с пироксеном, их коры выветривания и связанные с ними россыпи), в которых отношение содержания ниобия к содержанию тантала превышает 15;

2) тантало-ниобиевые месторождения (уртиты с лопаритом, щелочные граниты с танталпироксеном и колумбитом, а также связанные с ними коры выветривания и россыпи), с отношением содержания ниобия к танталу от 5 до 15, когда оба металла имеют сопоставимое промышленное значение;

3) собственно танталовые месторождения (редкометалльные гранитные пегматиты с танталатами, редкометалльные граниты щелочно-земельного ряда с танталит-колумбитом и микролитом), в которых в стоимостном выражении тантал резко превалирует над ниобием, хотя содержание ниобия может в несколько раз превышать содержание тантала.

Карбонатиты щелочно-ультраосновных массивов (Ковдор, Белая Зима, Россия)

В настоящее время на земном шаре выявлено около 400 щелочно-ультраосновных массивов (УЩМ), из которых изучена относительно подробно только половина. Все рудоносные УЩМ приурочены к древним платформам, главным образом к их периферическим областям. Размещение массивов в пределах щелочно-ультраосновных провинций площадное, реже линейное. Возраст УЩМ варьирует от позднего докембрия до современного, причем по мере омоложения последовательно наращивается его интенсивность.

Большинство УЩМ представляет собой в плане изометричные, реже вытянутые в плане тела. В разрезе они имеют колонообразную форму и вертикальное залегание. Площадь УЩМ в среднем составляет 14 км².

По содержанию полезных компонентов выделяют четыре парагенетических типа месторождений:

- ультрабазиты с перовскитом;
- альбититы с гатчеттолитом;
- кальцит-апатит-магнетит-форстеритовые образования с гатчеттолитом и бадделеитом;
- апатит-кальцитовые карбонатиты с пироксеном, местами с гатчеттолитом.

УЩМ содержат в промышленных количествах флогопит и апатит, черные, цветные, радио-активные и редкие металлы. Карбонатиты данной формации - самые крупные и наиболее богатые месторождения Nb, иногда одновременно небольшие месторождения Ta, Zr и Hf. Содержание Nb₂O₅ в месторождениях составляет 0,3-0,8 %, а запасы - многие миллионы тонн.

Формирование столбообразных УЩМ происходило, очевидно, следующим образом. В глубинном магматическом очаге благодаря ликвационной дифференциации верхняя часть обогащается легкоплавкими и летучими компонентами - щелочами, галоидами, азотом, водородом и др. Благодаря этому происходит расплавление кровли массива, так как щелочи и летучие компоненты значительно понижают температуру плавления. В результате возникает "самоходный" механизм продвижения магмы вверх: кровля расплавляется под воздействием плавней, а остывающий расплав, опускаясь вниз, кристаллизуется.

Подобный механизм проплавления не требует никаких энергетических затрат, так как при кристаллизации минералов внизу столба выделяется теплота. Процесс проплавления продолжается до тех пор, пока в верхних этажах земной коры вблизи от поверхности внутреннее давление расплава не превысит внешнее, и плавни-минерализаторы не вырвутся из магмы путем внедрения в трещины или взрыва. В результате резкого падения давления начинается кристаллизация магматического расплава, равновесные условия в очаге нарушаются, происходит ликвация и другие явления магматической дифференциации.

Механизм самопроплавления хорошо объясняет столбообразную, округлую в плане форму большинства щелочных массивов. Снимается и проблема освоения пространства магматическим расплавом. Понятно, почему не установлено брекчирование и смятие окружающих пород, которые должны были происходить, если бы расплав внедрялся в столбообразные трещины под давлением. Понятно и вертикальное залегание щелочных массивов, поскольку направление движения магмы определяла не трещинная тектоника, а накопление плавней-минерализаторов в апикальной части магматического очага.

Карбонатиты нефелин-альбит-калишпатовых (миаскитовых) массивов (Вишневые горы, Урал; Лонни, Ньюмен, Канада)

В составе миаскитовых массивов наряду с калиевым полевым шпатом (ортоклазом или микро-клином) и нефелином на правах породообразующего присутствует альбит или

олигоклаз-альбит. Среди второстепенных минералов на первое место выходят гастингсит, биотит, лепидо-мелан. Редкометальные минералы представлены в основном пироксеном и цирконом, очень редко - ортитом, чевкинитом, ильменорутилом, бастнезитом, колумбитом, эшинитом, ферсмитом, бетафитом, торитом.

Для геохимии миаскитовых массивов коэффициент агаитности (отношение суммы щелочных металлов к алюминию) всегда меньше единицы.

Практическое значение (и притом небольшое) на редкие металлы имеют только три парагенетических типа месторождений:

- щелочные пегматиты с пироксеном и цирконом;
- альбититы с пироксеном и цирконом;
- биотитовые карбонатиты с пироксеном.

Разрабатывались в основном карбонатиты. Это небольшие месторождения ниобия, в виде уплощённых тел и жил в экзоконтакте массива миаскитов. Содержание Nb₂O₅ - 0,1-0,15 %. Характерно практическое отсутствие тантала. Запасы ниобия в таких месторождениях исчисляются десятками или первыми сотнями тысяч тонн.

Месторождения в нефелин-калишпатовых ("агаитовых") массивах

Таких массивов во всем мире известно не более десяти. Все они расположены на древних платформах: Хибинский, Ловозерский на п-ове Кольском, Томтор в Якутии, Илимауссак в Гренландии, Посус-ди-Калдас в Бразилии, Лос в Гвинее и Пилансберг в ЮАР. Возраст массивов колеблется от верхнего протерозоя до мезозоя.

Все нефелин-калишпатовые массивы имеют в плане округлую форму, в разрезе - грибо- или воронкообразную. Борта всегда падают к центру массива. Массивы крупные - от 120 до 1300 км² (Хибины).

Во внутреннем строении всех массивов отмечаются общие черты: 1) массивы всегда зональны, причем зональность имеет закономерно концентрический характер; 2) как правило, образование зон происходит в порядке от лейкократовых к меланократовым; 3) процесс кристаллизации в щелочных породах всегда направлен в сторону увеличения коэффициента агаитности.

Зональность внутреннего строения массивов является результатом магматической дифференциации в близповерхностных условиях, когда получают развитие не только кристаллизационная дифференциация, но и ликвация, автометасоматоз и перекристаллизация.

Ритмичная полосчатость расслоенных комплексов, связана, очевидно с периодическими приоткрываниями магматической камеры путем излияния магмы и (или) выброса газов и скачкообразным уменьшением давления летучих в расплаве.

Минеральный состав массивов чрезвычайно разнообразен. В отдельных породах массивов в качестве породообразующих минералов присутствуют не только К-На полевые шпаты и нефелин, содержание которых в любом массиве превышает 10-15 %, но и нозеан, гакманит, канкринит, содалит, анальцит, лейцит, а также эгирин, роговая обманка, эвдиалит, мурманит, астрофиллит, ловозерит, сфен, апатит. Типичными второстепенными минералами являются также магнетит, ринколит, лампрофиллит, ильменит, титаномагнетит и др.

Различается шесть парагенетических типов месторождений данной формации:

- апатит-нефелиновые руды;
- уртиты и малиниты с лопаритом;
- эвдиалитовые луявриты и эвдиалититы;
- стенструпиновые и ловозеритовые луявриты;
- науяиты с чкаловитом;
- карбонатиты с пироксеном, рабдофанитом, скандием.

Апатит-нефелиновые руды образуют крупные месторождения Се-лантаноидов, Sr (в апатите), Rb и Ga (в нефелине); науяиты с чкаловитом - перспективный объект для добычи Be и U; остальные типы - крупные комплексные месторождения Ta, Nb, редких земель.

Среднее содержание Nb_2O_5 в целом по Ловозерскому массиву достигает 0,1 %, Ta_2O_5 - 0,008, а в урритах и эвдиалитовых луявритах - до 0,3 - Nb_2O_5 и 0,024 - Ta_2O_5 . Главные минералы-носители Nb и Ta - лопарит, эвдиалит, мурманит, сфен, реже - луэшит. В Ловозерском массиве лопаритоносные урриты мощностью от 0,5-2,7 м присутствуют почти в каждой уррит-фойяит-луявритовой пачке и прослежены в виде очень пологозалегающих слоев на десятки км. Это одно из самых крупных месторождений Ta, Nb и Се-редких земель в мире.

Все нефелин-калишпатовые массивы обогащены редкими землями, в целом на массив содержание суммы их оксидов достигает 0,24 %, а в отдельных породах (малиньитах, нефелин-apatитовых рудах, эвдиалитовых и порфириовидных луявритах) - 1,5, в эвдиалититах - даже несколько процентов. Главные минералы-носители редких земель - лопарит, эвдиалит, сфен, а также стенструпин, ринколит и апатит.

Апатит содержит обычно около 1 % редких земель (местами до 12 %). В нефелин-apatитовых рудах ийолит-уртитового комплекса Хибинского массива апатит образует особенно большие концентрации (30-80 %). При переработке апатитового концентрата по азотно-кислотной технологии редкие земли относительно легко извлекаются и поэтому, несмотря на невысокое содержание их в минерале, представляют промышленный интерес. Апатит наряду с редкими землями может служить источником попутного получения стронция.

Для редких земель в нефелин-калишпатовых массивах характерно резкое преобладание Се-лантаноидов над суммой Y-лантаноидов и иттрия.

Самый распространенный редкий металл в нефелин-калишпатовых массивах - цирконий. Его содержание в целом на массив достигает 0,35 %, а в эвдиалитовых луявритах, какортokitах, ловозеритовых луявритах - 2 %. Эвдиалититы содержат до 5 % циркония. В массиве Посус-ди-Калдас промышленное значение имеет бадделейт.

Бериллий образует в нефелин-калишпатовых массивах и связанных с ним пегматитах около 30 собственных минералов.

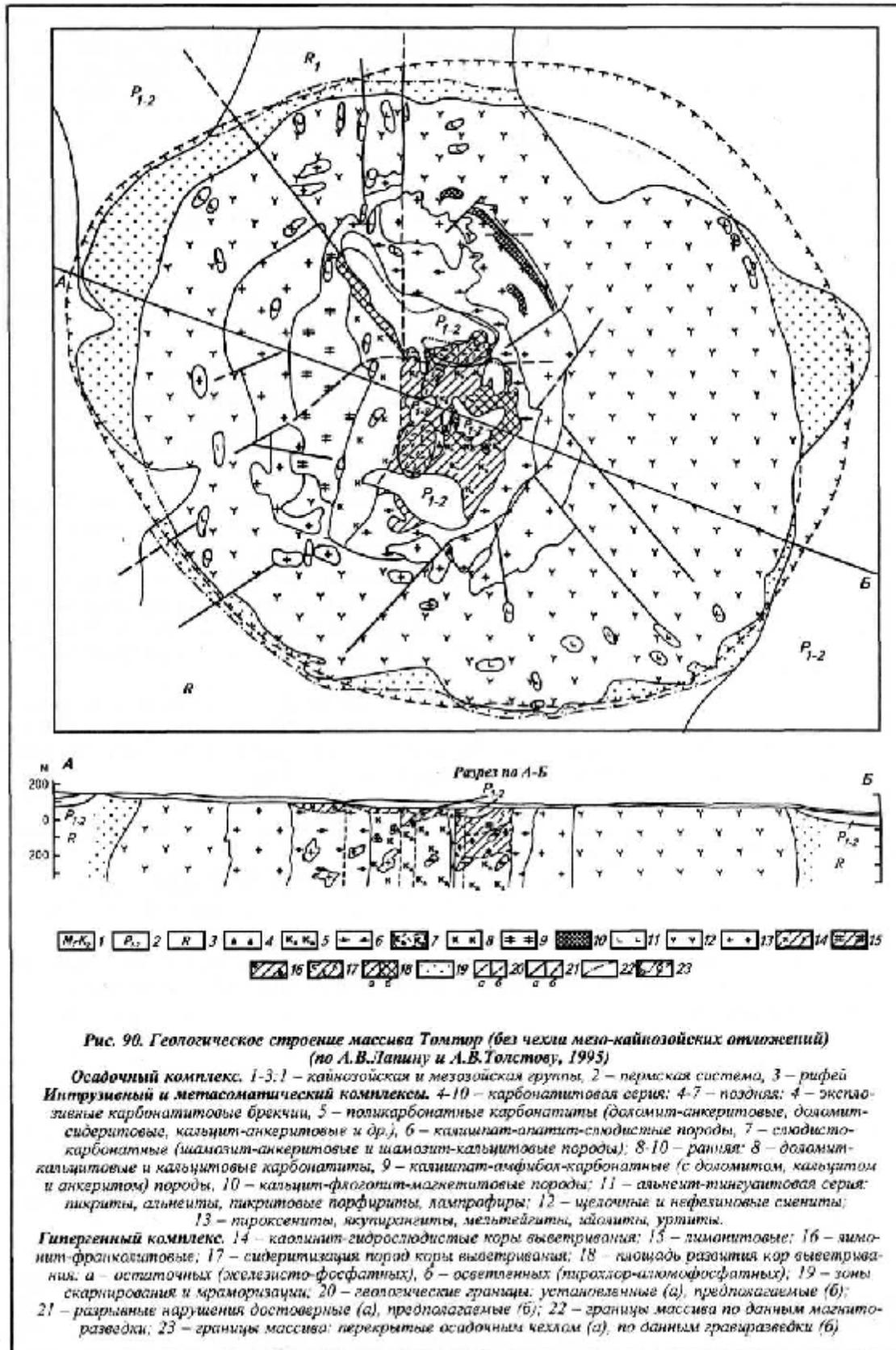
Таким образом, нефелин-калишпатовые массивы характеризуются колоссальными ресурсами целого ряда редких металлов: Ta, Zr, Hf, Се- (в меньшей степени Y-) редких земель, Nb, Sr. Ресурсы первых четырех не имеют равных в других типах месторождений.

Месторождение Томтор. Среди массивов описанной формации особого внимания заслуживает недавно открытое и разведанное месторождение Томтор в Якутии (рис). Это крупный массив площадью 300 км², расположенный на краю Сибирской платформы между Анабарским щитом и Оленекским поднятием. В строении массива принимает участие комплекс щелочных пород и карбонатитов (см. рис).

Ранние кальцитовые карбонатиты содержат всего 0,056 % Nb_2O_5 и 0,55 - TR_2O_3 . Поздние кальцитовые карбонатиты - соответственно 0,18-0,49 Nb_2O_5 (в среднем 0,27 %) за счет пирохлора и 0,7-1,8 % TR_2O_3 (в среднем 0,8 %). В еще более поздних анкеритовых карбонатитах содержание Nb_2O_5 падает до 0,19, а TR_2O_3 возрастает до 1,27 %.

Карбонатиты покрыты очень богатой корой выветривания мощностью от 100 до 400 м, отдельные крупные участки которой содержат (в %): Nb_2O_5 - 7,7; $(TRY)_2O_3$ - 0,93; $(TRCe)_2O_3$ - 16,1; Sc_2O_3 - 0,062; V_2O_5 - 1,0; SrO - 3,9; BaO - 5,6; P_2O_5 - 12,7 (до 30 %).

Уникальные содержания редких металлов в корах выветривания Томтора объясняют воздействием эпигенетических процессов эндогенного или экзогенного характера.



Редкометалльные граниты щелочно-земельного ряда с танталит-колумбитом, микролитом и криофиллитом

Этыкинское и Орловское месторождения (Забайкалье) приурочены к куполам гранитных массивов или их пологим эндоконтактам. Площадь месторождений достигает 2 км². Вмещающие породы представлены метаморфизованными песчано-сланцевыми толщами. Граниты сложены примерно равными количествами кварца, альбита и калишпата. Калишпат в Этыкинском месторождении представлен и амазонитом и микроклином, в Орловском (и прочих того же типа) - только микроклином. Редкометалльные минералы представлены криофиллитом, лепидолитом, микролитом, танталит-колумбитом, стрюверитом, Та-касситеритом, амблигонитом (иногда до 5 %).

Промышленное оруденение прослеживается на глубину десятков метров, редко до 150 м. На месторождениях наблюдается весьма контрастная вертикальная зональность: по направлению от апикальной (прикупольной) части массивов на глубину лепидолит последовательно сменяется криофиллитом, мусковитом и биотитом, микролит - танталитом и колумбитом, а стрюверит - ильменоругилом. Резко уменьшается содержание Та₂О₅: 0,03-0,04 % - в прикупольной части; 0,01 % - в нескольких десятках метров от зальбанда; 0,005 % и менее - на глубине 100-200 м. Одновременно уменьшается величина соотношения Та₂О₅/Nb₂О₅ от 1,5 до 0,2.

Редкометалльные граниты образуют мелкие, реже средние по масштабу месторождения тантала (с запасами до 10-15 тыс. т при содержании в среднем 0,013-0,015 % Та₂О₅), из которых попутно могут добываться литий, рубидий (за счет лепидолита-криофиллита) и олово (касситерит).

Редкометалльные гранитные пегматиты

К ним относятся: Берник-Лейк (Канада), Дарае-Пич (Афганистан), Коктогай (КНР) и др.

К настоящему времени на всех континентах и в самой разнообразной геологической обстановке изучено и разведано более тысячи месторождений редкометалльных пегматитов. Основные запасы всех редких элементов приходятся на долю пегматитов, расположенных в пределах древних платформ и докембрийских срединных массивов. Пегматиты образовывались от архея до кайнозоя. На докембрийские месторождения редкометалльных пегматитов приходится около 80 % всех пегматитовых запасов тантала и ниобия, на палеозойские - 15 %, а на мезо-кайнозойские - 5 %.

Промышленное значение на редкие металлы имеют пять типов гранитных пегматитов:

- 1) микроклиновые с бериллом и колумбитом;
- 2) микроклин-альбитовые с бериллом и танталит-колумбитом;
- 3) сподумен-микроклин-альбитовые с лепидолитом, петалитом, поллуцитом, танталатами, бериллом (см рис);
- 4) альбитовые с танталитом, бериллом, касситеритом и сподуменом или без него;
- 5) альбит-сподуменовые с бериллом, колумбитом.

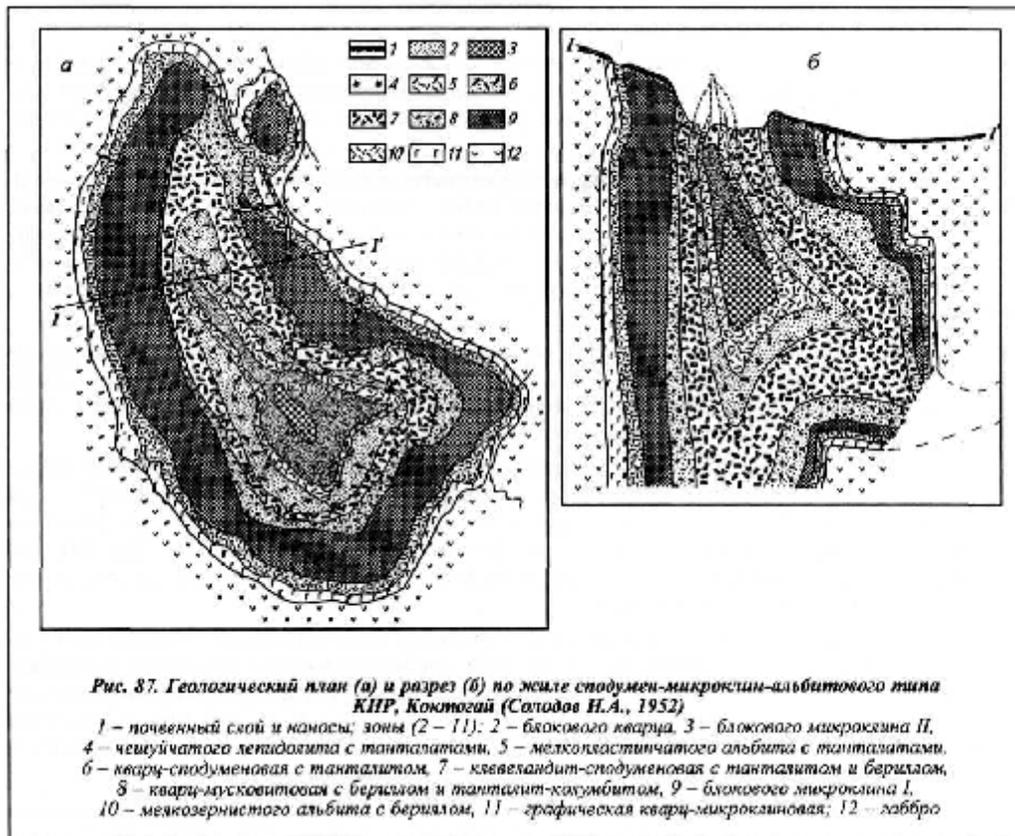
Рудные тела редкометалльных пегматитов одного и того же парагенетического типа обладают определенным сходством формы и размера тел. Протяженность микроклиновых и альбитовых пегматитов обычно не превышает десятков или первых сотен метров, микроклин-альбитовых и сподумен-микроклин-альбитовых - 700-1000 м; а у альбит-сподуменовых достигает 3 км.

Во всех детально разведанных промышленных месторождениях альбит-сподуменовых пегматитов среднее содержание Та₂О₅ составляет 0,006-0,01 %, в сподумен-микроклин-альбитовых - 0,015-0,03, в альбитовых - 0,015-0,02, в микроклиновых - не более 0,003.

Постоянство размеров рудных тел и среднего содержания редких элементов в месторождениях одного и того же типа обуславливает и определенность максимальных промышленных запасов, которые по наиболее крупным месторождениям не превышают 3-5 тыс. т Ta_2O_5 .

Редкометалльные гранитные пегматиты в начале развития металлургии редких металлов почти целиком обеспечивали ее танталом. При этом основная добыча тантала осуществлялась из пегматитовых кор выветривания и связанных с ними переотложенных россыпей или из шла-ков металлургической переработки касситерита, имеющего в основном пегматитовый генезис. Лишь в 30-е годы XX века в СССР, а затем – и в других странах) значительные объемы тантала стали получать из коренных руд пегматитовых месторождений.

Коры выветривания в промышленном отношении обладают двумя преимуществами. Во-первых, из-за рыхлого состояния руды при ее добыче оказываются ненужными буровзрывные работы, а при обогащении - доизмельчение руды, поэтому минимально среднее содержание тантала уменьшается в несколько раз, что позволяет вовлекать в эксплуатацию гораздо большие площади выходящих на поверхность пегматитовых тел. Этому способствует, во-вторых, увеличение содержания танталатов в коре выветривания по сравнению с исходными коренными пегматитами на 20-50 % из-за выноса более легко разрушаемых минералов (прежде всего альбита и в меньшей степени слюд). Рентабельность добычи повышается также благодаря открытому способу отработки.



МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА

В 1789 г. немецкий химик Мартин Клапрот, изучавший руды Яхимовских месторождений, определил в составе черного смоляного камня новый химический элемент и назвал его ураном в честь открытой в 1871 г. новой планеты Солнечной системы.

В XIX столетия соли урана нашли первое применение как красители в стекольной и фарфоровой промышленности.

Открытие французским физиком Г.Беккерелем в 1896 г. явления радиоактивности вновь привлекло внимание ученых к урану. Из урановых руд с отвалов Яхимовских рудников Пьером и Марией Кюри в 1898 г. был получен радий.

К 1940 г. теоретически была обоснована возможность освобождения огромного количества энергии при распаде атомов. Начавшаяся Вторая мировая война стимулировала развитие исследований в области ядерной физики в военных целях и способствовала быстрому созданию ядерного оружия сначала в США (1945 г.), а затем и в СССР (1949 г.). Создание и применение атомного оружия в конце Второй мировой войны, разделение мира на западный и восточный военные блоки, наращивающие свой ядерный потенциал, – все это способствовало становлению и развитию военной отрасли атомной промышленности. В дальнейшем на ее базе получила развитие гражданская ядерная индустрия, базирующаяся на использовании. В СССР в 1954 г. была пущена первая атомная электростанция, а в 1957 г. был спущен на воду первый атомный ледокол "Ленин". В настоящее время атомная энергетика получает всё более широкое распространение.

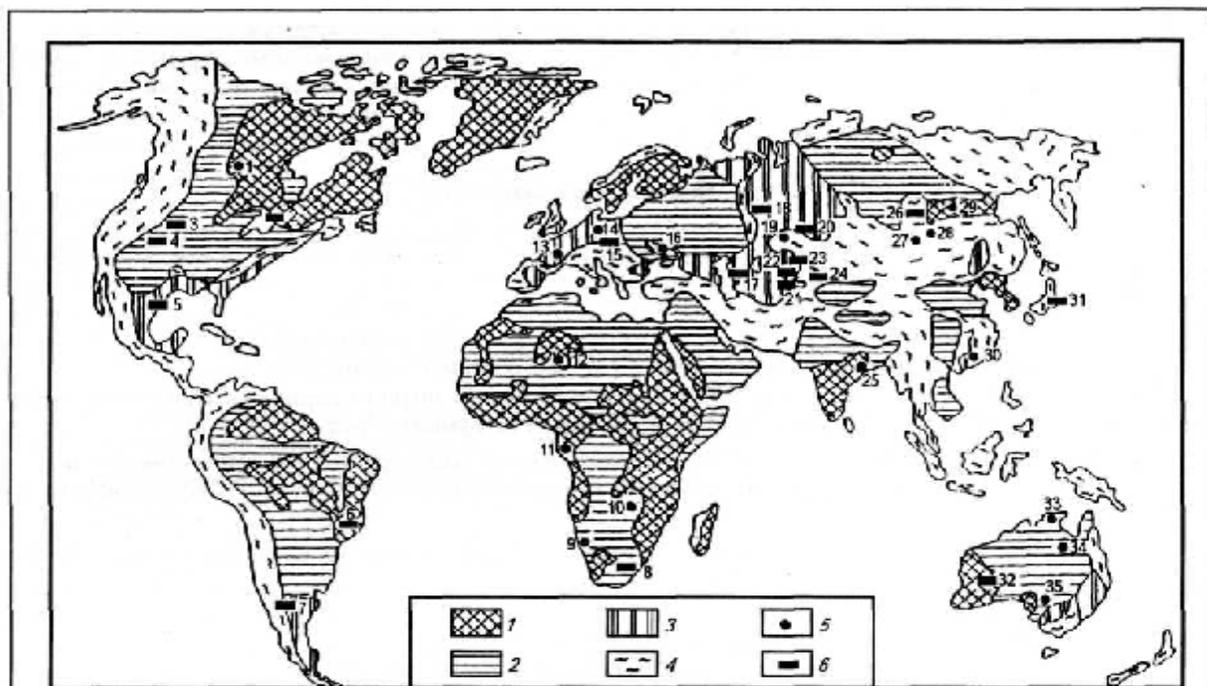


Рис. 120. Основные районы распространения урановых месторождений:

1 – щиты древних платформ; 2 – чехол древних платформ; 3 – чехол молодых платформ; 4 – складчатые пояса; районы урановых месторождений: 5 – эндогенных, 6 – экзогенных (1 – Атабаска, 2 – Блэйн-Ривер, 3 – Вайоминг, 4 – плато Колорадо, 5 – Техас, 6 – Сьерра-де-Жакобина, 7 – Сьерра-Пинтада-Маларгю, 8 – Витватерсранд, 9 – Рассинг, 10 – Замбийско-Заирский, 11 – Габон, 12 – Агадес, 13 – Центрально-Французский, 14 – Рудногорский, 15 – Лейбский, 16 – Центрально-Украинский, 17 – Прикаспийский, 18 – Зауральский, 19 – Северо-Казахстанский, 20 – Семизбайский, 21 – Чу-Сарьсуйский, 22 – Сыр-Дарьинский, 23 – Центрально-Кызыл-Кумский, 24 – Верхнеийский, 25 – Синзбум, 26 – Витимский, 27 – Дорнотский, 28 – Стрельцовский, 29 – Центрально-Алданский, 30 – Юго-Восточный Китай, 31 – Хонсю, 32 – Иллири, 33 – Аллигейтор-Риверс, 34 – Маунт-Айза, 35 – Олимпик-Дам)

В настоящее время уран является одним из важнейших видов природных полезных ископаемых, роль которого в мировом энергетическом балансе в ближайшем будущем будет возрастать. На начало 2008 года в 32 странах мира эксплуатируется 439 атомных реакторов суммарной мощностью 372 ГВт. Доля АЭС в мировом производстве электроэнергии составляет 16%.

Основные мощности АЭС сосредоточены в США (26%), Франции (17%), Японии (13%), России (6%) и Германии (5.6%), они же являются и главными потребителями урана. Устойчивый спрос на уран привёл к открытию ряда крупных ураново-рудных провинций в Канаде, Австралии, Бразилии, Нигере, Казахстане, России, Узбекистане, Украине (рис).

По состоянию на 1 января 2005 г. разведанные запасы урана стоимостной категории до 80 дол/кг оцениваются в 4,26 млн т. Наиболее крупными запасами урана владеют Австралия, Казахстан, ЮАР, Россия, Нигер, Бразилия, Канада и США.

Производство урана с 1988 г. систематически снижается и в настоящее время уже не обеспечивает все возрастающие потребности атомной энергетики. В 2005 году мировое производство урана составило около 40 тысяч тонн при годовом потреблении порядка 69 тысяч тонн. Урановый дефицит покрывается складскими запасами и вторичными источниками. По прогнозам МАГАТЭ, к 2020 году годовое производство вырастет до 65-70 тысяч тонн при росте потребления до 82-85 тысяч тонн урана.

После распада СССР на территории России осталось только одно крупное горно-добывающее предприятие - Приаргунский горно-химический комбинат. Учитывая неизбежность дальнейшего развития атомной энергетики, поиски новых месторождений урана вновь приобретают актуальность.

Уран в таблице Менделеева имеет порядковый номер 92, атомную массу 238,07 и является членом группы элементов, выделяемых в семейство актиноидов. Известно три природных изотопа урана: ^{238}U (99,2739 %), ^{235}U (0,7024 %) и ^{234}U (0,0057 %). Периоды их полураспада соответственно $4,51 \cdot 10^9$, $7,3 \cdot 10^8$ и $2,48 \cdot 10^5$ лет.

Кларк урана в земной коре $2,5 \cdot 10^{-4}$ %. Уран относится к элементам переменной валентности и в химических соединениях может находиться в состоянии U^{3+} , U^{4+} , U^{5+} и U^{6+} . Ионы U^{3+} и U^{5+} не характерны для природных условий. Четырехвалентные соединения урана слабо растворимы, а шестивалентный уран образует устойчивый в природных условиях комплек-сный катион уранильной группы $(\text{UO}_2)^{2+}$, что обеспечивает возможность его миграции.

В эндогенных и экзогенных процессах уран ведет себя по-разному.

Распространенность урана в магматических породах определяется прежде всего их химическим составом. Наибольшие концентрации отмечаются в щелочных и ультращелочных породах типа сиенитов и лопаритовых луювритов - $(10-80) \cdot 10^{-4}$ %. Уран, как и торий, изоморфно входит в состав ряда минералов (эвдиалит, лопарит, ферсманит и др.). В кислых породах содержание урана составляет в среднем $(3-4) \cdot 10^{-4}$ %. Он накапливается как в виде примесей в акцессорных минералах (циркон, ортит, монацит, сфен, апатит и др.), так и в форме "подвижного" урана в микровключениях и межзерновых швах.

В постмагматическую стадию рудообразования уран переносится и отлагается гидротермальными растворами. Уран переносится в форме иона уранила $(\text{UO}_2)^{2+}$ в виде уранил-карбонатных комплексов $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$ или $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$.

В зоне гипергенеза в окислительной обстановке уран переходит в шестивалентную форму (легкорастворимый ион уранила $(\text{UO}_2)^{2+}$) и может мигрировать в поверхностных водах на значительные расстояния. В виде легко растворимых комплексных соединений уран выщелачивается из коренных месторождений и горных пород и поступает в поверхностные водные растворы. Осаждение урана в зоне гипергенеза происходит на восстановительном геохимическом или нейтрализационном барьере. Уран сорбируется

органическим веществом, углеводородами, фосфатами, глауконитом, глинами, гидроксидами железа и др. В процессе пластовой фильтрации U-содержащих вод на восстановительных барьерах формируются крупные урановорудные залежи, приуроченные к зонам пластового окисления.

При метаморфизме уран обычно выносится из горных пород.

Известно более 100 минералов урана. Основные ценные минералы: уранинит $(U,Th)O_{2x}$, настуран UO_{2x} , урановая чернь UO_{2x} , браннерит $(U,Th)Ti_2O_6$, коффинит $U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$, уранофан $Ca[UO_2(SiO_3OH)]_2 \cdot 5H_2O$, отенит $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10H_2O$, торбернит $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10H_2O$, цейнерит $Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 12H_2O$, карнотит $K_2(UO_2)_2(V_2O_8) \cdot 3H_2O$.

По содержанию урана (в %) выделяются пять сортов руд: очень богатые (>1); богатые (1-0,5); средние (0,5-0,25); рядовые (0,25-0,1); бедные ($<0,1$).

Наиболее легко уран извлекается из собственных минералов - карбонатов и сульфатов, фосфатов, арсенатов, ванадатов и молибдатов. Это, как правило, вторичные минералы зоны гипергенеза, в которых уран присутствует в шестивалентной форме. Хорошо извлекается уран из руд, представленных основными урановыми минералами - настураном и урановыми чернями. Более устойчивыми к процессам выщелачивания являются коффинит и особенно браннерит.

Типы промышленных месторождений

Согласно классификации МАГАТЭ, разработанной в 1988-1989 годах, месторождения урана разделены на 16 геолого-промышленных типов, три из которых на сегодняшний день доминируют в добыче урана:

- песчаниковый тип, характеризующийся связью урановой минерализации с древними континентальными и прибрежно-морскими песками и песчаниками (месторождения Казахстана, Намибии, Нигера, США, Узбекистана);

- тип «несогласия», характеризующийся приуроченностью оруденения к зонам структурно-стратиграфических несогласий между осадочными породами позднепротерозойского возраста и интенсивно измененными породами кристаллического фундамента архея и раннего протерозоя (Канада, Австралия);

- брекчиевый тип, где рудами являются обогащенные ураном гематитизированные брекчии вулканических и интрузивных пород (Олимпик-Дэм, Австралия).

Около 60% мировых подтвержденных запасов урана сосредоточено в месторождениях трёх названных промышленных типов

Месторождения эндогенной серии

Позднемагматические месторождения

Относительно редки и связаны с пегматоидными образованиями кислых и щелочных магм, представленных аляскитовыми гранитами и карбонатитами.

К *магматогенным* относят месторождения уранинитовой формации в аляскитовых гранитах. Типичным представителем является месторождение Россинг в Намибии. Пространственно оно приурочено к Дамарской складчатой зоне Южно-Африканской платформы. Месторождение представляет собой комплекс раннепалеозойских пегматоидных пород в гнейсах, сланцах и мраморах позднего докембрия. При крупных запасах содержание урана в рудах невысокое (0,03-0,06 %). Оруденение в виде равномерной вкрапленности приурочено к аляскитам, образующим сложные крутопадающие тела, состоящие из кварца, микроклина и небольшого количества биотита. Выделены две зоны рудоносных аляскитов шириною около 1 км, залегающие согласно с простиранием вмещающих пород. Они прослежены по простиранию более чем на 3 км.

Первичные руды представлены аляскитами с мелкой (до 0,1 мм) вкрапленностью уранинита, бетафита и браннерита. В зоне окисления преобладают минералы шестивалентного урана типа бета-уранофана.

Зерна урановых минералов образуют включения в кварце, полевоом шпате и биотите, развиваются по мелким трещинкам, с радиоактивными минералами обычно ассоциируют циркон, монацит, апатит, сфен, флюорит, реже встречаются сульфиды, магнетит и гематит.

Возраст вкрапленников уранинита определен в 510 ± 40 млн лет.

Своеобразным месторождением в *карбонатитах* является **Палабора** (ЮАР, район Трансвааля). Это крупнейшее медное месторождение, где уран, несмотря на низкие содержания (0,001-0,01 %), в течение ряда лет является объектом попутной добычи.

Месторождение приурочено к многофазному кольцевому интрузиву ультраосновных и щелочных пород. Наиболее ранним является трубообразное тело пироксенитов; более поздние комплексы пород представлены сиенитами, рудными полосчатыми карбонатитами с апатитом и безрудными карбонатитами. Возраст пород комплекса около 2050 млн лет.

Рудные апатитоносные полосчатые карбонатиты слагают штокообразное тело в центре массива сечением 1,4x0,8 км. В карбонатитах отмечена обильная медная минерализация, которая прослеживается до глубины более 1000 м. Минеральный состав руд весьма разнообразен: апатит, магнетит, титаномагнетит, халькопирит, борнит, кубанит, халькозин, пирротин, пентландит, миллерит, бравоит и другие минералы. Главный урановый минерал - ураноторит. Кроме основного компонента - меди из руд попутно извлекаются уран, золото, серебро и платиноиды.

Гидротермальные месторождения

Объединяют большую группу промышленно важных месторождений с разным составом руд, околорудных метасоматитов, вмещающих пород. Они существенно различаются и по структурам рудных полей и месторождений. Это - продукты химического и энергетического взаимодействия восходящих горячих водных растворов с боковыми породами, а также поровыми и трещинными водами окружающего пространства. Рудоотложение происходит при насыщении и пересыщении восходящих потоков растворов рудными и сопутствующими компонентами с последующим их выделением на геохимических барьерах и в структурных ловушках на пути миграции. Все эти факторы определяют разнообразие выделенных типов гидротермальных урановых месторождений

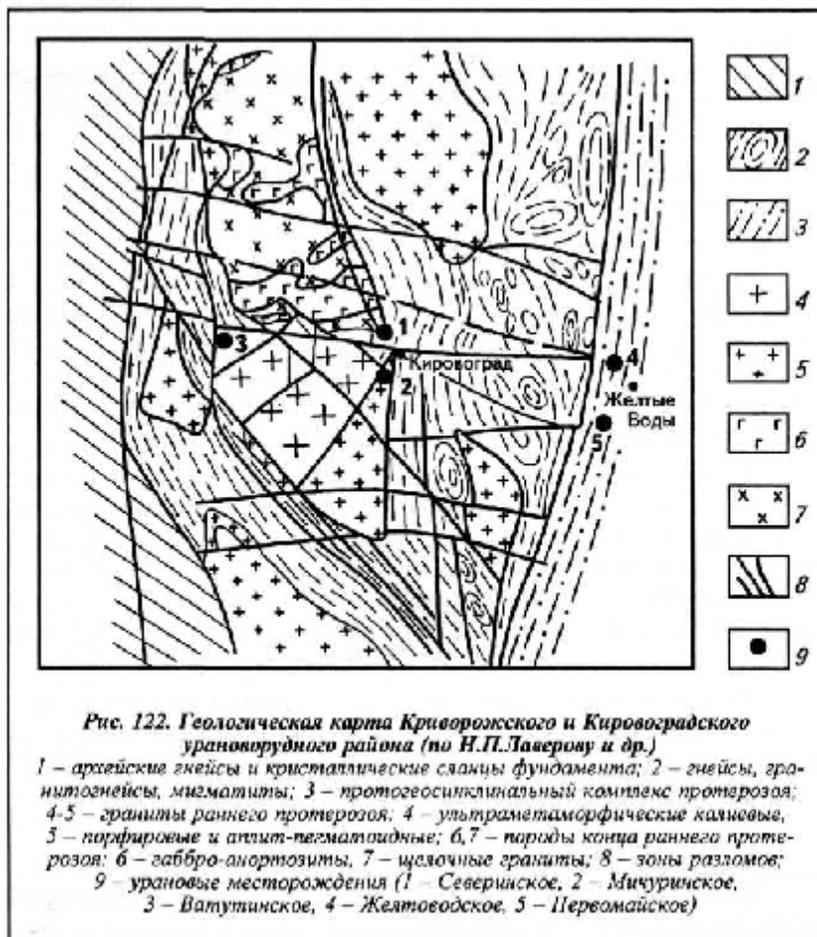
Месторождения урановой и железо-урановой формации в альбититах

Месторождения располагаются в районах древних платформ, претерпевших тектоно-магматическую активизацию в конце протерозоя. Вмещающие породы представлены древними метаморфизованными отложениями. Главными геологическими элементами, определившими условия их формирования и пространственное положение, были крупные линейные зоны глубинного заложения. К ним приурочены ураноносные альбититы (эйситы) Канадского, Индийского, Бразильского щитов, Украинского кристаллического массива.

Пространственное положение месторождений в Украинском кристаллическом массиве определяет крупная Кировоградско-Черкесская мобильная зона субмеридионального простирания, заложённая в архейском кристаллическом фундаменте. Фундамент сложен кварц-биотит-плагиоклазовыми гнейсами, мигматитами и гранитогнейсами. Отдельные реликтовые блоки исходных пород фундамента сохранились и в мобильной зоне (см. рис 122).

В центральной части мобильной зоны наблюдается купольное сооружение, ограниченное с востока и запада субмеридиональными глубинными разломами. Вдоль них интенсивно развивались процессы Na-метасоматоза, приведшие к формированию альбититов-эйситов.

Урановые месторождения приурочены к зонам альбитизации и карбонатизации пород. Наиболее широко распространены рудные залежи в виде уплощенных линз и столбообразных штокверков. В пределах рудоносной зоны альбититов они залегают кулисообразно.; мощность их изменяется в широких пределах - от нескольких метров до 50 м, чаще 10-15 м; содержание урана колеблется от 0,07 до 0,2 %, в среднем составляет около 0,1 %.



Месторождения урановой, золото-урановой и никель-урановой формации в магнезиальных метасоматитах

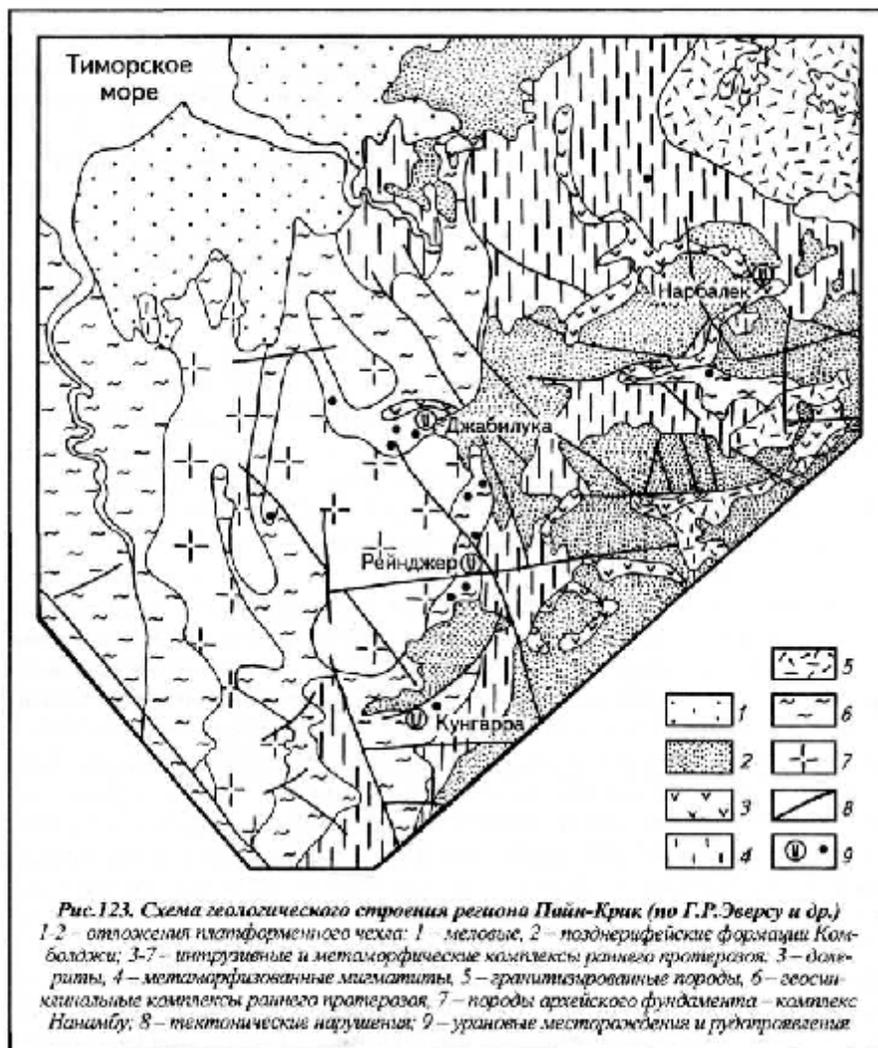
Впервые выявлены в 70-х гг. XX в. в пределах докембрийских щитов Австралии и Канады. В геологической литературе получили название урановых месторождений несогласия. Обладают большими запасами высокосортных урановых руд.

В строении урановых месторождений Австралии и Канады и условиях их образования отмечено много общего, что позволяет объединить эти объекты в единую группу. На всех месторождениях достаточно четко проявлена рудоконтролирующая роль несогласий между верхними формациями складчатого структурного этажа и залегающими на их эродированной поверхности протерозойскими отложениями платформенного чехла.

Золото-урановые месторождения Северной территории Австралии расположены в пределах протогеосинклинали Пайн-Крик, сформировавшейся на архейском фундаменте в краевой части Центрально-Австралийского щита в раннем протерозое.

Месторождение Джабилука открыто в 1971 г. Это одно из крупнейших в мире урановых месторождений богатых руд. Представлено двумя рудными телами - Джабилука-1 и 2 с общими запасами U_3O_8 около 230 тыс. т и содержанием урана в рудах 0,38%.

Месторождение залегает в породах формации Кэхил, представленных светло-серыми кварц-мусковит-серицитовыми сланцами. В сланцах выделяется продуктивная толща общей мощностью до 100 м, которая состоит из четырех рудоносных слоев. Верхний - "графитовый" - сложен хлоритовыми, углеродистыми сланцами и доломитами с зонами брекчирования. В 60 м ниже по разрезу находится основной рудоносный горизонт, вмещающий главные запасы месторождения. Он включает углеродистые и кварц-хлоритовые сланцы с прослоями доломитов и роговиков с зонами брекчирования. Ниже расположены два рудоносных слоя хлоритовых и кварц-полевошпатовых сланцев, местами обогащенных углеродистым веществом. Основные промышленные концентрации урана приурочены к хлоритизированным породам, развитым вдоль разломов, локализующихся в лежащем боку графитовых сланцев. Количество хлорита в измененных разностях пород увеличивается до 45 %. Рудные залежи во многом сходны: они стратиформны, тяготеют к зонам брекчирования, локализируются в породах, подвергшихся Mg-метасоматозу, залегают на небольшой глубине непосредственно под зоной несогласия, разделяющей породы фундамента и платформенного чехла.



Важную роль в размещении урановых руд играют карстогенные структуры обрушения.

Вдоль тектонических нарушений и послонных зон брекчирования наблюдается интенсивная хлоритизация силикатных пород и доломитизация карбонатных. На удалении от рудоносных горизонтов, на безрудных участках развиты тонкорассеянный серицит и мусковит, местами замещающие хлорит; широко проявлена турмалинизация пород. Руда обычно ассоциирует со светло-зеленым или белым криптокристаллическим хлоритом. Интенсивность процесса хлоритизации возрастает по мере приближения к рудоносным брекчиям и жилам.

Урановые минералы в рудах представлены настураном, уранинитом и коффинитом, образующими тонкие прожилки, вкрапленность, массивные послонные скопления в хлоритизи-рованных породах. Золото по времени выделения является более поздним. Мелкие зерна золота обнаружены в хлорите, замещавшем уранинит.

В рудах выявлен сложный комплекс минералов, включающий коффинит, галенит, золото со следами серебра, а также минеральные ассоциации Bi, Te, Pd, Ni, Co и Fe.. В рудах отмечены повышенные концентрации скандия, иттрия, редких земель.

Месторождения золото-урановой формации в калиевых метасоматитах (гумбеитах)

Месторождения этого типа расположены в докембрийском фундаменте центральной части Алданского щита, испытавшем тектоно-магматическую активизацию в мезозое. Все урановые месторождения приурочены к крупным разломам в породах фундамента, подновленным в период тектоно-магматической активизации (рис 124).

В стратиграфическом разрезе выделяются два основных структурных этажа: архейский фундамент и кембрийский платформенный чехол. В районе широко развиты магматические комплексы, возникшие в широком возрастном диапазоне - от архея до мезозоя.

Общая металлогения района характеризуется развитием в основном золоторудной минерализации. Месторождения золота представлены стратиформными и жильными телами в базальных слоях верхнеюрских отложений (Куранахское, Лебединое).

Разрывная тектоника играет определяющую роль в размещении урановых месторождений. В породах фундамента вдоль складок развиты крупные крутопадающие разломы. Разломы прослеживаются на десятки километров по простиранию при ширине зон до первых десятков метров. Выделяются три типа разломов: раннепротерозойские; раннепротерозойские, подновленные в процессе мезозойской активизации; собственно мезозойские. Урановое оруденение приурочено главным образом к разломам второго типа и в меньшей мере - третьего.

Процессы мезозойской активизации, наиболее ярко выраженные в зонах крупных разломов, привели к интенсивному и неоднократному дроблению и брекчированию пород, сопровождались внедрением интрузий и даек щелочно-земельного-щелочного состава, развитием процессов К-метасоматоза, формированием кварц-баритовых жил и урановых руд.

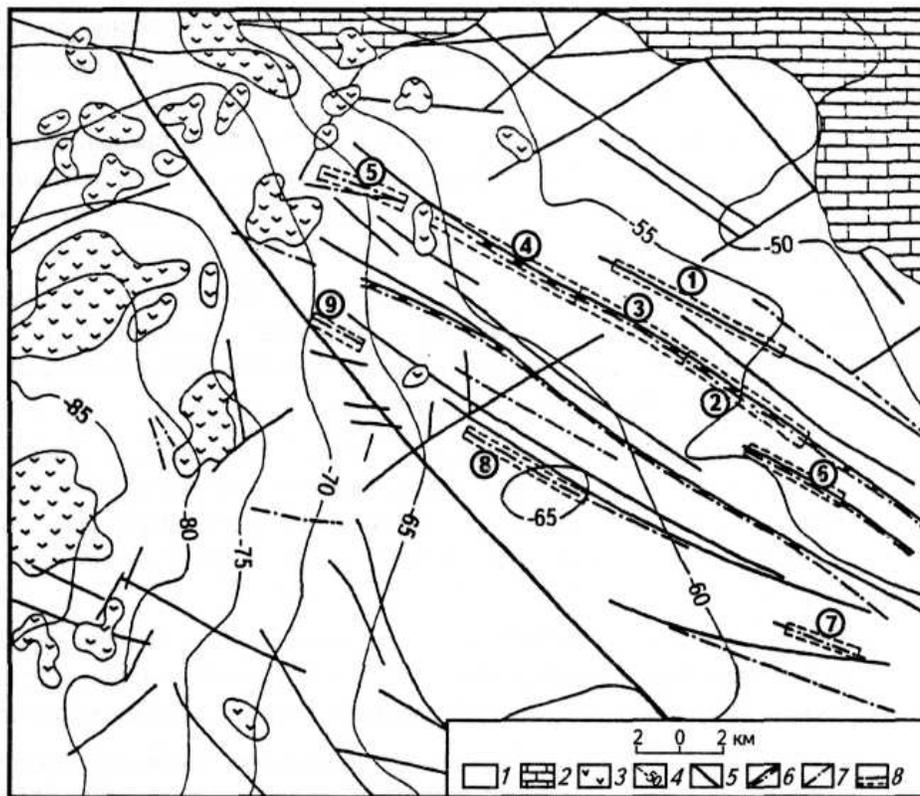


Рис. 124. Геолого-структурная карта района урановых месторождений Алдана (по Е.В.Ахапкину и др.)

1 – архейский кристаллический комплекс (гнейсы, граниты, сланцы); 2 – платформенный чехол (нижнекембрийские известняки и доломиты); 3 – мезозойский интрузивный субвулканический комплекс; 4 – изоаномалы поля силы тяжести, м.Гал; 5-7 – разломы: 5 – древнего заложения, 6 – подновленные в мезозое, 7 – мезозойского заложения; 8 – рудоносные участки разломов.

Цифры в кружках – месторождения урана: ① – Северное, ② – Дружное, ③ – Курунг, ④ – Эльконское плато, ⑤ – Элькон, ⑥ – Весеннее, ⑦ – Агдинское, ⑧ – Снежное, ⑨ – Интересное

Характерным тектоническим элементом зон являются blastsмилониты, рудоносные и безрудные брекчии. Крупные blastsмилонитовые швы (одиночные или группы) располагаются в центральной части разломов, развиваясь по дайкам ранних диоритов и мигматитам.

Главная рудовмещающая структура - зона "Южная", представленная древним тектоническим швом протяженностью более 30 км, подновленным в мезозое. В пределах этой зоны выделяются участки, рассматриваемые как отдельные месторождения: Дружное, Курунг, Эльконское плато, Элькон и др. Урановое оруденение известно также в параллельных структурах (месторождения Северное, Весеннее, Агдинское и др.).

Вмещающие породы рудоносных зон интенсивно изменены процессами низкотемпературного калиевого метасоматоза. К метасоматитам приурочены рудоносные швы, разновозрастные барит-кварцевые, кварцевые, кварц-карбонатные и флюорит-карбонатные прожилки.

Рудные тела имеют жило-, линзо- и уплощенную столбообразную форму с раздувами и пережимами. В плоскости рудоносных зон отчетливо выражено склонение рудных столбов. Часто отдельные рудные тела залегают в контурах общей рудоносной

зоны кулисообразно. Положение их контролируется в основном разрывными нарушениями, подновленными в процессе мезозойской активизации. Наиболее четко такие разрывы проявлены вдоль контактов blastomylonitов, даек диоритов, иногда вдоль контактов мощных барит-кварцевых жил и прожилков. Рудные тела обладают нечеткими контурами и сложным внутренним строением. Их размеры и форма во многом определяются кондиционными показателями, принятыми для оконтуривания: прежде всего такими, как бортовое содержание и допустимая мощность пустого прослоя, включаемого в контур рудного тела.

Наиболее крупные жилы- и линзообразные рудные тела приурочены к сериям параллельных или кулисообразных blastomylonitовых швов с выдержанными ореолами калиевых метасоматитов в позднепротерозойских разломах, подновленных в мезозое по простиранию на сотни метров, протяженность их по падению часто превышает размеры по простиранию.

В целом размеры рудных тел зависят от размеров рудовмещающих тектонических зон. В собственно мезозойских разломах рудные тела приурочены к единичным новообразованным тектоническим нарушениям и имеют сравнительно небольшие размеры.

Оруденение весьма слабо проявлено на поверхности. Верхняя граница промышленных руд расположена на глубинах 200-500 м от поверхности, а наиболее продуктивные рудные участки формируются на глубинах 1 км и более. Рудные тела подсечены скважинами на глубине около 2 км. Это свидетельство небольшого современного эрозионного среза.

Руды сложены в основном браннеритом в ассоциации с рутилом и гематитом. На отдельных участках они обогащены золотом, что позволяет выделить их в золото-браннеритовый тип руд.

Характерны брекчиевые, вкрапленные, пятнистые и сетчатые текстуры руд. Руды обладают сравнительно высокой радиометрической контрастностью при средних рядовых содержаниях, что позволяет проводить их радиометрическую сепарацию.

Месторождения урановой формации в пиритизированных углеродистых сланцах, алевритах и песчаниках

Месторождения этой формации, выделяемые как месторождения жильного типа, широко развиты во многих срединных массивах и, прежде всего, в Чешском и Французском. Для месторождений этих регионов устанавливаются некоторые общие закономерности локализации оруденения, присущие месторождениям жильного типа.

Благодаря разнообразию состава вмещающих пород и секущему положению жил по отношению к сланцеватости литологический контроль оруденения на рассматриваемых жильных месторождениях выражен достаточно отчетливо. Благоприятны для локализации уранового оруденения кварц-биотитовые сланцы, обогащенные пиритом и графитом, амфиболиты, дайки лампрофиров, порфиринов, гранит-порфиринов, скарны и графитизированные сланцы, т.е. породы с повышенным содержанием богатых железом минералов таких, как биотит, амфибол, пирит, магнетит. Восстановительные свойства вмещающей среды особенно четко проявляются в случае чередования железистых пород с породами резко отличного химического состава. К неблагоприятным для рудоотложения относятся кварциты, кварц-мусковитовые и кварцитовые сланцы, гнейсы, мигматиты и гранулиты. Большинство месторождений располагается в зоне контактово-метаморфизованных пород (роговиков и др). Общая мощность ореола контактового метаморфизма достигает 1000 м.

Благоприятными для образования трещин отрыва и скола являются замковые части и крылья антиклиналей. В породах замковой части антиклинали развиты поперечные

нарушения, которые часто выполнены гидротермальными жилами с урановым оруденением.

Размеры рудных жил изменяются в широком диапазоне - от первых десятков м до 2000 м.

Морфология жил определяется морфологией рудовмещающих тектонических нарушений. Контакты их с вмещающими породами четкие, околожилные изменения проявлены слабо, и урановое оруденение не распространяется за контуры жил. Изменение морфологии жил часто обусловлено изменчивостью состава вмещающих пород и зависит от ориентировки жил по отношению к сланцеватости, оси антиклинали и крупным рудоконтролирующим разломам.

Минеральный состав рудных жил характеризуется резким преобладанием карбонатов. Главным промышленным урановым минералом является настуран, известны коффинит, уранинит, урансодержащий антраколит, а в зоне окисления - вторичные минералы урана. Для руд типична постоянная ассоциация урановых минералов с карбонатами, что позволяет выделить их как месторождения кварц-карбонат-настурановой формации.

Для рудных жил типичны прожилковые, полосчатые и брекчиевые текстуры, что свидетельствует об их формировании путем выполнения открытых трещин при слабом проявлении процессов внутрижильного метасоматоза. Изменение состава жильных карбонатов от сидеритов до кальцитов отражает понижение роли железа и марганца и увеличение роли кальция в процессе минералообразования.

Рудные тела на месторождениях описываемого типа состоят из рудных линз и разделяющих их безрудных или слабоминерализованных пород. Обычно каждая рудная жила месторождения включает одно рудное тело, и лишь наиболее крупные жилы протяженностью в сотни метров состоят из двух-трех рудных тел, разделенных безрудными интервалами. Руды высококонтрастные и хорошо обогащаются при радиометрической сортировке.

Месторождения фосфор-урановой формации в эйситах и молибден-урановой в березитах

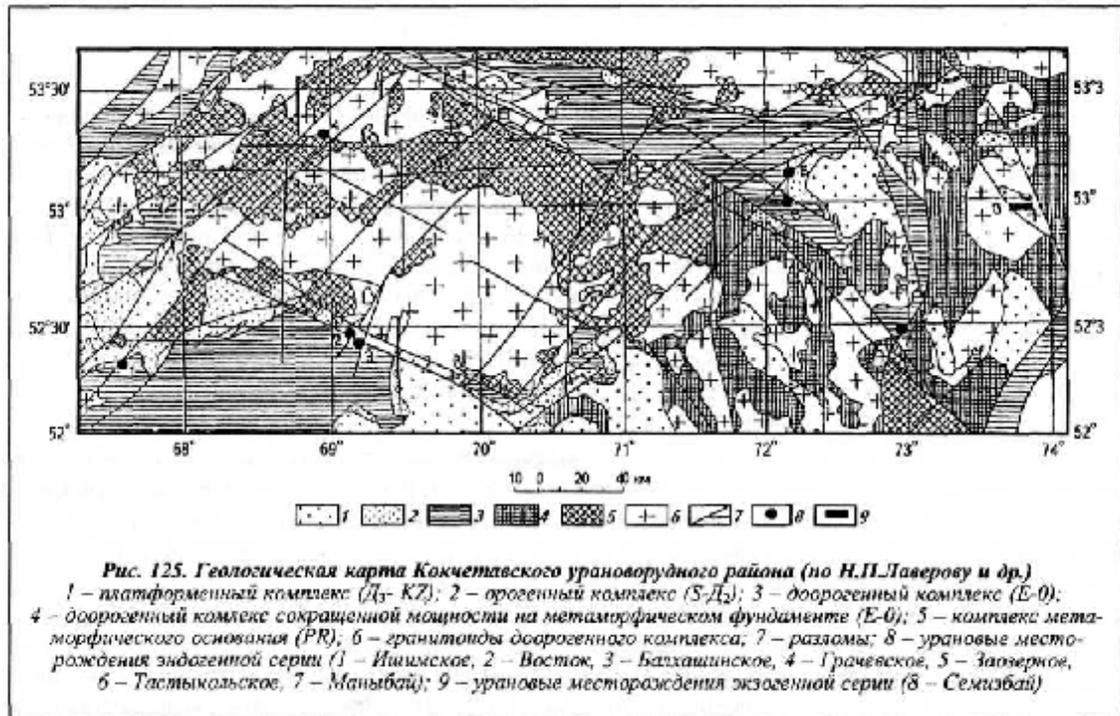
Месторождения этих близких по геологическому строению формаций широко проявлены в пределах Кокчетавского срединного массива на территории Северного Казахстана. К ним относятся Грачевское, Косачиное, Заозерное, Маныбай, Восток, Звездное, Ишимское и др.

Месторождения фосфор-урановой формации (апатит-урановые) (Грачевское, Заозерное и др.) залегают в различных по возрасту и составу породах: терригенных образованиях венда, осадочно-вулканогенных и карбонатных породах ордовика, гранитоидах девона и др.

Геохимическая специализация руд обусловлена ассоциацией урана с цирконием, торием, фосфором и фтором. Минеральный состав метасоматических новообразований во многом зависит от состава вмещающих пород. Как правило, в них развита вкрапленность мелкозернистых и дисперсных минералов: фторапатита, коффинита и оксидов урана с карбонатами, хлоритами, гидрослюдами, альбитом, цирконом и торитом. Очень редко встречается браннерит.

Главные факторы, контролирующей размещение рудных тел на месторождениях, - структурный и литологический. Наиболее богатые ураном руды установлены в алюмосиликатных породах, причем апатит в них не образует значительных концентраций, но является типичным минералом. Руды же, обогащенные апатитом, как правило, тяготеют к карбонатным породам: известнякам, мраморам.

Процесс натриевого метасоматита (эйситизации) в осадочных породах выразился в интенсивной альбитизации, сопровождаемой образованием хлорит-альбитовых, гидробиотит-альбитовых и амфибол-хлоритовых метасоматитов.



Собственно урановая минерализация - преимущественно коффинит и в меньшей степени настуран - накладывается на альбитизированные и апатитизированные породы. Коффинит в рудах практически полностью разложен. В псевдоморфозах распада устанавливается тонко-дисперсная смесь коффинита, оксидов урана и аморфного кремнезема. В продуктах распада отмечены небольшие содержания циркония, титана, молибдена и редкоземельных элементов. Коффинит, как правило, образует тонкую вкрапленность или микропрожилки, окруженные каймой хлорита. Совместное нахождение хлорита и коффинита особенно характерно для рудных тел, залегающих среди осадочных пород венда, отличающихся повышенным содержанием магния и железа.

По минеральному составу руды в осадочных породах, гранитах и габбро-диоритах качественно близки. Выделено три минералогических типа руд: апатит-коффинитовый, гидрослюдисто-настурановый и окисленный. Апатит-коффинитовые руды получили наибольшее распространение

Молибден-урановая формация включает большое количество мелких и средних месторождений. Их объединяет ряд устойчивых геологических особенностей:

- 1) пространственная и парагенетическая связь с комплексами пород андезит-диоритовой и гранит-риолитовой магматических формаций континентального позднеорогенного вулканизма в пределах геосинклинально-складчатых областей;
- 2) штокерковое внутреннее строение рудных тел различной морфологии с прерывистым и весьма прерывистым распределением рудных компонентов;
- 3) устойчивая пространственная и генетическая связь уранового оруденения с различными фациями метасоматической формации березитов;
- 4) оксидно-силикатный состав урановых минералов (коффинит, настуран, уранинит) в

ассоциации с сульфидами молибдена, железа, свинца, меди, мышьяка и других тяжелых металлов.

Среди минералов молибдена развиты молибденит и иордизит, имеющие на многих месторождениях промышленное значение. Установлена вертикальная минеральная зональность, в которой на верхних горизонтах месторождений проявились пирит-настурановые и галенит-настурановые минеральные типы руд, а на нижних - молибденит-настурановые с коффинитом.

Время образования наиболее крупных месторождений в истории формирования фанерозойских складчатых областей относится к заключительным стадиям орогенного этапа. Андезит-диоритовый и гранит-риолитовый магматические комплексы поздних стадий орогенеза наиболее близки по возрасту к месторождениям молибден-урановой формации.

Урановые месторождения сосредоточены в крупных геоантиклинальных блоках и залегают в породах как нижнего структурного яруса геосинклинального цикла развития, так и орогенного структурного этажа фанерозойских складчатых областей. Рудовмещающими породами нижнего структурного этажа являются кремнистые, глинисто-кремнистые сланцы и песчаники флишеидной терригенно-осадочной формации. В пределах орогенного структурного этажа месторождения локализуются в слоистых толщах тектоно-вулканических депрессий и в субвулканических интрузиях.

Формирование урановорудных полей и месторождений во многом определяется магматической деятельностью. Обычно она проявляется многофазно, продуцируя структурно-сопряженные тела различных фаций. Магматические фации объединяют породы, образовавшиеся в определенной геологической обстановке. Выделяются эффузивная, жерловая, субвулканическая, интрузивная и лайковая фации. В эффузивной фации различают покровную и экструзивную субфации.

Устанавливается пространственная и парагенетическая связь молибден-урановых месторождений с полифациальными многофазными гипабиссальными магматическими комплексами, завершающими магматизм гранит-риолитовой формации.

По условиям локализации оруденения различают три группы урановых месторождений: в зонах влияния крупных разломов; в субвулканических интрузивах; в сложных слоистых покровах вулканических депрессий.

Месторождения (Восток, Звездное, Ишимское) залегают в осадочных породах складчатых геосинклинальных комплексов. Их пространственное положение контролируется разломами, по которым сочленяются блоки с различной историей геологического развития (см. рис.125).

Зона влияния разломов обычно составляет сотни метров, иногда первые километры. Они характеризуются серией близпараллельных разрывов с амплитудами вертикальных перемещений до первых километров. Рудоконтролирующие разломы ограничивают геоантиклинальные блоки или пересекают их.

Магматические породы представлены корнями субвулканических интрузий, neckами жерловой фации и дайками. В отдельных районах эффузивные фации выполняют депрессии внутри геоантиклинального блока.

Рудоносные залежи приурочены к породам висячего бока над швом разлома. Они образуют кругопадающие линзовидные тела с неравномерным распределением рудных компонентов. Наиболее богатые участки рудоносных залежей — рудные столбы - локализованы в местах изменения углов падения основного шва разлома от 60° до более крутых, где трещиноватость совпадает со слоистостью песчаников, алевролитов и аргиллитов. На этих участках возникли зонки брекчирования с рудным цементом.

В рудах выделяется характерная молибденит (иордизит)-настурановая минеральная ассоциация с сульфидами свинца, железа, мышьяка, меди и цинка, а на отдельных

месторождениях - с водород-углеродными соединениями типа антраксолитов. Текстуры руд вкрапленные, прожилково-вкрапленные и брекчиевидные. Установлено пять стадий минералообразования: березитовая, пиритовая, молибденит-настурановая, анкеритовая и кварц-карбонатная.

Месторождения флюорит-урановой формации в аргиллизитах

Стрельцовское рудное поле расположено в краевой части Урулунгуевского срединного массива в пределах Монголо-Приаргунского вулканического пояса. Урановые месторождения сформировались в результате интенсивных процессов позднемезозойской тектоно-магматической активизации и приурочены к вулкано-тектонической депрессии кальдерного типа (депрессии проседания). Периферия депрессии ограничена дугообразными разломами кальдеры, которые определяют границы площади рудного поля.

Основные особенности состава фундамента - гетерогенность и разновозрастность слагающих его пород, выраженность метасоматических, палингенно-анатектических и интрузивных форм гранитообразования, заметная роль продуктов длительного и многоэтапного процесса кремнещелочного метасоматоза. Этот процесс сопровождался выносом кальция, магния и железа, привносом кремнезема, калия и натрия. Максимальной калишпатизации породы фундамента подвергались в связи с позднепалеозойским гранитообразованием. Наибольшая интенсивность процессов кремнещелочного метасоматоза отмечается вдоль зон крупных разломов. Длительный кремнещелочной метасоматоз в породах фундамента сопровождался привносом урана и повышением его содержания в измененных гранитах до $6,9 \cdot 10^{-4}\%$.

Верхний структурный этаж представлен чехлом осадочно-вулканогенных пород, разрезы которых наиболее полно сохранились в кальдерных депрессиях. Породы залегают почти горизонтально или полого наклонены к центру депрессий. В их строении выделяются две толщи, отвечающие двум циклам вулканизма мезозойской магматической активизации (рис. 126).

Наиболее значительные содержания урана (до 15-20 г/т) отмечаются в самых молодых породах ультракислого состава. Мощность верхней толщи сопоставима с мощностью нижней и составляет также несколько сотен метров.

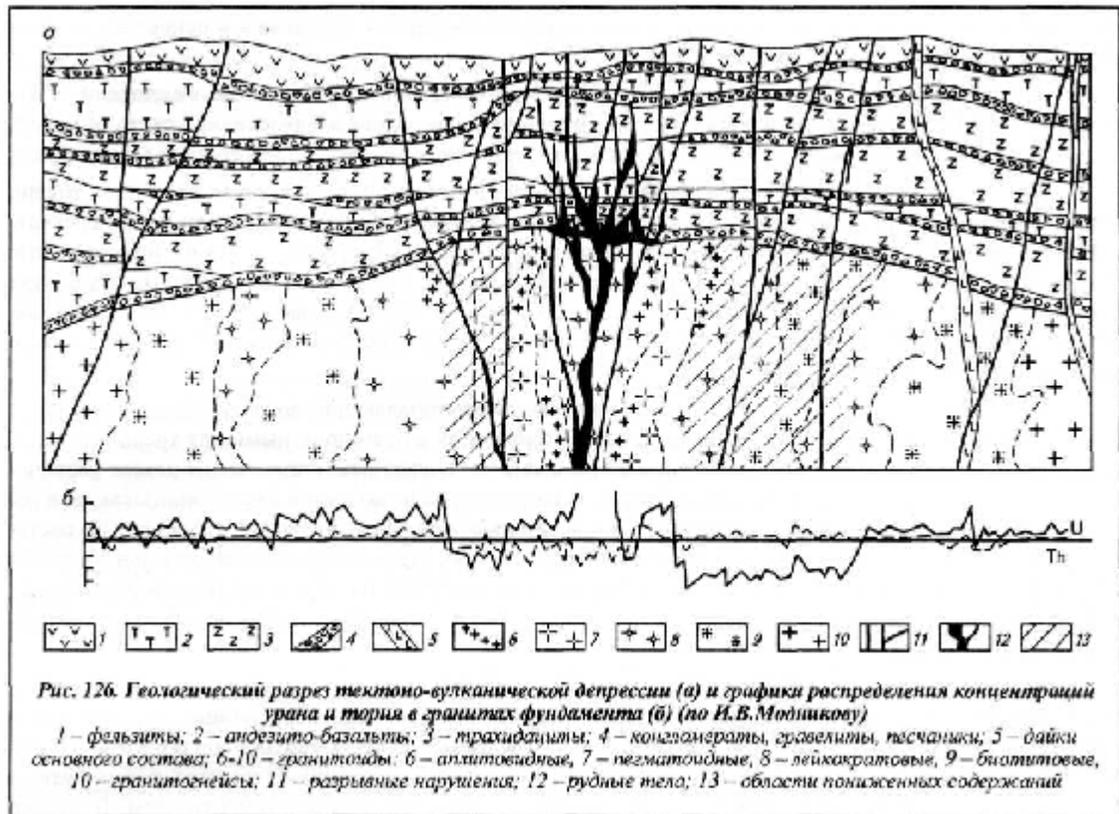
По условиям залегания, морфологии и внутреннему строению рудные тела объединены в три основных структурно-морфологических типа:

- 1) крутопадающие жилы и линзовидные тела;
- 2) линейные и уплощенные штокверки, имеющие в плане лентообразную форму;
- 3) пластообразные залежи.

Рудные тела жильного типа расположены в верхних частях разреза эффузивно-осадочной толщи. На отдельных участках они формируют сближенные жильные системы сложного строения, переходящие в линейные штокверки. Крупные рудные тела линзовидной и жилообразной формы, приуроченные к крутопадающим разрывным нарушениям, известны в породах фундамента. На отдельных участках крутопадающих рудных тел наблюдаются раздувы мощностью до 70 м (рудные столбы), приуроченные к узлам сопряжения и пересечения рудовмещающей зоны с разрывами других направлений.

Линейные и уплощенные штокверки возникают в крутопадающих зонах дробления, секущих слоистую толщу осадочных и эффузивных пород. В горизонтах с благоприятными для трещинообразования механическими свойствами (особенно в трахидацитах и фельзитах) происходит резкое увеличение мощности зон повышенной трещиноватости. В разрезе рудный штокверк как бы вписывается в горизонты

благоприятных пород, ограничиваясь по восстанию и падению пластами пород другого состава (см. рис. 126).



В плане такие штокверки вытянуты по простиранию крутопадающих зон разрывов и по форме близки к широким лентам, часто занимающим пространство между системами сближенных крутопадающих разрывов. Основные текстуры руд в штокверках - прожилковые, прожилково-вкрапленные и брекчиевые.

Пластообразные рудные залежи, приуроченные к горизонтам осадочных и туфогенно-осадочных пород, известны на различных стратиграфических уровнях разреза. Наиболее крупные тела установлены в туфогенных песчаниках и гравелитах под покровом кислых пород в верхних частях разреза и базальных горизонтах конгломератов, перекрывающих гранитоиды основания. Пластовая форма рудных залежей осложняется многочисленными апофизами по секущим крутопадающим разрывам. Наиболее высокие концентрации урана в пластовых залежах выявлены в участках, обогащенных обуглившимися растительными остатками или линзами бурых углей в сочетании с послонными разрывами в кровле и почве осадочных пород. Пластообразные рудные залежи сформировались одновременно с рудными штокверками и жилами.

Жильные и рудные минералы отлагались в три стадии:

- 1) кварц-карбонат-сульфидную;
- 2) иордизит-настурановую (рудную);
- 3) карбонат-флюоритовую. Кроме настурана в рудах распространены коффинит и браннерит.

Месторождения урановой формации в углеродисто-кремнистых ("черных") сланцах

В углеродисто-кремнистых сланцах сосредоточены огромные запасы урана, но промышленные месторождения собственно урановых руд довольно редки и возникают при

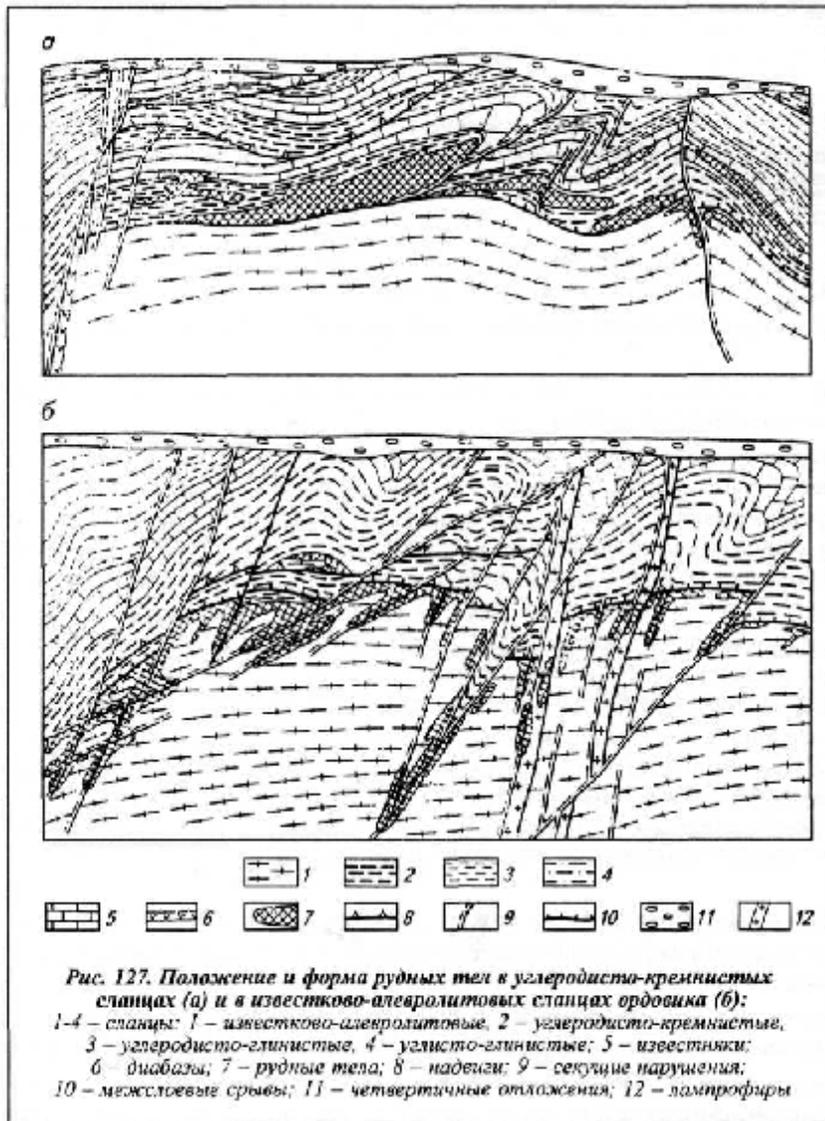
благоприятном сочетании различных геологических факторов. Наибольший промышленный интерес представляют месторождения Роннебургского рудного поля (Германия).

Рудное поле приурочено к области пересечения двух крупных зон глубинных разломов. Характерная особенность стратиграфического разреза - гетерогенность состава вмещающих толщ и наличие горизонта пород углеродистой формации с повышенным содержанием урана - от 25 до 60 г/т, органического углерода (8 %), общей серы (3 %). Магматические породы представлены согласными и секущими дайками диабазов и лампрофиров, развиты в основном вдоль зон крупных разломов.

Все породы рудовмещающей толщи интенсивно деформированы в сложную систему антиклинальных и синклиналиных складок, различных по форме, протяженности и степени дислоцированности. Преобладают два типа складок - линейные северо-восточного направления и куполовидные (брахиформные).

Рудные тела имеют сложную форму и в зависимости от геотектонической позиции блока локализуются во всех выделенных литологических разностях пород: в породах ордовика, углеродисто-кремнистых сланцах силура, диабазах, девонских и силурийских известняках. Рудные тела стратиформного типа группируются в рудоносные зоны, представляющие собой область развития промышленного оруденения в каждой конкретной литологической разновидности вмещающих пород (рис. 127).

Положение рудоносных зон достаточно строго контролируется благоприятным сочетанием складчатых и разрывных нарушений. По морфологии рудные тела изменяются от пластообразных залежей до жил сложного строения. Размеры рудных тел изменяются в широком диапазоне - от небольших скоплений до залежей длиной в первые сотни метров. Формирование промышленных скоплений урановых руд было обусловлено комплексом разновозрастных геологических процессов от первоначального накопления в углеродисто-кремнистых сланцах нижнего силура до перераспределения в связи с развитием современных гипергенных процессов. Выделяются два разновозрастных ураново-рудных комплекса. Наиболее ранний - кальцит-настурановый - сложен настураном, кальцитом (доломитом), гидрослюдами (хлоритом), сопровождается редкими выделениями сульфидов свинца, цинка и меди и образует прожилковые и вкрапленные руды. Настуран встречается совместно с гидрослюдами и ранними генерациями кальцита. В состав более позднего комплекса - гидро-настуран-пиритового входят настуран, гидронастуран, коффинит, пирит, марказит, бравоит, халькопирит, арсениды кобальта и никеля, кальцит, доломит, гематит, гетит и гидрогетит. Основные запасы рудных тел сложены дисперсными тонковкрапленными и прожилково-вкрапленными рудами. На отдельных участках вдоль тектонических нарушений встречаются богатые рудные тела жильного типа с прожилковыми и брекчиевыми текстурами.



Экзогенные месторождения

Месторождения этой серии содержат около половины мировых запасов. Ценность этих месторождений не только в их широкой распространенности, но и в благоприятных технологических свойствах руд. Уран из руды обычно легко выщелачивается разбавленными кислотами или содовыми растворами.

Важным экономическим фактором освоения многих месторождений является возможность применения при их отработке метода подземного выщелачивания (ПВ) в естественном залегании рудных залежей, что обеспечивает низкую себестоимость конечного продукта. Благодаря внедрению скважинного метода ПВ в отработку вовлекаются бедные руды с весьма низкими содержаниями урана.

На большинстве рассматриваемых месторождений рудные тела имеют простую пласто- и линзообразную форму и обычно залегают согласно с вмещающими породами.

Месторождения урана чехла древних и молодых платформ в литературе объединяются под названием "месторождения песчаникового типа".

Месторождения селен-ванадий-урановой формации в песчаниках

Месторождения этой группы являются важным поставщиком урановых руд и известны практически на всех континентах. Их размещение определяется благоприятным сочетанием климатических, гидрогеологических, литолого-фациальных и тектонических условий.

Большинство рудных районов приурочено к артезианским бассейнам инфильтрационного типа, где нисходящие потоки подземных пластово-поровых вод в верхней части разреза контактируют с фунтовыми водами и несут растворенный кислород. Распространяясь по проницаемым пластам песчаников, эти воды формируют зоны пластового окисления (ЗПО) протяженностью в десятки и сотни километров, что является важнейшей отличительной особенностью рассматриваемых месторождений (рис. 128).

Положение фронта ЗПО определяется гидрогеологическим режимом района, степенью проницаемости пород, обогащением их органическим веществом, а пластовых вод - кислородом.



Морфология и условия залегания рудных тел разнообразны. Преимущественно это пологие залежи крупных размеров, имеющие в плане форму линз, лент, подковообразных тел или овалов. В разрезах для большинства рудных тел характерна специфическая уплощенная серповидная форма; выпуклой стороной залежи ориентированы вниз по падению рудоносного пласта песчаников, а вверх по восстанию пласта они раздваиваются, сохраняясь в кровле и почве рудоносного пласта. Рудные тела подобной морфологии получили название *роллов*. Передовая часть рудных роллов называется *мешковой* или *головной*, а верхняя и нижняя раздвоенные - *крыльями*. В мешковой части роллов обычно содержатся более богатые руды, а перед ней образуется ореол повышенных содержаний урана. Иногда форма роллов усложняется.

В разрезе месторождений рудоносные пласты могут располагаться многоярусно, образуя продуктивные пачки мощностью до первых сотен метров. Мощность проницаемых рудовмещающих горизонтов обычно колеблется от 10 до 20 м. В плане рудоносные зоны пластового окисления прослеживаются до первых десятков км. Рудовмещающие пласты - аркозовые и олигомиктовые кварцевые песчаники - залегают полого с углами падения 1-5°.

В целом для этих месторождений характерны два типа урановых руд: окисленные и не-окисленные.

В окисленных рудах урановые минералы представлены тюямунитом, карнотитом, уранофаном и другими минералами группы уранила, ассоциирующими с лимонитом и минералами ванадия (монтрозеит). Они слагают небольшую часть запасов. Более широко развиты неокисленные руды, в состав которых входят настуран, коффинит и урановые черны в ассоциации с пиритом.

Типичными примерами Se-V-U- оруденения в песчаниках, локализованного на выклинивании ЗПО, являются месторождения урановорудной провинции Вайоминг (США). Провинция расположена севернее известной провинции плато Колорадо и представляет собой ряд депрессий, выполненных платформенными отложениями мезокайнозоя и ограниченных поднятиями, в пределах которых обнажаются кристаллические породы докембрия.

Крупнейшими урановорудными провинциями Казахстана и Узбекистана являются Чу-Сарысуйская, Сыр-Дарьинская и Кызыл-Кумская. Общность тектонической обстановки определяется приуроченностью всех провинций к эпиплатформенным орогенным поясам.

Чу-Сарысуйская и Сыр-Дарьинская впадины расположены на периферии Туранской плиты и охватывают площадь около 150 тыс. км² каждая. Области развития зон пластового окисления составляют десятки тысяч квадратных километров. Они контролируют пространственное положение крупных по запасам урановорудных объектов. Урановое оруденение приурочено к зоне мало контрастного восстановительного барьера с относительно низкими содержаниями в породах углистого вещества (0, n-0, 0n % Сорг) и дисульфидов железа. Поэтому руды бедные и убогие, пригодные для отработки только методом скважинного подземного выщелачивания.

Кызыл-Кумские руды отличаются более высоким содержанием урана. На ряде месторождений присутствуют богатые гематит-настуран-черниевые руды с сульфидами, сформированные на флюидном восстановительном барьере, возникающем за счет внедряющихся по разломам термальных восстановительных растворов. Все месторождения являются древнеэпигенетическими мезозойского и кайнозойского возраста.

Месторождения урановой формации в калькретах

Месторождения, объединенные в эту группу, выявлены и разведаны в последние 10-15 лет в Австралии (Йилирри и др.), Намибии (Лонгер-Хейнрих), Сомали и других регионах. Они выделяются как месторождения близповерхностных первичных слюдяковых руд и приобретают все большую практическую значимость благодаря неглубокому залеганию рудных тел, их простой морфологии и дешевому извлечению урана из руд. Рудные минералы, представленные преимущественно карнотитом, развиты в своеобразных карбонатных (калькреты, каличе) или гипсовых (гипкреты) породах, слагающих тела плитообразной формы в почвах и аллювиальных отложениях аридных климатических провинций. Эти породы возникают в приповерхностных условиях в засушливых районах в результате испарения грунтовых вод, выносящих на поверхность карбонаты и сульфаты. Они отличаются высокой пористостью, кавернозностью и потому благоприятны для миграции приповерхностных вод.

Метаморфогенные месторождения

Наиболее крупные месторождения этой урановорудной формации развиты в южном обрамлении Трансваальского массива (район Витватерсранд, ЮАР), в южной части Канадского щита (район Эллиот-Лейк), в обрамлении массива Сан-Франциско на Бразильском щите (районы Железный Четырехугольник, Жакобино и др.), в массиве Шейю (Франсвильский район, Габон).

Месторождения пространственно тяготеют к жестким массивам - кратонам, сложенным глубоко метаморфизованными породами архея. В их обрамлении, в краевых частях эпикратонных впадин, заполненных платформенными осадками, расположены месторождения ураноносных конгломератов. Они приурочены к основанию или нижней части мощных осадочных и осадочно-вулканогенных серий пород, залегающих с резким несогласием на гранитогнейсах и зеленокаменных породах архея и протерозоя. Их формирование происходило в интервале от 2,8 до 2 млрд лет до нашего времени. Толщи всех месторождений имеют сходный состав; конгломераты, как правило, залегают согласно с аркозовыми и полимиктовыми песчаниками и характеризуются высокой степенью сортировки обломочного материала, равномерной и сравнительно невысокой концентрацией рудных компонентов, включая уран, находящихся в цементе. Метаморфизованы конгломераты в зеленосланцевой фации.

Металлогения

Урановые месторождения отличаются разнообразием геотектонической позиции, широким временным диапазоном (от докембрия до четвертичного периода) и многообразием факторов, определяющих их генезис. В фундаменте древних платформ благоприятными для формирования крупных месторождений являются протогеосинклинальные складчатые пояса; крупные эпи- и перикратонные впадины, выполненные слабометаморфизованными толщами терригенных фаций; области тектономагматической активизации.

В пределах геосинклинально-складчатых поясов промышленные урановые месторождения возникают на орогенном этапе их развития и относятся преимущественно к гидротермальному классу. Они ассоциируют со сложными комплексами континентальных вулканических и субвулканических образований.

Наиболее благоприятными для формирования промышленно важных урановых месторождений являются срединные массивы. В них формируются крупные интрузивы гранитоидов с повышенными содержаниями U, Th, Mo, Pb, Zr, Be, P, типоморфных для урановых руд. В обрамлении срединных массивов особый интерес представляют палеозойские черносланцевые толщи, обогащенные U, P, V, Ni, Pb, Ag в 10-20 раз в сравнении с окружающими породами.

Крупные урановые месторождения формируются и в осадочных породах платформенного чехла. Наиболее промышленно важными являются инфильтрационные месторождения в песчаниках. Известны месторождения в глинах с костными остатками ископаемых рыб, в калькретах, в угольных пластах и торфяниках.

Геохимические свойства урана обеспечивают его высокую мобильность в процессах рудообразования. Этим объясняется разнообразие генетических типов урановых месторождений.

Благоприятная обстановка для формирования урановорудных полей и месторождений определяется сочетанием различных геологических факторов таких, как тип земной коры, ее мощность и строение, геотектонический режим развития, наличие глубинных разломов, геохимическая и металлогеническая специализация пород.

Наиболее общей региональной особенностью размещения крупных урановых месторождений является их локализация в урановорудных районах и провинциях, часто

образующих в совокупности протяженные урановые пояса. Урановорудные металлогенические пояса хорошо проявлены в пределах Северо-Американской и Австралийской древних платформ, в пределах геосинклинально-складчатых областей. Они объединяют месторождения, различные по генезису и времени образования. Так, в пределах Канадского уранового пояса известны древние ураноносные конгломераты, ураноносные пегматиты, жильные гидротермальные месторождения и месторождения зон несогласия.

В американском сегменте Тихоокеанского пояса локализуются крупнейшие экзогенные месторождения урана мезозойско-кайнозойского возраста. Они образуют протяженный Трансамериканский урановый металлогенический пояс, включающий не менее пяти крупных урановых провинций и 25 урановорудных районов. Выделяются и другие урановорудные пояса. В пределах поясов основные урановорудные районы тяготеют к пограничным зонам жестких массивов - выступам основания, имеющим мощную гранитную кору.

Крупные урановые месторождения формируются в провинциях, где развиты комплексы горных пород, изначально обогащенные ураном: древние граниты, гнейсовые купола, гранитные формации фанерозоя, черные углеродисто-кремнистые сланцы, фосфатные породы. Так, наиболее древние ураноносные конгломераты Ю.Африки формируются в отложениях раннепротерозойского платформенного чехла, примыкающих к выступам фундамента, сложенного гранитами с повышенными содержаниями тонкорассеянного уранинита. В урановорудных провинциях месторождений зон несогласия Австралии и Канады на более ранних стадиях образуются рассеянные повышенные концентрации урана в черных сланцах и в древних гранитах фундамента. Экзогенные урановые месторождения в песчаниках Центрально-Французского и Чешского срединных массивов залегают во впадинах, фундамент которых включает гранитоиды с повышенным содержанием урана и гидротермальные месторождения урана.

Анализ геологической истории земной коры, процессов наложения и перераспределений урана позволяет выделить основные эпохи рудообразования, с которыми связаны главные промышленные месторождения урана (в млн лет): раннепротерозойскую (2700-2200) - древние золотоурановые россыпи; рифейскую (1800-1700) - ураноносные альбититы в зонах глубинных разломов, месторождения зон несогласия; вендскую (800-500) - месторождения "порфировых" руд в апогранитах и щелочных массивах; среднепалеозойскую (360-340) - гидротермальные месторождения фосфор-молибден-урановых руд; позднепалеозойскую (280-260) - гидротермальные месторождения жильного типа с кварцем, карбонатом, флюоритом; мезозойскую и кайнозойскую (140-90 и менее) - месторождения областей тектоно-магматической активизации, экзогенные месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белевцев Я. Н. Метаморфогенное рудообразование. М., Недра, 1979, 232 с.
2. Бойцов В. Е. Геология месторождений урана. М., Недра, 1989, 304 с.
3. Вольфсон Ф. И., Архангельская В. В. Стратиформные месторождения цветных металлов. М., Недра, 1987, 255 с.
4. Вольфсон Ф. И., Дружинин А. В. Главнейшие типы рудных месторождений. М., Недра, 1975, 392 с.
5. Вольфсон С. И., Яковлев П. Д. Структуры рудных полей и месторождений. М., Недра, 1975, 271 с.
6. Кривцов А. И., Мигачёв И. Ф., Попов В. С. Медно-порфиновые месторождения мира. М., Недра, 1986, 362 с.
7. Кутырев Э. И., Михайлов Б. М., Ляхницкий Ю. С. Карстовые месторождения. Л., Недра, 1989, 311 с.
8. Месторождения Металлических полезных ископаемых. М., ЗАО «Геоинформмарк», 1998, 269 с.
9. Минеральные ресурсы Красноярского края. Красноярск, КНИИГиМС, кн. 1, 2, 2002, 622 с.
10. Некрасов Е. М. Зарубежные эндогенные месторождения золота. М., Недра, 1988, 286 с.
11. Петровская Н. В. Самородное золото. М., Наука, 1973, 347 с.
12. Рой С. Месторождения марганца. М., Мир, 1986, 321 с.
13. Рудные месторождения СССР. Т. 1-3. М., Недра, 1978.
14. Синяков В. И. Основы теории рудогенеза. Л., Недра, 1987, 192 с.
15. Старостин В. И., Игнатов П. А. Геология полезных ископаемых. М., Академический проект, 2006, 512 с.
16. Федорчук В. П. Геология ртути. М., Недра, 1983, 270 с.
17. Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М., 2003, 494 с.

СОДЕРЖАНИЕ

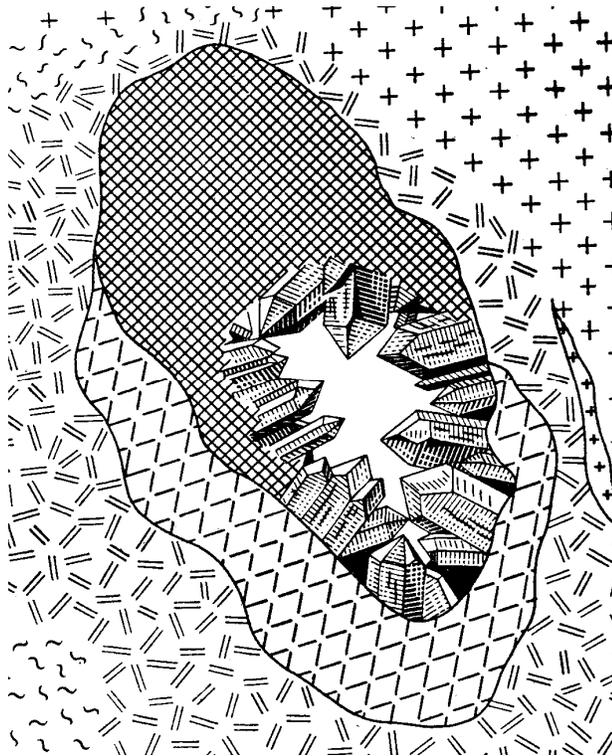
Лекция	№ стр
Введение	3
Месторождения железа	3
Месторождения марганца	24
Месторождения хрома	32
Месторождения титана	40
Месторождения ванадия	45
Месторождения никеля	49
Месторождения кобальта	63
Месторождения меди	69
Месторождения молибдена	80
Месторождения свинца и цинка	93
Месторождения вольфрама	111
Месторождения олова	125
Месторождения сурьмы и ртути	144
Месторождения алюминия	150
Месторождения золота	163
Месторождения серебра	188
Месторождения металлов группы платины	197
Месторождения лития	203
Месторождения бериллия	209
Месторождения ниобия и тантала	214
Месторождения урана	222
Литература	243
Оглавление	244

Министерство образования Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Институт горного дела, геологии и геотехнологий СФУ»

В.Г. МИХЕЕВ

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

**НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ
ПОЛЕЗНЫЕ
ИСКОПАЕМЫЕ**



Красноярск 2008

УДК 553.6

ББК 26.325.2
М 69

Рецензенты:

Михеев В.Г.

М 69 Неметаллические полезные ископаемые: Лекционный курс / "ФГОУ ИГДГГ СФУ". – Красноярск, 2008. – с.

ISBN 5–8150–0164–3

Рассмотрены наиболее распространенные виды минерального сырья, которое в зависимости от состава разделяется автором на две группы: сырье определенного и неопределенного химико-минералогического состава. Для каждого вида даны общие сведения, области применения и требования промышленности к качеству, охарактеризованы основные геолого-промышленные типы месторождений неметаллических полезных ископаемых.

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Геологическая съемка, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» и "Прикладная геохимия, петрография и минералогия".

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно в учении о месторождениях полезных ископаемых существует разделение их на металлические, неметаллические и горючие. К неметаллическим относят большую группу твердых полезных ископаемых, которые в основном не используются для извлечения металлов и не являются горючими.

Цель настоящего лекционного курса – дать краткую характеристику минералого-химического состава, свойств сырья, областей его применения, состояния сырьевой базы и геологического строения классических месторождений основных видов неметаллического сырья с учетом требований промышленности к его качеству, отраженных в современной научно-технической документации, научной и справочной¹ литературе [1–17].

В курсе «Промышленные типы месторождений полезных ископаемых» общепринятой является классификация месторождений по генетическому признаку. В основу генетической классификации месторождений неметаллических полезных ископаемых положены работы академика В.И. Смирнова.

В *генетической классификации* месторождения неметаллических полезных ископаемых подразделяются на серии, группы и классы:

А. Эндогенная серия:

I. Магматическая группа (дуниты, лабрадориты, граниты, базальты, пемза, перлиты и другие породы). Классы: 1. Раннемагматические (алмазы). 2. Ликвационные (сульфидная сера). 3. Позднемагматические (графит, апатит).

II. Пегматитовая группа (полевые шпаты, кварц, драгоценные и поделочные камни, мусковит, корунд, наждак, оптический флюорит).

III. Карбонатитовая группа (апатит, флогопит, вермикулит, нефелин, карбонатные породы).

IV. Скарновая группа (бор, флогопит, волластонит, графит, хризотил-асбест, драгоценные и поделочные камни).

V. Альбитит-грейзеновая группа (драгоценные камни, криолит, флюорит).

VI. Гидротермальная группа (тальк, флюорит, барит, магнезит, горный хрусталь, цеолиты, агаты, алунит, сера, исландский шпат, бораты).

VII. Вулканогенно-осадочная группа (сера, барит, бораты, сода, цеолиты).

Б. Экзогенная серия:

¹ Данные по неметаллическим полезным ископаемым см. в справочниках по минеральному сырью, изданных под ред. В.П. Орлова в московском издательстве АОЗТ «Геоинформмарк» в 1997–1999 гг.

I. Группа выветривания. Классы: 1. Остаточный (глины, каолины, бокситы, пески, фосфорит, вермикулит, тальк, гипс, алунит, графит). 2. Инфильтрационный (магнезит, фосфорит, сера, барит, гипс, бораты).

II. Россыпная группа (алмаз, горный хрусталь, драгоценные камни, барит).

III. Осадочная группа. Классы: 1. Механический (пески, галечники, песчаники, конгломераты, гравелиты, глины, каолины, магнезит). 2. Химический (гипс, соли, известняк, доломит, барит, бораты, сера, боксит). 3. Биохимический (фосфориты, карбонатные породы, гуано, кремнистые породы, сера).

В. Метаморфогенная серия:

I. Метаморфизованная группа (фосфорит).

II. Метаморфическая группа (мраморы, кварциты, графит, драгоценные камни, сланцы, гнейсы, высокоглиноземистые минералы, гранат, амфибол-асбест, наждак, алмаз).

При переходе к изучению дисциплин «Основы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых», «Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых», «Разведка и геолого-промышленная оценка месторождений полезных ископаемых», которые сопровождаются курсовым проектированием и являются базовыми для дипломного проектирования основой классификации месторождений становится их промышленная классификация, где на первое место выходит не месторождение определенного генетического типа, а полезное ископаемое, оцениваемое как многоцелевое сырье для промышленного производства. В учебной отечественной литературе в этой классификации обычны подразделения типа «Индустриальное сырье», «Сырье горно-химическое» «Сырье горнотехническое», «Сырье минерально-строительное» и др., т.е. классификация разделяет полезные ископаемые и сырье по сферам их практического использования с учетом технического передела. Главным недостатком таких классификаций является неопределенность состава их подразделений.

Под полезными ископаемыми понимают природные минеральные образования земной коры, которые могут быть эффективно использованы в сфере материального производства. Минеральное сырье – извлеченные из недр полезные ископаемые для непосредственного использования или последующей переработки.

Комплексное использование конкретного вида сырья предполагает оценку его применения в самых разнообразных отраслях промышленности. Согласно научно-технической документации (ГОСТы, ОСТы, ТУ и др.) на применение конкретного сырья для производства любой продукции главными оценочными параметрами являются либо определенный химико-минералогический состав сырья, либо его физические свойства при неопределенности и изменчивости химического и минералогического

составов. Рассматриваемая в настоящем лекционном курсе классификация сырья, построена с учетом оценки особенностей комплексного его использования, что позволяет исключить условности при отнесении одного и того же вида к различным сырьевым группам по применению в любом промышленном производстве.

Поэтому по *геолого-промышленной классификации* неметаллические полезные ископаемые нами подразделяются на две группы:

1. *Сырье определенного химико-минералогического состава* (фосфатное сырье; серное сырье; минеральные соли, гипс и ангидрит; борное сырье; асбесты; волластонит; слюды; высокоуглеродистое сырье; карбонатное сырье; плакивошпатовое сырье; высокоглиноземистое сырье; высокомагнезиальное сырье; барит и витерит; кварцевое сырье; кремнеземистое сырье; полевошпатовое и кварц-полевошпатовое сырье; каолины; цеолиты).

2. *Сырье неопределенного химико-минералогического состава* (глинистое сырье; пески строительные, гравий и песчано-гравийные смеси; магматические и метаморфические горные породы).

Лекционные и лабораторных занятия проводятся автором на кафедре геологии месторождений полезных ископаемых и методики разведки в институте горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

СЫРЬЕ ОПРЕДЕЛЕННОГО ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА

ФОСФАТНОЕ СЫРЬЕ

Кларк фосфора, по данным А.П. Виноградова, составляет $9,3 \cdot 10^{-2} \%$. Природный фосфор состоит в основном из изотопа ^{31}P , шесть других являются радиоактивными. Свободный фосфор не встречается в природе в связи с его высокой реакционной способностью. Наиболее распространенными минералами, имеющими практическое значение, среди природных фосфатов являются основные разновидности апатита (общая формула $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$): фторапатит $\text{Ca}_{10}[\text{P}_6\text{O}_{24}]\text{F}_2$, гидроксил-apatит $\text{Ca}_{10}[\text{P}_6\text{O}_{24}](\text{OH})_2$, минералы ряда франколита (франколит $\text{Ca}_{10}\text{P}_5,2\text{C}_{0,8}\text{O}_{23}\text{F}_{1,8}(\text{OH})$, курскит $\text{Ca}_{10}\text{P}_{4,8}\text{C}_{22,8}\text{F}_2(\text{OH})_{1,2}$) и карбонатапатит $\text{Ca}_{10}\text{P}_6\text{CO}_{23}(\text{OH})_2$.

Поскольку часть фосфатного сырья используется для получения фосфора, к нему применим термин «руда». Фосфатное сырье используется для производства растворимых удобрений (более 90 %), приготовления кормов, получения желтого и красного фосфора и в составе химических соединений. Феррофосфор применяется в металлургии для получения некоторых сортов чугуна и стали.

Все фосфатные руды подразделяются на *apatитовые* и *фосфоритовые*. Минимальная массовая доля P_2O_5 составляет в апатитовых рудах 4-5 %. Фосфоритовые руды относятся к промышленным, если массовая доля P_2O_5 составляет в них не менее 3 % при условии их легкой обогатимости. Для комплексных руд эта цифра может быть еще ниже. В производстве суперфосфата и комплексных удобрений массовая доля P_2O_5 в рудах или вырабатываемых из них концентратах не должна быть ниже 28 %. В результате промышленной переработки апатитовых руд в России извлекают нефелин, сфен, титаномагнетит, медный концентрат и перламутровые пигменты. В мировой практике (ЮАР, США, Финляндия) из хвостов флотации получают бадделеит, кальцит, оксиды урана, флогопит, медные и магнетитовые концентраты.

В отличие от яснокристаллических агрегатов апатитовых руд в составе фосфоритовых руд преобладают франколиты в скрыто- и микрокристаллической, а также аморфной форме, реже это железо- и алюмофосфаты, в разнообразных осадочных породах (глинистых, карбонатных, песчаных и переходных). Термин «фосфориты» обычно применяется для пород, содержащих 5 % и более P_2O_5 . Поскольку текстурно-структурные особенности фосфоритов определяют характер их обогащения и переработки, в практике их принято разделять на фосфориты микрозернистые, зернистые, желваковые и ракушечные. Рыхлые и каменистые фосфориты относят к фосфоритовым рудам коры выветривания.

Микрозернистые фосфориты – массивные крепкие руды от серого до черного цвета, состоящие из фосфатных микрозерен, оолитов и сферолитов с фосфатным, карбонатным, кремнистым, чаще смешанным кремнисто-карбонатным или глинисто-кремнистым цементом. Фосфатное вещество этой разновидности фосфоритов слабо растворимо в лимонной кислоте, в связи с чем их подвергают химическому разложению или термической переработке. Фосфаты в руде представлены обычно франколитом или фторапатитом (в метаморфизованных разностях), поэтому руды часто являются еще источником фтора и иногда ванадия. Микрозернистые фосфоритовые руды характерны для геосинклинальных бассейнов (Каратау в Казахстане, Скалистых гор в США и др.). Средняя массовая доля P_2O_5 в них составляет 22–24 %.

Зернистые фосфориты обычно слабее сцементированы, фосфатное вещество в них представлено зернами размером 0,1–10 мм и фосфатизированными раковинами, костями, зубами рыб. Зерна аморфные, крипстокристаллические однородные или оолитовые. Состав зерен близок к франколитовому. Цемент зерен фосфатный, карбонатный, кремнистый или глинистый. По внешнему виду руды напоминают песчаники или пески. Зернистые фосфориты характерны для крупных мел-палеогеновых фосфоритовых бассейнов Северной Африки и Средиземноморья. Руды легкообогатимы, часто богатые (массовая доля P_2O_5 23–32 %). Как разновидности зернистых фосфоритов выделяются галечниково-зернистые (размер зерен 0,1–15 мм) и песчано-зернистые (размер зерен, оолитов, желвачков 0,015–0,5 мм).

Желваковые фосфориты представляют собой конкреционные образования – желваки, конкреции, стяжения, гальки фосфатного вещества в песчаных или глинистых породах (чаще в глауконитовых песках), иногда образующих плотные фосфоритные плиты. По составу вмещающих пород выделяют разновидности желваковых фосфоритов: кварц-глауконитовые (песчанистые), кварцевые, глауконит-кварц-глинистые (глинистые) и др. Размеры фосфатных стяжений обычно от 0,5 до 15 см. Состав стяжений – аморфный или микрокристаллический фосфат близкий к курскиту, в связи с чем 30–40 % фосфатного вещества находится в лимонно-растворимой форме, что позволяет получать из руд фосфатную муку. Руды легко обогащаются. Массовая доля P_2O_5 в желваках обычно 15–26 %, в рудах – 6–10 %. Желваковые фосфориты известны в России (Вятско-Камский фосфоритовый бассейн, Егорьевский фосфоритоносный район и др.), в Казахстане (Покровское и др.).

Ракушечные фосфориты – пески или песчаники, включающие скопления фосфатизированных ракушек в количестве от 10 до 80 %. Массовая доля P_2O_5 в ракушках (оболиды, лингулиды) – до 32 %. Руды легко обогащаются с попутным получением глауконита и кварцевого песка. Они

имеют существенное значение для России (Прибалтийский бассейн, Гурьевское месторождение).

Фосфоритовые руды коры выветривания (обломочно-крустификационные) – рыхлые, каменистые, галечниковые, конгломератовые, образовались за счет выветривания, размыва и переотложения фосфоритов, фосфатсодержащих карбонатных пород и за счет изменения коренных пород фосфатсодержащими растворами. Рыхлые фосфориты представлены обычно глинами, обогащенными фосфатным веществом. Каменистые фосфориты в основном кремнистые или карбонатные, рассеяны в рыхлых фосфоритах. Фосфатсодержащее криптокристаллическое вещество в них заключено в пленках и в цементе (Телекское месторождение). Галечниковые и конгломератовые фосфориты широко развиты в штате Флорида (США). Массовая доля P_2O_5 в фосфоритовых гальках – до 30 %, в рудах – до 18 %.

Качество фосфатного сырья для применения его в различных отраслях промышленности регламентируется соответствующей научно-технической документацией (НТД). Например, массовая доля P_2O_5 во флотационном апатитовом концентрате для хибинских апатит-нефелиновых руд должна составлять не менее 39 %. Вредными примесями в концентрате являются оксид железа и полуторные оксиды (в сумме не более 3,0 %). Качество Ковдорского апатитового концентрата, вырабатываемого из комплексных железных руд, определяется массовой долей P_2O_5 равной не менее 36,0 % (массовая доля MgO – не более 5 %).

При химической переработке апатитовых концентратов на минеральные и фосфорные соединения получают в основном минеральные удобрения и кормовые обесфторенные фосфаты. На дальнейшее химическое разложение серной, фосфорной и азотной кислотами апатитовых концентратов вредное влияние оказывают карбонаты кальция. К наиболее легкообогатимым (флотацией) рудам относятся апатит-силикатные, апатит-редкометалльно-магнетитовые, апатит-медносульфидно-титаномагнетитовые. Руды обычно перерабатываются комплексно: с получением нефелинового концентрата, содопродуктов и цемента – Хибинская группа месторождений; меди, железа, титана и ванадия – Волковское месторождение; железа и слюды – Ковдорское месторождение. Обработка сырья кислотами, сульфатами калия и аммония проводится с целью получения суперфосфата (простой и двойной, аммофос, нитроаммофоска и др.) Фосфориты, используемые для получения элементарного фосфора путем электротермической переработки, должны содержать более 18 % P_2O_5 . Массовая доля нерастворимого остатка – менее 24 %, вредной примесью является также оксид железа (допустимо менее 3 %). Фосфор применяется для производства фосфорной кислоты, фосфорного ангидрида и различных химических соединений, которые, в свою очередь, используют в металлургии, пиротехнике, медицине и др.

Наиболее простой способ производства фосфорных удобрений – механическая обработка фосфоритов до получения фосфоритной муки (30–40

% лимонно-растворимая форма фосфата), которая добавляется также в корма для скота. Минимальная массовая доля P_2O_5 в сырье для удобрений не должна быть ниже 21 %, для кормов – не ниже 26,7 %. Вредными примесями являются полуторные оксиды и магнезия, входящие в минералы нерастворимого осадка. Так, для применения фосфоритной муки в качестве добавок в корма массовая доля нерастворимого осадка не должна превышать 15–18 %. При спекании и сплавлении фосфатов со щелочными соединениями, кремнеземом и другими веществами получают термофосфаты, для производства которых массовая доля P_2O_5 должна быть не менее 27 %. Термофосфаты также применяются для производства удобрений. Массовая доля полуторных оксидов в них не должна превышать 3 %, магнезии – 2,5 %.

Запасы фосфатного сырья в мире оцениваются в 34 млрд т P_2O_5 : 95 % его представлено фосфоритами и лишь 5 % приходится на апатиты (в России 80 %). Лидерами по запасам фосфатных руд являются страны Африки: Марокко, Тунис, Западная Сахара, ЮАР. Около 80 % суммарной мировой добычи (130 млн т руды) приходится на США, Марокко, Россию, Казахстан и Китай. Основными потребителями фосфатного сырья являются США, Индия и Китай. Цены на экспортируемые фосфаты с массовой долей P_2O_5 32–33 % составляют около 45–47 дол/т.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ АПАТИТОВ

По масштабам месторождения апатитов подразделяются в зависимости от запасов руд, в пересчете на P_2O_5 , млн т: на весьма крупные – более 100, крупные – 100–50, средние – 10–50 и мелкие – менее 10.

Генетически месторождения апатитовых руд классифицируются как магматические, карбонатитовые, пегматитовые, контактово-метасоматические, гидротермальные, вулканогенно-осадочные, метаморфогенные и выветривания. Промышленную ценность в настоящее время на территории России представляют месторождения апатитов магматического и карбонатитового типов, а также месторождения выветривания.

Формационная принадлежность и типизация магматических месторождений остаются вопросами дискуссионными, однако большинство авторов по минеральному составу выделяют как основные формации апатит-нефелиновую, апатит-магнетитовую и апатитовую. Для производства минеральных удобрений месторождения именно этих формационных типов имеют ведущее значение. Основными же промышленными типами апатитовых месторождений являются нефелин-apatитовый, апатит-редкометалльно-магнетитовый в карбонатитах, апатит-титаномагне-титильменитовый в габброидах, редкоземельно-apatитовый в метадоломитах, доломит-apatитовый и апатит-франколитовый.

Месторождения нефелин-apatитового типа имеют для России большое значение. Пространственно они связаны с интрузиями ийолит-

уртитов. К промышленным относятся весьма крупные месторождения Хибинского массива в Кировском районе Мурманской области (абсолютный возраст 280–300 млн лет), приуроченного к тектоническому контакту архейских и протерозойских метаморфизованных отложений. В пределах массива находятся известные месторождения: Кукисвумчорр, Юкспор, плато Расвумчорр и др.

Массив имеет зонально-концентрическое воронкообразное строение, его внешняя зона сложена хибинитами, переходящими в трахитоидные хибиниты, которые сменяются рихчорритами, ийолит-уртитам, апатит-нефелиновыми рудами и ловчорритами. Перечисленные разновидности щелочных пород имеют конические формы. Центральная часть массива представлена фойяитами и штоком карбонатитов. Продуктивные залежи апатит-нефелиновых руд тесно связаны с интрузией ийолит-уртитов, кольцо которой имеет диаметр почти 27 км и мощность от 50 до 2 000 м. Формы отдельных рудных залежей пластообразные и линзовидные, протяженность по простиранию – до 12 км, по падению – более 3 км при мощности до 200 м. Наблюдаются следующие текстурные разновидности руд: сетчатая, линзовидно-полосчатая, полосчатая, пятнистая, пятнисто-полосчатая, крупно- и мелкоблоковая, массивная, брекчиевая и вкрапленная. К богатым рудам относятся пятнистые и пятнисто-полосчатые разновидности. По минеральному составу руды сфен-apatитовые, апатит-нефелиновые, вкрапленные апатитовые ийолиты и уртиты. Массовая доля P_2O_5 в рудах отдельных месторождений колеблется от 7,5 до 17,7 %. Руды хорошо обогащаются с получением апатитовых и нефелиновых концентратов, удовлетворяющих требования ГОСТа.

Месторождения апатит-титаномагнетит-ильменитового типа в габброидах могут быть представлены Волковским и Ошурковским месторождениями (Россия).

Волковское месторождение (Кушвинский район Свердловской области) располагается в пределах Тагило-Баранчинского массива габбровых пород среднепалеозойского возраста. Апатитоносные титаномагнетитовые, титано-магнетит-халькопирит-борнитовые руды образуют зоны вкрапленности среди пироксенитовых габбро. Массовая доля P_2O_5 в них колеблется от 3 до 14 %. Мощность рудных тел 2–100 м. Кондиционный апатитовый концентрат может быть получен при флотации хвостов обогащения титаномагнетитовых и медных руд.

Ошурковское месторождение (Бурятия, 15 км от Улан-Удэ) приурочено к Ошурковскому сиенит-диоритовому массиву (площадь 12 км²) на юго-восточном крыле Хамар-Дабанского антиклинория. Массив представляет собой воронкообразное тело среди биотитовых гранитов протерозойского возраста. Бедная вкрапленная апатитовая минерализация распространена в массиве достаточно равномерно. Богатые руды тяготеют к зонам брекчирования, гидротермальных изменений и полям развития

лампрофиров. Рудные тела выделяются по массовой доле P_2O_5 – от 1 до 6 %. Из зарубежных примерами подобных типов месторождений могут служить Лактио (Канада), Розленд (США), Стремигородское (Украина).

Месторождения апатит-редкометалльно-магнетитового типа в карбонатитах связаны с массивами ультраосновных щелочных пород. Представители этого весьма перспективного промышленного типа в России пока не разрабатываются, за исключением железорудного комплексного Ковдорского месторождения, где наряду с магнетитом извлекаются апатитовый и бадделеитовый концентраты.

Весьма крупными ресурсами P_2O_5 обладает Маймеча-Котуйская провинция (север Красноярского края, междуречье Джогджоо-Маган – месторождения Маган, Ыраас, Ессей и др.). Месторождение Маган (рис. 1) связано с щелочно-ультраосновным массивом Маган пермско-триасового возраста площадью 42 км. В основном массив сложен ийолитами и нефелин-пироксеновыми породами. Экзоконтактовая часть массива фенитизирована и вмещает собственно Маганское месторождение апатита. Апатитоносные фениты образуют продуктивную кольцевую зону длиной 19 км при средней ширине 270 м и прослежены до глубины 300 м. В состав руд входят эгирин, апатит и калиевый полевой шпат. Средняя массовая доля P_2O_5 – 6,8 %. Лабораторные испытания показали возможность получения кондиционных концентратов из апатитоносных фенитов месторождения.

К такому же типу месторождений в России относится Верхнесаянское (Иркутская область). Примерами зарубежных месторождений подобного типа являются Палабора (ЮАР), Сокли (Финляндия), Тапира, Якупиранга, Серроте (Бразилия) и др.

Месторождения апатит-франколитового промышленного типа чаще всего формируются при выветривании карбонатитов, реже – при выветривании месторождений других типов (Ковдорское месторождение) за счет развития франколита с образованием апатит-франколитовых руд. Типичным представителем подобных месторождений является Белозиминское (Восточный Саян, Иркутская область). В результате выветривания позднекембрийских апатит-редкометалльных карбонатитов образовались рыхлые апатитоносные отложения мощностью 10–100 м. На месторождении выделяют три рудоносных горизонта со средними массовыми долями P_2O_5 от 5 до 13,7 %. Месторождение относится к средним. Приближаются к средним по запасам плащевидные залежи магнетит-apatит-франколитовых, лимонит-франколитовых и франколитовых руд коры выветривания на карбонатитовых месторождениях Маймеча-Котуйской провинции (Ессей). Примерами других подобных месторождений данного типа являются Томторское (Россия), Дорова (Зимбабве), Сулуку (Уганда), Аракса (Бразилия) и др.

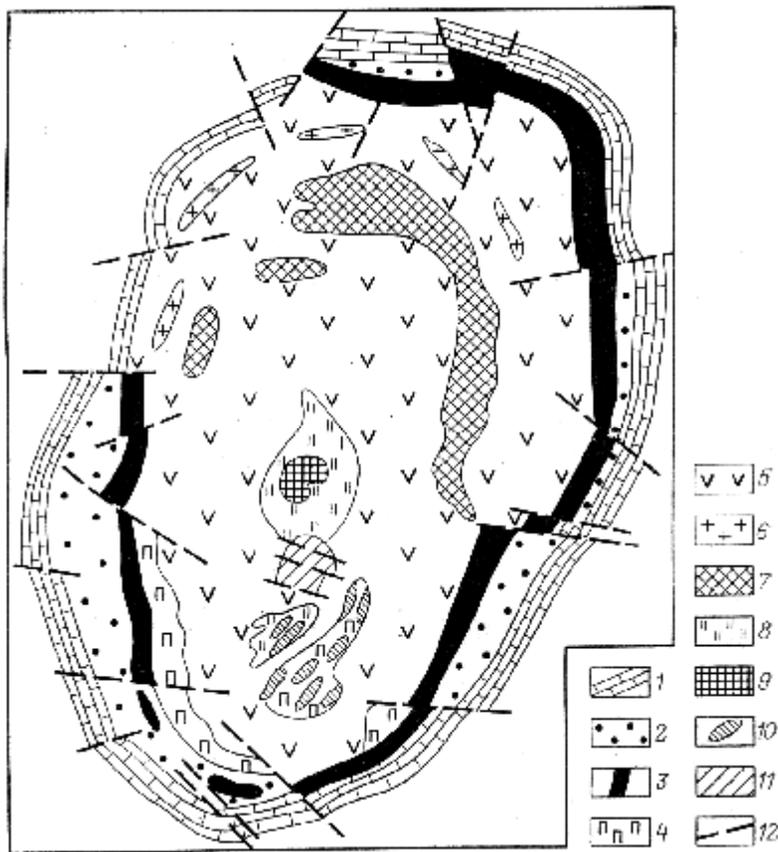


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Маган (по А.К. Мкртычяну, В.П. Богадице, Е.Л. Данилину и др.): 1 – алевролиты и доломиты; 2 – кварциты; 3 – апатитовые эгиринит-фениты; 4 – пироксеновые породы; 5 – ийолиты и нефелин-пироксеновые породы; 6 – нефелиновые сиениты; 7 – апатитоносные ийолиты; 8 – флогопитовые магнетитсодержащие породы; 9 – карбонат-флогопит-магнетитовые руды; 10 – форстерит-титаномагнетитовые руды; 11 – карбонатиты; 12 – тектонические нарушения

Спорным по генезису является *редкоземельно-apatитовый в метадоломитах промышленный тип* месторождений (магматический или метаморфогенный). Весьма крупное месторождение подобного типа – Селигдарское (Якутия). Месторождение залегает среди гнейсов и кристаллических сланцев архея. Единое рудное тело имеет форму воронки с размерами в плане 2x1 км. Мощность рудного тела достигает 250 м. Руды представлены апатит-мартит-кальцитовыми и апатит-кварц-доломитовыми разновидностями. Границы рудного тела нерезкие с постепенным переходом в кварц-полевошпатовые метасоматиты, а затем в хлоритизированные и гематитизированные вмещающие породы. Массовая доля P_2O_5 в рудах 5–7 %, в концентратах 31–38 %. Другим примером месторождений подобного типа является Тигровское (Россия).

Доломит-apatитовый промышленный тип апатитовых месторождений по генезису относится к метаморфогенным проявлениям апатита за счет

первично-осадочных фосфоритов. Эти месторождения выделяются отдельными авторами и классифицируются ими как метаморфические, образованные при региональном метаморфизме фосфоритов (например, Слюдянское), и метаморфизованные – при контактовом их метаморфизме (например, отдельные участки месторождений хребта Каратау). Руды месторождений относятся к труднообогатимым в связи с преимущественной перекристаллизацией вещества фосфатов в тонкозернистый апатит и появлением достаточно крупнозернистого фторапатита. Типичный пример подобных месторождений – Чулактау (Казахстан), являющееся частью фосфоритового бассейна Каратау, геологические особенности которого рассмотрены ниже. Из зарубежных месторождений к подобному типу относятся Мау-Кок и Ланг-Кок (Вьетнам).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФОСФОРИТОВ

Фосфоритовые месторождения являются основным источником фосфатного сырья. По качеству руд (массовая доля P_2O_5 , %) фосфоритовые руды разделяются на бедные (15 и менее), средние (15–25), богатые (более 25). Месторождения фосфоритовых руд по условиям образования относятся к экзогенным и метаморфогенным. Среди экзогенных месторождений выделяются морские, континентально-морские и континентальные месторождения.

Месторождения морского типа являются наиболее крупными объектами добычи фосфатов. Наиболее известные геосинклинальные фосфоритовые бассейны: Каратау (Казахстан), Скалистые горы (США), Джорджина (Австралия) и другие – имеют протяженность фосфоритовых пластов и горизонтов до сотен километров при ширине несколько десятков километров, суммарную мощность пластов до десятков метров, крутые углы падения, значительную сложность и интенсивность тектонических нарушений, высокие средние массовые доли P_2O_5 . Для них характерны массивные текстуры и оолитовые структуры руд.

Типичными примерами служат основные месторождения фосфоритового бассейна хребта Каратау (рис. 2). Продуктивный горизонт (от одного до семи пластов фосфоритов суммарной мощностью до 30–40 м)

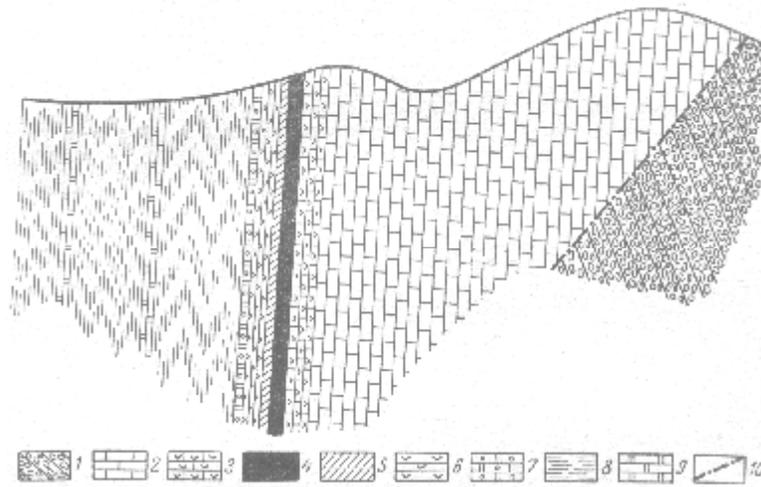


Рис. 2. Схематический геологический разрез через центральную часть фосфоритового месторождения Чулактау (по Б.М. Гиммельфарбу и А.С. Соколову): 1 – верхний девон (конгломераты); 2 – нижний силур – нижний кембрий (нерасчлененные известняки и доломиты); 3 – нижний силур – средний кембрий (горизонт «бурых известняков»); 4 – средний кембрий (фосфатная серия, главная фосфоритовая пачка); 5 – средний кембрий (фосфатная серия, фосфатно-кремниевая и нижняя фосфоритовая пачка); 6 – средний кембрий (фосфатная серия, кремневая пачка); 7 – средний кембрий (горизонт «нижних доломитов»); 8 – нижний кембрий (нерасчлененные кремнистые породы); 9 – нижний кембрий (первый и второй горизонты доломитов); 10 – линии тектонических нарушений

имеет мощность до 65 м и сложен кремнями, кремнистыми и алевритовыми сланцами, известняками, доломитами, содержащими фосфатное вещество, и пластами фосфоритов. Фосфориты представлены в основном плотными серыми и темно-серыми до черных фосфатно-глинисто-кремнистыми и карбонатными рудами с прослоями песчаных оолито-зернистых фосфоритов и фосфоритовых конгломератов. Минеральный состав фосфоритов непостоянен. Фосфатно-глинисто-кремнистые микрозернистые руды состоят из смеси тонкозернистых кварца, халцедона, гидрослюд, полевых шпатов, доломита и пирита, мелких стяжений и оолитов фосфатных и кремнисто-фосфатных зерен. Высококачественные фосфориты сложены гальками фосфоритов, обособленными фосфоритовыми зернами и оолитами, сцементированными доломитом и фосфатно-доломитовым цементом. Массовая доля P_2O_5 в фосфоритовых рудах бассейна от 10 до 36 % (в среднем 22–24 %). Разведанные запасы бассейна составляют более 2 млрд т руды, ресурсы оцениваются в 1,5 млрд т.

Широко известны типичные геосинклинальные месторождения Северной Африки: Хурибга (Марокко), Бу-Краа (Западная Сахара), Абу-Тартур (Египет) и др., где фосфоритоносная свита при мощности до 100 м имеет в своем составе до 11 рудных пластов мощностью от 0,1 до 6,0 м и массовую долю P_2O_5 в рудах 22–34 %.

Платформенные месторождения имеют широкое площадное распространение, субгоризонтальное залегание фосфоритовых пластов небольшой суммарной мощности (1–5 м), сложенных ракушечными или желваковыми типами руд. В России основная часть эксплуатируемых месторождений фосфоритов сосредоточена в чехле Русской платформы. Руды обладают в среднем невысокими массовыми долями P_2O_5 , однако по масштабам месторождения относятся к крупным.

Месторождения *ракушечных фосфоритов* распространены в Прибалтийском фосфоритовом бассейне, где фосфатоносные отложения вытянуты в виде полос на 10–15 км: Маарду, Кабала, Тоолсе, Азери (Эстония), Кингисеппское (Россия). Здесь в песчаных отложениях ордовика фосфатоносны в основном обломки и раковины брахиопод и фосфоритовые конкреции. Типичным примером месторождений является Кингисеппское, расположенное в западной части Ленинградской области (рис. 3). Фосфоритовый горизонт мощностью до 5 м сложен оболочными песками с прослоями ожелезненных доломитизированных песчаников. Минеральный состав руд представлен кварцем, раковинами, реже зернами глауконита, полевых шпатов, доломита и пленочного фосфата. Руды легко обогатимы путем флотации (при средних массовых долях P_2O_5 в руде 5–7 %, в концентрате – до 28 %). Отходы обогащения фосфоритов (кварцевые пески) используются в производстве стекла и в строительном деле.

Желваковые фосфориты занимают одно из ведущих мест по запасам среди месторождений фосфатного сырья – Вятско-Камское, Егорьевское, Полпинское (Россия), Чилисайское (Казахстан). Типичным представителем месторождений является Егорьевское (Московская область). Площадь его около 1 000 км², поэтому на месторождении выделяется ряд участков. Промышленная фосфоритоносность здесь связана с отложениями верхней юры – нижнего мела. В их составе выделяют три фосфоритовых слоя разделенных песчано-глинистыми отложениями и прослойками глины. Желваки глинистого фосфорита заключены в глауконитовом глинистом песке. Иногда желваки сливаются в плиты, сцементированные фосфатно-карбонатным цементом. Желваки от слабо- до сильноокатанных частично пиритизированы. Размеры желваков преимущественно от 1 до 15 см. Мощности фосфоритовых слоев от 0,1 до 8 м. Массовая доля P_2O_5 в рудах также сильно колеблется – от 2,8 до 32,7 %. Обогащение руд приводит к получению мытого концентрата с массовой долей P_2O_5 в среднем 20,5 %. Месторождение обеспечивает производство фосфоритовой муки для сельских районов севера и центра России. Попутно из сырья извлекается глауконит для производства пермутитов, красок и удобрений.

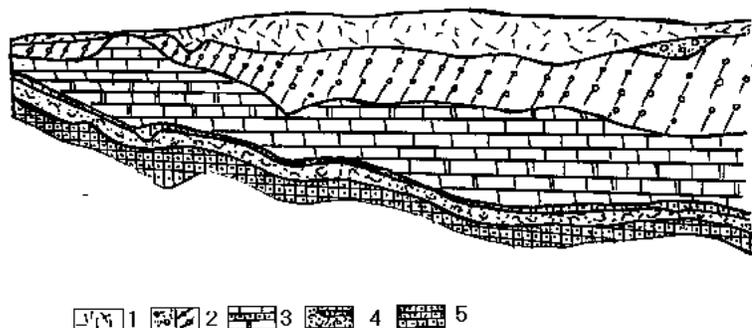


Рис. 3. Геологический разрез Кингисеппского месторождения фосфоритов (по В.М. Борзунову и Л.М. Гроховскому с упрощениями): 1 – торф; 2 – пески, суглинки верхнечетвертичные; 3 – известняки, доломиты и глауконитовые песчаники нижнего-среднего ордовика; 4 – фосфоритонесущие пески пакерортского горизонта нижнего ордовика; 5 – песчаники и пески кварцевые с прослоями алевролитов и глин тискреского горизонта среднего кембрия

Континентальные месторождения обычно подразделяют на биохимические осадочные и месторождения выветривания. *Биохимические осадочные месторождения* гуано представлены скоплениями (до 35 м мощности) экскрементов птиц, летучих мышей и продуктами гниения. Для фосфоритов этого типа характерны высокая массовая доля P_2O_5 (около 27 %) и присутствие значительных количеств азота и калия. Месторождения гуано известны в Перу, Чили и на островах Тихого и Индийского океанов.

Месторождения выветривания относят обычно к остаточно-инфильтрационным с переотложением продуктов выветривания. В России это мелкие до средних по запасам месторождения. Типичным примером является Телекское месторождение (Красноярский край). Месторождение представлено мезо-кайнозойской корой выветривания, развитой на карбонатных отложениях овсянковской свиты, сложенной массивными и брекчиевыми доломитами с прослоями и линзами известняков и кремней. Фосфатно-доломитный цемент брекчиевых доломитов содержит стяжения фосфатов диаметром 0,1-0,2 см неправильной или округлой формы. Кора выветривания приурочена к депрессиям в карбонатных породах. Средняя мощность фосфоритовых отложений Телекской депрессии 55 м. Центральная фосфоритовая зона на месторождении длиной 8 км при средней ширине 550 м имеет вертикальную мощность от нескольких до 120 м. Северная и южная ветви месторождения несколько меньших размеров. Доломиты на контакте с фосфоритами сильно закарстованы.

Среди фосфоритов выделяются рыхлые песчано-глинистые и каменистые фосфориты. Среди рыхлых фосфоритов распространены бесструктурные разности (бурые и желтовато-бурые песчано-глинистые), главным минералом фосфора в которых является фторапатит, менее развиты алюмофосфаты (вавелит и крандаллит). В состав руды входят также

гидрослюды, кварц, хлорит, карбонаты, гидроокислы железа и др. Фторapatит находится в рудах в виде самостоятельных зерен и сростков с другими минералами. Каменистые фосфориты распространены в меньшей степени – в виде обломочного материала среди рыхлых фосфоритов. Они представлены брекчиевыми, песчанистыми, кремнистыми, алевролитовыми и пелитоморфными разностями изверженных, карбонатных, кремнистых пород и фосфоритов с криптокристаллическим и кристаллическим фосфатным цементом. Массовая доля P_2O_5 в каменистых фосфоритах достигает 40 %. Формирование месторождения связывают с выветриванием фосфатсодержащих доломитов. Примерами месторождений подобного типа являются также Обладжанское, Сейбинское, Белкинское (Россия), месторождения штата Тенесси (США) и др.

Крупные *континентально-морские* галечниковые месторождения фосфоритов известны в штате Флорида США (месторождения Поулк и Ликрик).

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности фосфатного сырья.
2. Какова минимальная массовая доля P_2O_5 в добываемых апатитовых рудах?
3. Перечислите вредные примеси в апатитовых рудах.
4. На какие разновидности подразделяют фосфориты?
5. Назовите геолого-промышленные типы месторождений фосфатного сырья.

СЕРНОЕ СЫРЬЕ

В природе сера находится в основном в виде α -серы (ромбической серы), β - и γ -сера относятся к моноклинной сингонии и так же, как аморфная сера, встречаются редко. Преобладающие изотопы серы в природе – ^{32}S и ^{34}S . Кларк ее равен $4,7 \cdot 10^{-2}$.

Промышленное значение имеют: сера самородная, сульфиды, сульфаты, природные горючие газы, нефть и битумы. Самородная сера встречается в дипирамидальных или толстотаблитчатых кристаллах в виде вкраплений, массивных, сферических и почковидных образований. Обычными примесями являются селен и мышьяк, иногда – битумы, придающие желтой сере коричневый до черного цвет. Сера плавится при $113^\circ C$, не растворима в воде, но хорошо растворяется в дисульфиде углерода, щелочах, нефти, бензине и других органических жидкостях.

По вещественному составу руды самородной серы подразделяют на известняковый, глинистый, опалитовый и кварцитовый основные типы, причем 90–95 % запасов самородной серы сосредоточено в известняковом

типе. По текстурным особенностям руды обычно разделяют на дисперсные, вкрапленные, гнездово-вкрапленные, прожилково-вкрапленные и полосчатые.

С учетом области применения качество серы регламентируется соответствующими НТД. Так для производства резиновых шин и других резинотехнических изделий массовая доля серы, в зависимости от ее сорта, колеблется от 93 до 99,9 %. Вредными примесями являются зола, нерастворимая сера, серная кислота и углерод. В производстве полупроводников регламентируется массовая доля вредных элементов-примесей: мышьяка, железа, марганца, меди и селена. Для колчеданов серных флотационных, в зависимости от их марок, регламентируются массовая доля сульфидной серы (не менее 38–50 %) и массовая доля мышьяка (не более 0,3 %) – ГОСТ 444-75. Основная доля добытой серы используется в производстве серной кислоты, бумаги, медикаментов, взрывчатых веществ, спичек, синтетики, косметики, лаков и красок, асфальтов, бетонов и покрытий, в сельском хозяйстве как дезинфицирующее средство, для консервирования в пищевой промышленности, а также для очистки нефтепродуктов, сахара, вин, сиропов и др.

Мировые запасы самородной серы составляют 1 086 млн т, в нефти и газах – 1 250 млн т. Мировое производство серы из всех источников держится на уровне 53,0–57,0 млн т. Наибольшими запасами обладают Ирак, США, Чили и Мексика. Массовая доля самородной серы в рудах, предназначенных для извлечения серы, составляет в богатых рудах более 25 %, средних – 10–25 %, в бедных 5–10 %. Важным источником серы являются пиритовые руды. Запасы пирита капиталистических стран составляют около 1,9 млрд т. Первые места по запасам пиритовых руд занимают Саудовская Аравия, Испания и Португалия.

Разработка месторождений серы ведется в основном карьерами и методом подземной выплавки (ПВС, или фраш-метод), когда в рудное тело подается по скважинам перегретая до 150–165 °С вода, а расплавленная сера выносится с помощью сжатого воздуха.

Постоянно растет производство серы и серной кислоты, получаемых в процессе переработки и очистки природного газа и нефти (восстановленная или регенерированная сера), угля и руд цветных металлов. Массовая доля серы в нефти может достигать более 5 %, в горючих газах – десятки процентов. Промышленные предприятия выпускают товарную серу в виде комовой, гранулированной, молотой, чешуированной, литьевой и жидкой. Крупнейшие производители серы – США, Мексика и Ирак. Производство пиритового концентрата наиболее развито в Испании, Италии и Японии. Крупнейшими экспортёрами серы являются Канада и США, крупнейшими импортёрами – США и Великобритания. Наиболее безопасный метод доставки серы – транспортировка ее в жидком виде. Цены на мировом рынке в среднем колеблются от 80 до 130 дол. за тонну серы.

По масштабам месторождения серного сырья подразделяются в зависимости от запасов, млн т: серных руд – на крупные (более 50), средние (10–50), мелкие (менее 10); полиметаллических сульфидных руд – на крупные (более 10), средние (1–10), мелкие (менее 1); сероводородсодержащих газов – на уникальные (более 500), крупные (50–500), средние (менее 50); сернистой нефти – на крупные (более 1), средние (0,5–1), мелкие (менее 0,5).

Месторождения самородной серы генетически связаны с вулканическими процессами и формированием осадочных толщ карбонатно-сульфатного состава. Основными промышленными типами месторождений самородной серы являются осадочные в карбонатно-гипс-ангидритовых толщах, коры выветривания в солянокупольных структурах, вулканогенные месторождения. Более 90 % мировых запасов самородной серы связано с группой экзогенных месторождений. Для России это основной источник самородной серы.

Месторождения осадочного типа в карбонатно-гипс-ангидритовых толщах.

Водинское месторождение самородной серы относится к группе месторождений Среднего Поволжья и сложено сероносными карбонатными, мергелистыми и глинистыми породами казанского яруса. На месторождении известно восемь сероносных горизонтов. Разнозернистые агрегаты и крупные кристаллы серы распределены в виде вкрапленности и гнезд в глинистых и мергелистых породах и гипсе двух верхних горизонтов. В нижних горизонтах сера образует гнезда, вкрапленность и прослой мощностью 4-5 см. Сера, окрашенная битумами в красновато-коричневые цвета, соседствует в рудах с карбонатами (кальцит и доломит), гипсом, целестином, кварцем, халцедоном и глинистым веществом.

Верхнепермские месторождения серы Среднего Поволжья имеют широкое площадное распространение (несколько сот квадратных километров) в виде полосы вдоль берега р. Волги. Они сингенетичны вмещающим породам – приурочены к одному стратиграфическому горизонту казанского яруса, сложенного мергелями, известняками и доломитами, переслаивающимися с гипсами и ангидритами. Сероносные горизонты залегают субгоризонтально, мощность их изменчива – от 0,10 до 3,5 м. Массовая доля серы в рудах колеблется от 10 до 25 %. Генезис месторождений связывается с метасоматическим замещением сульфатов карбонатами в экзогенных условиях.

Крупные месторождения самородной серы связаны с солянокупольными структурами (*промышленный тип месторождений коры выветривания*), классическим примером являются месторождения Мексиканского залива.

Месторождения Мексиканского залива располагаются вдоль северного и западного его побережья и тесно связаны с солевыми штоками, которые в виде куполов округлой, реже грибообразной формы, прорывая

осадочные породы, находятся на глубинах от 50 до 800 м. Существенно галитовые соляные штоки перекрыты породами кепрока мощностью от нескольких до сотен метров. Непосредственно на соляном куполе залегают массивные ангидриты (ангидритовая зона). Средняя (промежуточная) трещиноватая и кавернозная зона сложена в основном гипсом и кальцитом, возникшими за счет замещения ангидритов. Верхняя зона сложена кальцитом и часто нефтеносна. Мощности зон кепрока изменчивы – от десятков до сотен метров. Серные залежи мощностью в среднем 30–35 м с массовой долей серы 15–50 % приурочены к средней гипсовой и верхней кальцитовой зонам (рис. 4). Сера в залежах выполняет каверны и трещины во вмещающих гипсовой и карбонатной породах. Она соседствует со стронцианитом, целестином и баритом (до 35 %), сульфидами (до 1 %), нефтью и газом.

Предполагается возникновение месторождений следующим образом: 1) формирование нижней ангидритовой зоны за счет остаточного ангидрита в растворенной грунтовыми водами части соляного штока; 2) переход ангидрита в гипс в процессе гидратации при формировании средней зоны кепрока; 3) восстановление сульфатов до сероводорода в присутствии нефти и сульфатредуцирующих бактерий по реакции $\text{CaSO}_4 + 2\text{C}_{\text{орг}} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{S} +$

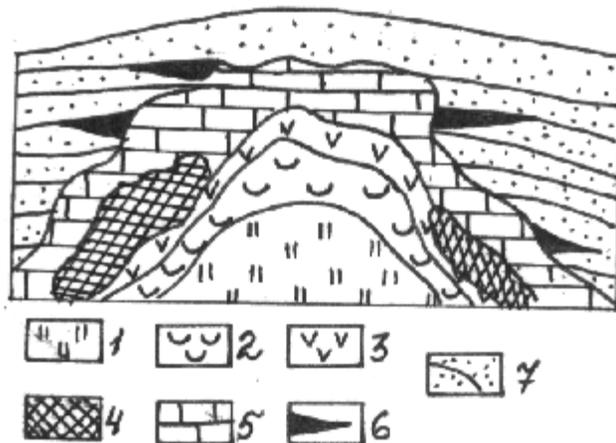


Рис. 4. Разрез типичного соляного купола с хорошо развитым кепроком (по Р. Тодду и др.): 1 – соляной шток; 2–5 зоны: 2 – ангидритовая, 3 – гипсовая промежуточная, 4 – кальцитовая сероносная, 5 – кальцитовая; 6 – нефть; 7 – осадочные породы, дислоцированные при образовании соляного купола

$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2$ с последующим окислением сероводорода с образованием серы и кальцита.

Вулканогенные месторождения самородной серы располагаются в пределах вулканических поясов. Наиболее крупным является Тихоокеанский пояс. Месторождения связаны с андезитовыми вулканитами в пределах

внутренних вулканических дуг. Обычно эти месторождения подразделяются на *импрегнационно-метасоматические*, *кратерно-озерные* и *сублимационные* типы. Из них наиболее важными в промышленном отношении являются импрегнационно-метасоматические месторождения. На территории России к таким вулканогенным месторождениям относится Новое (о. Итуруп). Месторождение Новое приурочено к экструзивному куполу и представлено пластообразной залежью серных кварцитов и опалитов мощностью до 35 м. Массовая доля серы в них 20–80 %. Для руд характерны очковая и сетчатая текстуры. Ниже серных кварцитов залегают опалогипсовые и алунитовые руды с меньшими массовыми долями серы (10–12 %) и увеличивающимися массовыми долями сульфидов железа (7–10 %). В опалитах встречаются колломорфные текстуры руд, образованные чередованием концентрических слоев серы и опала. Полосчатые текстуры присущи алунитовым рудам. Для месторождений подобного типа на Курильских островах, Камчатке, Филиппинах, в Японии, Чили, Перу характерна зональность в смене фаций измененных пород от флюидоподводящих каналов.

Внешние зоны представлены гидрослюдисто-монтмориллонитовыми породами и пропилитами, внутренние – серными кварцитами (опалитами) с алунитом и каолинитом.

Крупнейшее месторождение пирита Вади-Вассет (Саудовская Аравия) имеет протяженность до 17 км при ширине до 1 км, запасы более 640 млн т. Верхняя часть месторождения представлена железной шляпой. Ниже буровыми скважинами вскрыта зона массивного пирита.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности серного сырья.
2. Какова минимальная массовая доля серы в бедных серных рудах?
3. Перечислите вредные примеси в серных рудах.
4. Охарактеризуйте разрез типичного кепрока.
5. Назовите основные геолого-промышленные типы месторождений серного сырья.

МИНЕРАЛЬНЫЕ СОЛИ, ГИПС И АНГИДРИТ

В этой сырьевой группе объединяются природные растворимые в воде соединения хлоридов, сульфатов, карбонатов и бикарбонатов щелочных и щелочноземельных металлов.

МИНЕРАЛЬНЫЕ СОЛИ

В природе минеральные соли встречаются как в твердом (ископаемые), так и в растворенном (озерные) видах. Ископаемые соли – горные породы, состоящие из агрегатов соляных минералов с механическими

примесями гипса, ангидрита, карбонатов, глины, органики и др. Озерные месторождения солей – соляные озера, которые по качественным и количественным параметрам соляного сырья представляют интерес для промышленного использования.

К природным минеральным солям относят следующие виды солей, слагающих самостоятельные залежи и пласты: калийные соли, калийно-магниевые соли, магниевые соли, каменную соль, сульфаты натрия, ископаемую соду. Наибольшее распространение имеют каменные и калийные (хлоридные) соли. Калийно-магниевые и магниевые соли залегают вместе с пластами ископаемых калийных солей и характерны для хлоридных озер. Ископаемые сульфаты натрия и сода встречаются редко, в связи с чем сульфатные и карбонатные озера играют значительную роль в балансе добычи этих минералов. Список соляных минералов весьма значителен, однако промышленную ценность имеют наиболее распространенные из них(табл.1).

Таблица 1

Распространенные минералы солей

Группа соляных минералов	Название	Химическая формула
Хлориды	Галит	NaCl
	Сильвин	KCl
	Бишофит	MgCl ₂ · H ₂ O
	Карналлит	KCl · MgCl ₂ · 6H ₂ O
	Тахгидр	CaCl ₂ · 2MgCl ₃ · 12H ₂ O
Сульфаты	Тенардит	Na ₂ SO ₄
	Мирабилит	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O
	Глауберит	Na ₂ SO ₄ · CaSO ₄
	Астраханит	Na ₂ SO ₄ · MgSO ₄ · 4H ₂ O
	Каинит	KCl · MgSO ₄ · 3H ₂ O
	Кизерит	MgSO ₄ · H ₂ O
	Лангбейнит	K ₂ SO ₄ · 2MgSO ₄
	Полигалит	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ · 2H ₂ O
Карбонаты	Природная сода (натрон)	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O
	Трона	Na ₂ CO ₃ · NaHCO ₃ · 2H ₂ O
	Нахкол	NaHCO ₃
	Давсонит	NaAl(CO) ₃ (OH) ₂

Наименование соляных пород дается по преобладанию порообразующих минералов – галит-полигалитовая, каинитовая, бишофитовая, сильвинитовая, карналлитовая и т.д. Широко распространены термины «каменная соль» и «калийная соль».

Калийная соль (калийные руды) представлена разноцветными сильвинитовыми, каинитовыми, лангбейнитовыми, карналлитовыми и полигалитовыми породами, чаще руды имеют смешанный состав. Массовая доля калия в рудах – более 20 %.

Каменная соль состоит из галита с механическими примесями глинистого вещества, карбонатов и др. Массовая доля галита 93–99 %.

Текстуры в основном массивные и слоистые. Цвет обычно бесцветный или молочно-белый, который, однако, может быть и иным за счет примесей.

В зависимости от применения каменная соль подразделяется на пищевую, кормовую и техническую. В пищевой промышленности используется более половины всей добываемой соли, в животноводстве – около 10 %, остальное количество используется как техническая соль.

В пищевой соли массовая доля NaCl должна быть не ниже 97 %, так же как в техническом сорте. Вредными примесями являются ионы K^{+1} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} и Fe_2O_3 . Добавками в пищевую соль служат иод и фтор. Кормовая соль разделяется на поваренную (массовая доля NaCl не ниже 93 %) и сульфатную (не ниже 75 %). По способу производства кормовую поваренную соль разделяют на выварочную, каменную, самосадочную и садочную, по виду – на рассыпную, глыбовую и брикетированную. Масса кусков глыбовой соли – от 2 до 40 кг, брикетов 1,5-15 кг, крупность рассыпной соли не более 40 мм. Сульфатная (рассыпная) соль представляет собой смесь хлоридов и сульфатов натрия, кальция и магния, однако массовая доля Na_2SO_4 не должна превышать 17 %. Вредными примесями так же, как и для пищевой соли, остаются ионы кальция, магния и сульфат-ионы.

Наиболее чистые каменные и калийные соли идут на приготовление реактивов – массовая доля NaCl 99,8-99,9 %, массовая доля KCl – не менее 99,8 %. Хлористый калий получают из сильвинитовых руд. В сильвините молотом и стандартном массовая доля KCl не должна быть менее 22 %. После переработки калиевых руд флотационным и галургическим методами получают хлористый калий, используемый как удобрение, а также для производства химических продуктов. Массовая доля калия в пересчете на K_2O , в этом случае не должна быть менее 60 %.

Полиминеральные калийно-магниевые концентраты, применяемые для тех же целей, должны иметь массовую долю калия в пересчете на K_2O не ниже 17,5 %, а получаемая калимагнезия – не ниже 25 %. При этом массовая доля MgO не должна быть ниже 8 %. Обогащенный карналлитовый концентрат, получаемый в результате переработки калий-магниевых соляных руд для производства металлического магния и других целей, выпускается с массовой долей $MgCl_2$ не ниже 31,8 %, при этом вредной примесью является $CaSO_4$, массовая доля которого не должна превышать 0,05 %. Магний хлористый технический (бишофит) чешуированный получают комплексной переработкой рапы для химической, легкой промышленности, для строительства с массовой долей магния не менее 11,8 %. Кроме того, магний хлористый технический получают в виде раствора для производства жженой магнезии и оксида магния.

Сульфаты натрия используются непосредственно после очистки (технический сернокислый натрий) – массовая доля Na_2SO_4 не менее 94 %. Стандарт на получаемый из естественных рассолов мирабилит $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ предусматривает массовую долю Na_2SO_4 в нем не менее 96 %. Вредной

примесью для этих соединений является NaCl. В очень небольшом количестве для промышленного производства добывается тенардит. Сульфаты натрия используются в целлюлозно-бумажной, химической, стекольной, текстильной, кожевенной, фармацевтической, металлургической и других отраслях промышленности.

Сульфаты калия природные представляют собой каинито-лангбейнитовую породу с примесью полигалита и применяются в сельском хозяйстве как калий-магниевое удобрение, а в дрожжевой отрасли – как составная часть питательной среды для выращивания дрожжей. Массовая доля калия в каинитовых рудах в пересчете на K_2O не должна быть ниже 9,5 %.

Карбонаты натрия (кальцинированная сода) используются в химической, стекольной, электронной, целлюлозно-бумажной промышленности и др. Однако природная сода в России используется промышленностью в весьма ограниченных количествах. В то же время за рубежом (США) производство кальцинированной соды из природного сырья (трона) составляет более 7 млн т.

Подтвержденные запасы калийных солей в мире оцениваются в 13,2 млрд т в пересчете на оксид калия K_2O , из них около 4,4 млрд т приходится на Канаду. Подавляющее количество их (95 %) составляют хлористые калийные и калийно-магниевые соли – сильвиниты и карналлитовые породы, остальное – сульфатные разновидности. Стоимость 1 т KCl примерно 96–123 дол.

Мировые запасы каменной соли – $3,5 \cdot 10^9$ млн т. Стоимость одной тонны от 40 до 70 дол. Мировое производство поваренной соли находится на уровне 190–200 млн т. Основные ее производители: США, Китай, Германия, Канада, Индия, страны СНГ, в том числе Россия. Производство поваренной соли в России составляет около 9 млн т (менее четверти американского). Около 40 % выпуска приходится на Башкортостан (геотехнологические рассолы), 33 % – на Астраханскую область (самосадочная соль из оз. Баскунчак), 13 % – на Иркутскую, 11 % – на Оренбургскую и Волгоградскую области (каменная соль). Ведущие импортеры калийных солей: США (25 % мирового импорта), Китай, Бразилия, Индия, Франция, Япония.

По масштабам месторождения солей подразделяются в зависимости от запасов, млн т: каменных солей – на весьма крупные (более 5 000), крупные (500–5 000), средние (100–500), мелкие (менее 100); калийных и калийно-магниевых солей (в пересчете на K_2O) – на весьма крупные (более 1 000), крупные (300–1 000), средние (100–300), мелкие (менее 100); сульфатов натрия – на крупные (более 10), средние (5–10), мелкие (менее 5).

Месторождения солей разделяют на ископаемые и современные. Минеральные ископаемые соли генетически относятся к типичным химическим осадкам морского и озерного типа. Современные месторождения солей связаны с соляными озерами, лагунами и лиманами, в которых отложение солей началось сравнительно недавно и продолжается в настоящее время из рапы этих водоемов.

Месторождения ископаемых солей разделяются на морские и континентальные в зависимости от источника поступления солей. Морские месторождения солей (каменных, калийных и калийно-магниевых) приурочены к участкам впадин платформ и предгорным прогибам. Они представлены обычно мощными пластообразными, линзообразными либо

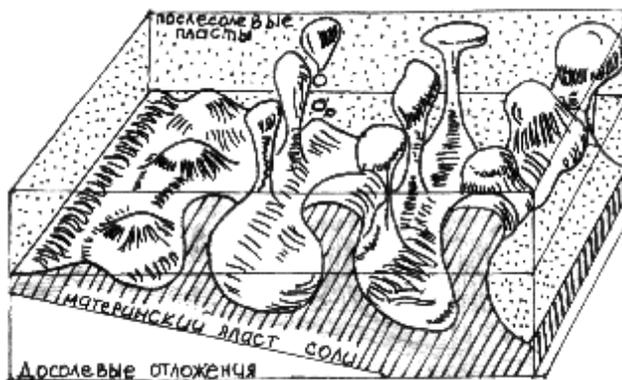


Рис. 5. Соляные купола в Северо-Германской впадине (по Трусгейму)

куполообразными телами (см. рис. 4), часто со следами течения или сильно перемятые (рис. 5).

Примером *морского месторождения каменных ископаемых солей*, приуроченных к крупным краевым синеклизам, является Илецкое месторождение в Прикаспии.

Илецкое месторождение находится в Оренбургской области к югу от города Соль-Илецка и связано с соляным куполом. Купол в виде эллипса имеет размеры в плане 0,9x2 км. Соль галитовой свиты нижней перми обрамляет купол с севера и частично с запада и востока и перекрывается сульфатно-соленосными отложениями. Контакты купола с боковыми породами крутые до вертикальных. Глубина соляного тела по геофизическим данным более 2 600 м. Каменная соль представлена почти мономинеральным галитом преобладающей равномерно-зернистой структуры и полосчатой текстуры за счет разноокрашенных слоев. Иногда в соляной толще наблюдаются прослой ангидрита мощностью до 0,5 м. Внутреннее строение соляного тела сложное с преобладанием крутых углов падения слоев, рельеф кровли соляного тела неровный в результате проявления процессов карстообразования. Массовая доля NaCl в руде составляет в среднем 97,8 %. Примером зарубежных месторождений подобного типа является Славянско-Артемовская группа месторождений Украины.

Континентальные месторождения каменной соли – соляные озера с поверхностной и донной рапой и донными отложениями солей являются для

России основным источником пищевой поваренной соли и значительным источником кормовой. При разработке таких месторождений получают следующие солепродукты: мелкокристаллическую выварочную соль; молотую соль (самосадочную и садочную от 0,8 до 4,5 мм); кусковую (глыбы), зерновую и дробленую; солеблоки; брикетированную соль для нужд животноводства. Классическим примером таких месторождений является Баскунчакское.

Баскунчакское месторождение в Астраханской области занимает озерную площадь около 120 км² в свде погребенной солянокупольной структуры. Объектом добычи является залежь самосадочной поваренной соли общей мощностью 25 м. Добыча соли ведется до глубины 8 м. Разрабатываемая часть соляного пласта представлена вверху новосадкой мощностью до 0,1 м – слоем соли, образующейся за счет сезонного растворения и выпадения в осадок, затем следует старосадка мощностью до 0,5 м. Старосадка представлена галитом имеющим слоистое строение с большим количеством включений рапы. Еще ниже залегает так называемая гранатка – слой галита, состоящий из практически не связанных между собой сростков кристаллов галита. Пористость гранатки превышает 30 %. Пространство между сростками кристаллов галита заполнено рапой и илом, в нижней части пласта наблюдается постепенный переход между галитом и илом. Чугунка образует маломощные линзы среди гранатки и на дневной поверхности. Среднее содержание галита в пласте 92 %. Добываемая соль промывается рапой и доводится до пищевой соли, кормовая соль блоками нарезается из чугулки. Обычными незначительными примесями в соли являются гипс, кальцит, карналлит, гематит. Постоянная подпитка озера происходит за счет подземных вод.

Калийные и калийно-магниевые соли разделяют на бессульфатные (хлоридные) соли, на долю которых приходится основная добыча, и сульфатные соли. Хлоридные калийные и калийно-магниевые соли промышленного значения приурочены к формациям морского генезиса. Основные промышленные месторождения калийных солей располагаются в верхнепалеозойских отложениях. В России разведано крупное Непское месторождение (Иркутская область) калийных солей кембрийского возраста. Соленосные серии обычно представляют собой чередование пластов калийных и калийно-магниевых солей с прослоями каменной соли и несолевых отложений. Примером крупных месторождений хлоридного типа является Верхнекамское.

Верхнекамское месторождение, называемое также бассейном, расположено в Соликамской впадине Предуралья Краевого прогиба. Площадь месторождения около 4 500 км² на территории Чердынского, Соликамского и Верхнекамского районов Пермской области. В основном соленосные отложения относятся к кунгурскому ярусу нижней перми.

Мощность соленосной толщи достигает 600 м. Значительная часть нижней части толщи сложена подстилающей каменной солью.

Калиеносные отложения вмещают сильвинитовый и сильвинит-карналлитовый горизонты общей мощностью до 80 м. Сильвинитовый горизонт вмещает до шести пластов сильвинитов общей мощностью 12 м. Для горизонта характерно не только чередование прослоев сильвинита и каменной соли, но и замещение сильвинита каменной солью на отдельных участках. Средние массовые доли КСI в сильвинитовых пластах колеблются от 24,5 до 41,5 %. Сильвинит-карналлитовый горизонт имеет сложное строение за счет чередования пластов калийных солей и каменной соли. Сами пласты калийных солей представлены в одних случаях карналлитом, в других – сильвинитом. Массовая доля КСI в среднем 18–20 %, а MgCl – 8–13 %. Характерно практическое отсутствие в рудах сульфатов калия и магния. Общая мощность горизонта в среднем 60–70 м при суммарной мощности девяти калийных пластов 45–50 м. Покровный горизонт каменной соли имеет среднюю мощность 20 м. Вмещающими породами месторождения являются глинисто-мергелистые породы с прослоями ангидритов, доломитов,

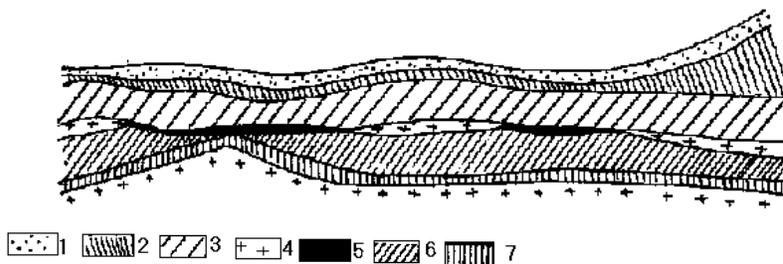


Рис. 6. Разрез участка Верхнекамского месторождения с сильвинитовой шляпой (по А.А. Иванову с упрощениями): 1 – четвертичные отложения; 2 – известняково-мергелистая толща; 3 – глинисто-мергелистая толща; 4 – каменная соль; 5 – сильвинитовая шляпа; 6 – карналлитовая порода; 7 – сильвинит

песчаников и каменной соли (рис. 6).

Саскачеванский бассейн (Канада) имеет протяженность до 800 км, при ширине 250 км. Мощность пластов калийных солей, сложенных в основном сильвинитом, до 5 м при средней массовой доле K_2O 25–35 %. Крупнейшим соляным магниево-калиевым бассейном мира является также Северо-Германский – 150 тыс. км². Наиболее важный здесь Страсфуртский пласт мощностью от 6 до 40 м представлен карналлитовой породой, содержащей 55 % карналлита, 26 % галита, 17 % кизерита и 2 % примесей ангидрита и глины. В качестве примесей в солях присутствуют бром, рубидий и цезий. Карлсбадское месторождение в США, разрабатываемое в штате Нью-Мексико, насчитывает 13 пластов солей, представленных полигалитом, сильвином, каинитом и лангбейнитом. Мощность пластов до 1,2 м, массовая доля K_2O – 14–26 %.

Кучукское месторождение (оз. Кучук), расположенное в Благовещенском районе Алтайского края, относится к крупнейшим месторождениям сульфатно-натриевого типа на территории России. Озеро врезано в песчано-глинистые отложения неогена и антропогена бессточной Кучукской котловины. Размеры озера 18x12 км², корневые отложения мирабилита при мощности до 3,5 м покрыты слоем старосадки (стеклеца), новосадки и слоем высокоминерализованной рапы. Постоянное отложение мирабилита зависит от колебаний засушливых и влажных периодов. Годовые колебания уровня рапы достигают 0,5–0,7 м. В осенне-зимний период образуется новосадка мирабилита, которая в летний период частично или полностью растворяется. Около 30 млн т сульфата натрия участвует в таких фазовых переходах. Добыча мирабилита заключается в перекачке летней высокоминерализованной рапы в запасные водоемы и извлечение мирабилита в зимние периоды при сбросе маточного раствора в озеро Кучук. Массовая доля сульфата натрия в летней рапе составляет 5–7 %. Накопление солей в озере осуществляется за счет поверхностного стока, вод р. Кучук и подземных вод. Крупнейшим зарубежным прибрежно-морским месторождением мирабилита является Кара-Богаз-Гол (Туркмения).

Промышленные месторождения природной соды не развиты на территории России. Примером зарубежных месторождений соды могут служить месторождения впадины Грин-Ривер штата Вайоминг и подобные месторождения других штатов в США.

ГИПС И АНГИДРИТ

Гипс и ангидрит, водный и безводный сульфаты кальция, распространены среди соленосных образований и сходны по химизму, генезису и условиям залегания.

Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ обычно встречается в виде таблитчатых кристаллов моноклинной сингонии, часто кристаллы имеют искривленные и скрученные поверхности. Длинные призматические кристаллы также могут быть изогнуты и скручены. Двойники встречаются часто и по форме напоминают ласточкин хвост. Агрегаты гипса зернистые, массивные, грубо- и тонкозернистые, листоватые, в виде волокнистых прожилков или псевдоморфоз по ангидриту. Спайность по {010}, {001}, {110} совершенная. Твердость 2. Плотность 2,32. Излом занозистый. Цвет белый, бесцветный, желтоватый или оранжево-коричневый. Блеск стеклянный до перламутрового иногда шелковистый. Минерал прозрачен до просвечивающего. Растворим в HCl и частично в воде. Температура плавления 1 450 °С.

Разновидности гипса: прозрачный крупнокристаллический бесцветный – *селенит*, или *лунный камень*, прозрачные монокристаллические разновидности – *марьино стекло*, агрегаты с параллельно-волокнистой структурой – *атласный шпат*. Крупнокристаллический гипс с множеством захваченных

при росте песчинок на плоскостях спайности называют *репетекским гипсом*, пластинчато-звездчатые агрегаты – *гипсовыми цветами*. Среднекристаллические чистые разновидности – *сахаровидный гипс*, тонкозернистые массивные агрегаты – *алебастр*. При 70 °С гипс медленно, а при 90 °С быстрее переходит в полугидрат – коммерческое название *модельный, штукатурный, алебастр, «обожженный гипс»*. Обычно его получают нагреванием гипса до 190–200 °С.

Таким образом, алебастром часто называют как строительный штукатурный гипс, так и мелкозернистый декоративный агрегат гипса. При дальнейшем нагревании (до 220 °С) алебастр превращается в искусственный ангидрит, который растворим в воде, а на воздухе благодаря поглощению влаги переходит в полугидрат. При температурах 450–750 °С образуется так называемый *«мертвообожженный гипс»*. Дальнейший обжиг гипса (до 800–1000 °С) приводит к появлению небольших количеств жженой извести (до 3 % СаО), и такой продукт называют *эстрихгипсом*. Эстрихгипс в смеси с водой медленно твердеет в течение 0,5–2 дн. и достигает большей твердости, чем алебастр. Иногда эстрихгипс называют гидравлическим гипсом. Гипс плохо проводит тепло и обладает незначительной растворимостью в воде. В природе гипс отлагается первым из морской воды при ее испарении, после него по мере увеличения солености выпадает ангидрит, затем галит и более растворимые соли магния и калия.

Кроме собственно минерала, гипсом называют гипсовое сырье, или камень гипсовый – горную породу, сложенную в основном гипсом с примесью карбонатов, кварца, глины, галита и других минералов. Рыхлую гипсовую породу, состоящую из глины, гипса и песка, которая применяется в обожженном виде как вяжущее средство, называют гажей, ганчем, глиногипсом или землистым гипсом.

Ангидрит CaSO₄ в виде толстотаблитчатых, игольчатых или призматических кристаллов (ромбическая сингония) встречается редко, образует массивные, тонкозернистые, волокнистые радиально-лучистые или перистые агрегаты, иногда шестоватые. Спайность совершенная по {001}, средняя по {010} и {100}. Цвет бесцветный до синеватого или фиолетового, серый до темно-серого. Твердость 3,5. Хрупкий. Плотность 2,89. Блеск стеклянный до перламутрового. Минерал прозрачный до просвечивающего. Излом неровный. Растворим в концентрированной H₂SO₄, частично в HCl и слабо растворим в воде. Температура плавления 1450 °С. Стронций и барий иногда замещают кальций в небольших количествах. В присутствии воды при атмосферном давлении постепенно переходит в гипс, при этом объем минерала увеличивается до 30 %. Ангидрит может отлагаться непосредственно из морской воды при температурах 42 °С или при меньшей температуре, но при повышенной солености. Он может также образоваться при обезвоживании гипса, в связи с чем встречаются ангидритогипсовые смешанные породы.

Декоративные разновидности гипса – селенит и алебастр – применяют для изготовления художественных изделий. Необожженный тонкоразмолотый гипс используется в малоэтажном строительстве в качестве цемента или материала для отливки архитектурных декоративных деталей, украшающих фасады зданий. В основном гипс и гажу применяют в виде обожженных в различной степени порошков.

При оценке сырья с целью применения камня гипсового и гипсоангидритового прежде всего учитывается массовая доля $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, отдельно учитываются массовые доли H_2O и SO_3 . Массовую долю гипса в гипсовом камне определяют по массовой доле кристаллизационной воды, массовую долю ангидрита в гипсоангидритовом камне – по массовой доле серного ангидрита. Для использования в металлургической промышленности вредными примесями в гипсе являются массовые доли MgO , CuO , SiO_2 . Большая часть необожженного гипсоангидритового камня применяется в цементной промышленности. Для производства цемента: портландцемента, шлакопортландцемента, сульфатостойкого цемента, цемента для строительных растворов, ангидритового цемента и цемента гипсоглиноземистого расширяющегося – применяется камень гипсовый и гипсоангидритовый, который должен иметь массовую долю $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ более 70 %. Такое же качество сырья необходимо для использования гипсового сырья в бумажной промышленности, в производстве тонкостенных строительных изделий и декоративных деталей, многопустотных гипсоперлитобетонных и декоративных деталей, при осуществлении штукатурных работ, заделке швов, изготовлении плит гипсовых облицовочных мраморовидных, листов гипсокартона.

При производстве флюсов для металлургии массовая доля гипса в составе гипсового камня не должна быть менее 86,15 %, вредными примесями в металлургическом сырье являются кремнезем и оксиды магния и меди. Массовая доля гипса в ангидритовом камне должна быть более 80 % для применения его в производстве строительного гипса, тогда как гажу (ганч) может быть использована для той же цели при массовой доле гипса более 25 %. Производство фарфора и керамики, высокопрочного вяжущего (супергипса) для стоматологии и ювелирного дела, формовочного гипса для изготовления моделей, капов и форм, эстрихгипса для бесшовных полов под линолеум, искусственного мрамора и медицинского гипса требует сырье более высокого качества – с массовой долей $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ не менее 95 %. Для производства оптических деталей используется гипс наиболее прозрачных разновидностей. Значительная часть гипсоангидритового камня используется в сельском хозяйстве для получения сульфата аммония и улучшения качества засоленных почв.

Мировые запасы гипса около 7 млрд т. Ведущими экспортёрами гипса и ангидрита являются Канада, Таиланд, Испания. Основные импортёры – США и Япония. Стоимость сырого гипса составляет 8–21 дол/т.

Основные типы месторождений гипса и ангидрита имеют осадочное происхождение, формируясь среди галогенных отложений солеродных бассейнов. По запасам сульфатно-кальциевого сырья, млн т, месторождения подразделяются на весьма крупные – 1 000, крупные – 100– 1 000, средние – 10–100, мелкие – 1–10.

Основными геолого-промышленными типами месторождений гипса являются осадочные месторождения и месторождения выветривания.

В *осадочных* выделяют сингенетические и эпигенетические месторождения.

Сингенетические месторождения образуются путем осаждения гипса из морской воды. Классическим примером крупнейшего месторождения подобного типа в России является Новомосковское месторождение гипса в Тульской области. Месторождение приурочено к южному крылу Московской синеклизы, к так называемому гипсовому горизонту фаменского яруса верхнего девона. Горизонт перекрывается доломитами, доломитизированными известняками, известковистыми глинами и мергелями. Подстилающий горизонт представлен кавернозными известняками, доломитами, гипсовыми доломитами и мергелями. Слои гипсового горизонта залегают согласно с общей структурой синеклизы. Горизонт имеет сложное внутреннее строение, обусловленное переслаиванием чистых гипсов с гипсодолемитами и доломитогипсами, однако его мощность достаточно выдержана и составляет от 20 до 30 м. Гипс белый, серый, зеленовато-серый и бурый. Текстуры массивные и слоистые. Массовая доля $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ составляет от 65 до 100 %. К месторождениям подобного типа принадлежат также Павловское (Нижегородская область), Заларгенское (Иркутская область), Селеукское (Башкирия) и др.

Эпигенетические месторождения гипса образуются за счет сингенетических месторождений при гидратации ангидрита. Типичными примерами таких месторождений являются крупнейшие гипсовые месторождения Донбасса (Артемовское и др.), связанные с соленосной толщей, содержащей до семи пластов гипса мощностью от 0,3 до 19,5 м. Пласты гипса переслаиваются с глинами, песчаниками, доломитами и мергелями. Такой состав пород приводит к развитию в пределах месторождений множества карстовых воронок. На крупнейшем Артемовском месторождении установлено достаточно сложное строение гипсовых тел, часто имеющих форму линз. Скопления линз иногда образуют пачки сближенных гипсовых тел неравномерной мощности.

К подобному типу месторождений относятся и месторождения Северо-Двинской группы, например, Звозское (рис. 7) и др.

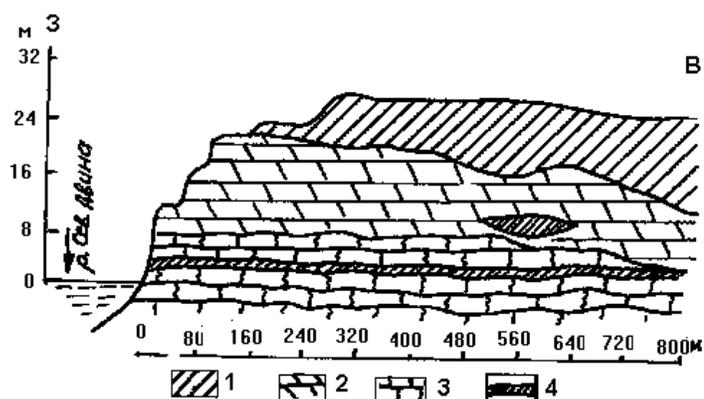


Рис. 7. Схематический геологический разрез Звозского месторождения гипса (по А.С. Артамонову): 1 – четвертичные отложения; 2 – гипс; 3 – ангидрит; 4 – глина алевритовая

Месторождения выветривания имеют значительно меньшие масштабы, однако достаточно широко распространены и удобны для эксплуатации (Средняя Азия, Кавказ и др.). Остаточные месторождения гипса в кепроках соляных куполов (см. рис. 4) возникают за счет растворения и выноса каменной соли (Бриневское месторождение в Белоруссии и др.). Инфильтрационные месторождения образуются вследствие легкой растворимости сульфата кальция и переотложения его в выветрелых, обычно четвертичных, терригенных отложениях. Так возникают залежи гажи и ганча мощностью до 5 м с запасами до десятков миллионов тонн.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите виды минералов солей и их формульный состав.
2. Охарактеризуйте разновидности гипса.
3. Перечислите вредные примеси в пищевой соли.
4. Назовите примеры промышленных месторождений солей
5. Какие вы знаете геолого-промышленные типы месторождений солей и гипса?

БОРНОЕ СЫРЬЕ

Кларк бора, по А.П. Виноградову, $1,2 \cdot 10^{-3}$, наиболее обогащены бором глинистые осадки и воды океанов, лагун и озер. Количество бора в гидромусковитах достигает нескольких тысяч грамм на тонну. Известно около 160 минералов бора, однако промышленными являются лишь следующие боросиликаты и бораты:

- данбурит $\text{CaB}(\text{OH})\text{SiO}_4$;
- датолит $\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8$;

суанит $Mg_2B_2O_5$;
котоит $Mg_2(BO_3)$;
людвицит $(MgFe^{2+})_2Fe^{3+}[BO_3]O_2$;
ашарит (ссайбелиит) $Mg_2[B_2O_4(OH)](OH)$;
преображенскит $Mg_3[B_5O_7(OH)_4]_2 \cdot 2H_2O$;
калиборит $KMg_2[B_3O_3(OH)_5]_2[B_5O_6(OH)_4] \cdot 2H_2O$;
борацит $Mg_3[B_7O_{13}]Cl$;
гидроборацит $CaMgB_6O_{11} \cdot 6H_2O$;
иньоит $Ca[B_3O_3(OH)_5] \cdot 4H_2O$;
пандермит $Ca_2[B_5O_6(OH)_7]$;
колеманит $Ca[B_2O_4(OH)_3] \cdot H_2O$;
улексит $NaCa[B_5O_6(OH)_6] \cdot 5H_2O$;
бура $Na_2[B_4O_5(OH)_4] \cdot 8H_2O$;
тинкалкониит $Na_2[B_4O_5(OH)_4] \cdot 3H_2O$;
кернаит $Na_2[B_4O_6(OH)_2] \cdot 3H_2O$;

Вследствие того, что минералы бора многочисленны и весьма разнообразны по физическим и химическим свойствам, ценность борных руд во многом зависит от минеральных форм нахождения бора в руде. По этим признакам минералы бора разделяются на две основные группы: *боросиликаты* и *бораты*. Наиболее интересны в промышленном отношении борные минералы, которые в природном состоянии растворяются в воде или разлагаются кислотами с целью получения борной кислоты и других соединений бора. Этим условиям в наибольшей степени удовлетворяют бораты, которые как щелочные соли борной кислоты более богаты бором и относительно хорошо растворимы в воде (бура, гидроборацит, улексит и др.). К труднорастворимым относятся бораты магния и железа (ашарит, котоит), боросиликаты нерастворимы в воде и слабее растворяются в кислотах (данбурит, датолит). Технологии переработки борных руд разного состава существенно различаются.

Кроме борных руд источниками бора служат минеральные воды, воды нефтяных и газовых месторождений, рапа соляных озер и подземные рассолы, из которых наиболее легко добывается борное сырье даже там, где массовые доли B_2O_3 менее одного процента. Без обогащения используются лишь богатые боратовые руды, остальные обогащаются с помощью флотации, магнитной сепарации, дезинтеграции пульпы и др. Руда боратовая Индерского месторождения должна иметь массовую долю B_2O_3 не менее 11,5 %. Концентрат датолитовый по ГОСТ 16108-80 должен иметь массовую долю B_2O_3 не менее 15,7 %. Вредными примесями при этом являются оксидное железо и карбонат кальция.

Бор и его соединения широко применяются в различных отраслях промышленности. Основные области использования – производство жаропрочных высокотвердых стекол, стекловолокна, фарфоровых эмалей, гибких пластмасс, сверхпрочных композитов (боропластики), медпрепаратов,

моющих средств, удобрений, гербицидов, высокопрочных инструментальных сплавов (боразон, эльбор, карбид бора и др.), топлива для ракетных двигателей (бораны). Широко известна роль бора при сварке и пайке металлов (сварочные флюсы, припой). Способность бора поглощать нейтроны использована при производстве защитных бетонов, пластмасс. Другие области применения бора – получение негорючих материалов, в том числе бумаги, нитрида бора кубического (BN – сверхтвердый материал) и «белого графита» (BN – твердая смазка), бора аморфного, термобора СВС-М и синтез искусственного турмалина.

Ориентировочные запасы борных руд в мире составляют около 1 млрд т в пересчете на B_2O_3 . Первое и второе место по запасам занимают, соответственно Турция (67 %) и США (18 %). Мировая добыча B_2O_3 составляет 1,1–1,2 млн т/г. Первое место по добыче боратов занимает США, второе – Турция. Стоимость борной кислоты (H_3BO_3) составляет от 540 до 1 100 дол./т.

По масштабам месторождения бора подразделяются в зависимости от запасов B_2O_3 , млн т: на уникальные – более 10, очень крупные – 1–10, крупные – 0,5–1, средние – 0,3–0,5 и мелкие – 0,1–0,3.

По условиям образования месторождения бора связаны с контактово-метасоматическими (магнезиальные и известковые скарны), вулканогенно-осадочными, осадочными и инфильтрационными процессами рудообразования.

Месторождения известковых боросодержащих скарнов наиболее важны для России. Наиболее крупное Дальнегорское месторождение (Приморский край) приурочено к контакту палеогеновых гранитоидов с известняками и песчано-сланцевыми породами верхнего триаса. Рудные тела представлены преимущественно линзовидными и пластообразными залежами экзоскарнов протяженностью по простиранию до 3 км. Состав скарнов гранат-геденбергит-волластонитовый. К промышленным минералам бора относятся датолит и данбурит. Текстуры руд полосчатые массивные, пятнистые. Средняя массовая доля B_2O_3 7–10 %.

Магнезиально-скарновые месторождения обычно приурочены к аподоломитовым магнезиальным скарнам. Протяженность рудных тел может достигать 1,5 км при мощности в десятки метров. Примером месторождений в магнезиальных скарнах может служить крупное комплексное железоборное Таежное месторождение (Южная Якутия). Месторождение располагается в замковой части синклинали, ядро которой сложено кристаллическими сланцами и гранитизированными гнейсами надрудной пачки. Формы рудных тел пласто- и линзообразные. Рудоносные скарны имеют переменный состав, зависящий от степени преобразования первичных шпинель-форстеритовых с диопсидом скарнов в амфиболовые, флогопитовые, клиногумитовые и серпентинитовые породы. Главным рудным минералом скарнов является магнетит. Людвигитовая минерализация

приурочена к наиболее крупным скарноворудным телам и образует минеральные парагенезисы с магнетитом, флогопитом, клиногумитом, кальцитом и ашаритом. Массовая доля B_2O_3 в комплексных рудах составляет 4-10 %. Суанитовые и котоитовые месторождения в магнезиальных скарнах встречаются реже.

Вулканогенно-осадочные месторождения считаются одними из крупнейших в мире по запасам бора, примером служит месторождение Крамер в США (штат Калифорния). Месторождение приурочено к глинистым озерным неогеновым и четвертичным отложениям. Наиболее мощные залежи буры, кернита и тинкалкконита приурочены к центральной части озерной котловины, формируют главную пластообразную залежь площадью 2 км^2 и мощностью до 90 м (рис. 8). Средняя массовая доля B_2O_3 составляет 25 %. Текстура руд слоистая. Прослойки буры разделены слоями монтмориллонитовой глины и туфов. В отложениях периферийной зоны озера среди борных минералов преобладают улексит и колеманит. Подстилающими боратовую залежь породами являются зеленые сланцы, залегающие на миоценовых базальтовых покровах.

Считается, что бор выносился фумаролами и сольфатарами, которые попадая в воды озера, формировали залежь буры в климатических условиях пустыни Мохаве. Современные парогидротермы используются в некоторых

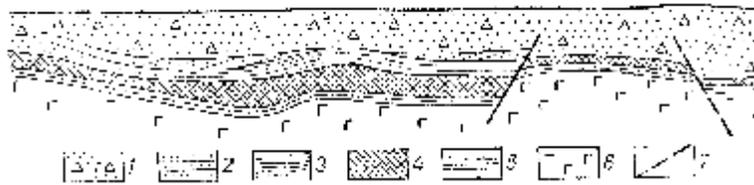


Рис. 8. Схематический разрез месторождения Крамер (по Гейлу): 1 – аллювиально-пролювиальные отложения; 2 – зеленые сланцы; 3 – синие сланцы; 4 – боратовая залежь; 5 – зеленые сланцы, почвы; 6 – базальты; 7 – сбросы

странах (Италия) для получения бора, серы и др.

Осадочные месторождения бора связаны с галогенными месторождениями. Обычно бораты связаны с отложениями калийно-магниевых солей. Рапа солеродных бассейнов обогащается бором в последние стадии кристаллизации. Бораты представлены в основном борацитом, калиборитом, преображенскитом, ашаритом. Борное оруденение неравномерное в виде желваков и вкраплений. Источником бора месторождений являлась морская вода, содержащая от 6 до 900 мг/т. Массовая доля B_2O_3 в рудах составляет 1–5 %, промышленное значение месторождений невелико. Примером месторождений подобного типа являются месторождения ФРГ, США и Канады.

Месторождения выветривания – это континентальные месторождения бора, образующиеся в результате выщелачивания и переотложения вещества куполов борно-калийных солей. Примером подобных месторождений может служить Индерское (Казахстан). Здесь боратовые руды, образующие линзовидные тела, располагаются в кепроке концентрически вокруг осевой части соляного штока. В нижнепермских соленосных породах кепрока, сложенных ангидритом, гипсом и солями, широко развито карстообразование. Состав руд характеризуется сменой сверху вниз ашаритовых руд улукситовыми и полиборатовыми (колеманит + гидроборатит + иньоит и др.). Ашаритовые руды подвержены размыву, огипсованию, карбонатизации и силификации. Текстуры руд массивные, слоистые, вкрапленные сменяются прожилковыми, колломорфными, пористыми и кавернозными. Качество борных руд в зависимости от массовой доли B_2O_3 сильно колеблется – от очень богатых до очень бедных руд.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте состав руд бора, их виды.
2. Что вы знаете об областях применения бора?
3. Какова минимальная промышленная массовая доля бора в солях и рассолах?
4. Перечислите вредные примеси в борных рудах.
5. Назовите примеры промышленных месторождений бора.

АСБЕСТЫ

Термином «асбесты» называют группу минералов, способных расщепляться на тонкие волокна. Асбесты обычно подразделяют на *серпентиновые*, волокна которых представляют совокупность плотно прилегающих друг к другу трубочек, и *амфиболовые*, волокна которых в отличие от первого не пустотелые. Свойства асбеста, определяющие его промышленную ценность – распушиваемость, эластичность, прочность на разрыв, огнеупорность, кислото- и щелочеустойчивость, сорбционная способность.

Наиболее важным в промышленном отношении, дающим большую часть коммерческого асбеста, является минерал из группы серпентина – хризотил, который обычно называют хризотил-асбестом или просто асбестом. Среди промышленно значимых волокнистых амфиболов выделяют подгруппы магниально-железистых (антофиллит-, амозит-асбест), кальциево-магниевых (актинолит-, тремолит-асбест), щелочных или «голубых» (крокидолит-, родусит-, режикит-асбест).

Хризотил-асбест $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ относится к моноклинной разновидности серпентина, волокна которого, представляя собой полые

цилиндры, образуют спутанно-волокнистые агрегаты, способные практически бесконечно делиться на волокна. Промышленностью используются многочисленные ценные свойства хризотил-асбеста. Цвет асбеста зеленовато-желтый с золотистым отливом, иногда белый или бурый, в распушенном виде всегда снежно-белый. Длина волокон достигает до 160 мм при очень высокой их механической прочности: сопротивление на разрыв асбестового волокна достигает 3 000 МПа. Минерал характеризуется высокой щелочноустойчивостью и огнестойкостью: минерал теряет эластичность и прочность при 700 °С, температура его плавления составляет 1 450–1 550 °С. Твердость хризотил-асбеста 2-3, плотность 2 500–2 600 кг/м³. Асбест обладает низкой электропроводностью и небольшой насыпной плотностью. Асбест, в связи со спецификой структуры, является сорбентом. К браковочным параметрам при оценке асбестового сырья относятся: массовая доля асбеста в руде, средняя длина волокна (восемь групп по этому параметру по ГОСТ 12871-83), массовая суммарная доля гали и пыли, массовая доля влаги и потерь при прокаливании, массовая доля растворимых примесей, удельная адсорбция йода, степень распушки, отношение объемов распушенного асбеста прокаленного к непрокаленному.

Применение асбеста в текстильном производстве зависит от длины его волокна – от 13 до 4,8 мм. Асбестовые ткани используются как электроизоляционная лента, для дисков сцепления, тормозных лент и др. Для производства асбестовой ваты, теплоизоляционного шнура, гофрированного картона, асбесторезины (паронит, клингерит и др.) браковочными показателями являются: массовая доля волокон длиной более 4,8 мм не менее 5 %, количество гали не более 3,3 % и наличие фракции менее 0,14 мм не более 65 %. Производство асбоцементных смесей для изготовления кровельных и стеновых плит, отделочных листов, труб и др., бумаги и картона требует присутствия в сырье не менее 50 % волокон длиной более 1,35 мм и менее 72 % частиц с размерами менее 0,14 мм, при этом количество гали должно быть не более 1,7 %. Производство безусадочных прокладок для автомобилей должно быть обеспечено не менее 40 % волокон асбеста длиной более 1,35 %, браковочными параметрами являются количество гали (не более 1,7 %) и присутствие фракции менее 0,14 мм (не более 76 %).

Насыпная плотность асбеста, которая не должна превышать 400 г/дм³, – основной браковочный параметр для производства пластмасс и асбестобитумных материалов (продукт осаждения рукавных фильтров), для теплостойких материалов – не более 500 г/дм³ (асбест тонкоизмельченный). Производство металлокерамики и фрикционных шайб, кроме насыпной плотности менее 450 г/дм³, ограничивает влагу (не более 3 %), потери при прокаливании (не более 15 %), количество частиц более 1,6 мм (менее 0,5 %) и частиц менее 0,56 мм – не более 3 % (асбест порошкообразный).

Для производства микронаполнителей кремнеорганических полимеров необходимы средняя длина волокон асбеста 0,010–0,020 мм при

влажности его не более 2 %, потерях при прокаливании не более 3,5 %, рН от 7 до 9,5 и присутствии фракции более 0,315 мм менее 0,5 %. Производство специальных картонов и бумаги из руд ломкого хризотил-асбеста ограничивает длину частиц асбеста более 1,35 мм (более 5 %), потери при прокаливании менее 7 %. Асбестовые порошки применяются в качестве опудривающей добавки для производства железорудных окатышей и добавок к цветным металлам для придания им дополнительной упругости и прочности. Канадскими компаниями коротковолнистый асбест в качестве добавки к сульфатно-бумажной пульпе стал применяться для производства цветной газетной бумаги и фильтров для сигарет.

Производство хризотил-асбеста достигает 98 % от общемирового производства асбеста. Мировые его запасы (без стран СНГ) составляют 250 млн т, в том числе подтвержденные – не менее 180 млн т. Наибольшие запасы и развитое производство хризотил-асбеста имеют Канада, Китай и США.

Россия обладает крупнейшей в мире сырьевой базой хризотил-асбеста – 110,8 млн т.

Антофиллит-асбест $(\text{Mg Fe})_7 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ имеет более хрупкие волокна, чем хризотил-асбест, относительно низкую прочность на разрыв (1 350–2 600 МПа), значительно хуже расщепляется на тонкие волокна. Температура плавления антофиллита 1 300 °С, однако это наиболее стойкий по отношению к кислотам асбест, сохраняющий эту стойкость даже при нагреве до 900 °С. Цвет антофиллит-асбеста белый, серый или коричневый. Блеск шелковистый, прозрачный до просвечивающего. Применяется антофиллит-асбест для производства кислотостойких пластмасс, асбокартона, кремнийорганических пресс-материалов. Это смесь волокон различной длины, в которых удерживается небольшое количество сопутствующей породы. Размер частиц более 1,35 мм должен составлять не менее 12 % общего объема асбеста, влажность сырья не должна быть более 3 %.

Мировые запасы и запасы отдельных месторождений антофиллит-асбеста, как и других амфибол-асбестов, на два порядка меньше, чем хризотил-асбеста. Наиболее крупные месторождения антофиллит-асбеста с запасами 150 тыс. т известны в Финляндии, более мелкие с запасами в десятки тысяч тонн выявлены в США, Бразилии, Кении и других странах. Наибольшее годовое производство антофиллит-асбеста достигало в Финляндии более 10 тыс. т. В странах СНГ месторождения антофиллит-асбеста разведаны в Казахстане (Мугоджарская группа). В России имеется крупная сырьевая база антофиллит-асбеста на Среднем Урале.

Родусит-асбест $\text{Na}_2(\text{Fe, Mg})_3\text{Al}_2 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH, F})_2$ – голубой асбест, в распушенном состоянии имеет небесно-голубой цвет и шелковистый блеск, высокую кислото- и щелочноустойчивость, высокую эластичность и прочность близкую к 1 700 МПа, обладает повышенными адсорбционными свойствами при очистке воздуха от радиоактивной пыли. Для производства специальных картонов волокно длиной более 12,7 мм должно составлять

более 80 %, количество гали – менее 0,1 %, а частицы размером менее 0,071 – не более 2,5 %. Родусит-асбест образует наиболее крупные запасы в Боливии (общие – 70 тыс. т, подтвержденные – 27 тыс. т). Месторождения родусит-асбеста известны в Центральном Казахстане, а в России – в Красноярском крае. Подобные проявления обнаружены в Карелии. Есть сведения о мелких месторождениях в Киргизии, а также в Австралии, Эфиопии и других странах.

Крокидолит-асбест (рибекит-асбест) $\text{Na}_2(\text{Fe}, \text{Mg})_3\text{Fe}_2[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ – синий асбест, имеет температуру плавления 1 150 °С. На воздухе обычно железо асбеста окисляется и приобретает золотисто-коричневый цвет, при температуре более 300 °С окраска меняется на красно-бурую. Обладает повышенными адсорбционными свойствами и так же, как родусит-асбест, в виде картонных фильтров используется для очистки от радиоактивной пыли. Крокидолит частично замещенный кварцем используется в виде декоративного камня и носит название «тигровый глаз». Применение крокидолита в производстве асбоцементных труб значительно улучшает качество продукции. В месторождениях ЮАР общие запасы крокидолит-асбеста составляют 2,55 млн т, подтвержденные – 1,7 млн т. Производство волокна находится на уровне 11 тыс. т/г. Более мелкие месторождения крокидолит-асбеста известны в Ботсване, Замбии, Австралии.

Асбестовидные разновидности тремолит-актинолита $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ добываются в небольших количествах, значительно уступая по качествам хризотил-асбесту.

Мировые запасы актинолит- и тремолит-асбеста сосредоточены в основном в Италии и Франции. В странах СНГ, в том числе и в России, актинолит-тремолитовый асбест практического значения не имеет.

Амозит-асбест $(\text{Fe}, \text{Mg})_7[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$ имеет пепельно-серую окраску, при выветривании буреет. Температура плавления 1 100 °С. Прочность высокая, однако резко уменьшается в процессе деформации. Высококачественное амозитовое волокно – монтанит. Одна из основных областей применения амозита – электротехническая промышленность, также он используется при изготовлении асбестовых плит, которые устанавливаются в стенах самолетов и морских судов для теплоизоляции, устранения вибрации и шума.

Амозит-асбест образует крупнейшие месторождения по сравнению с другими амфиболами. В месторождениях ЮАР его общие запасы составляют 3,0 млн т, подтвержденные – 1 млн т. Годовое производство – 26 тыс. т волокна.

Режикит-асбест $\text{Na}_3(\text{Mg}, \text{Fe})_4\text{Fe}[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$ имеет наибольшую прочность волокон с сопротивлением на разрыв 3 300–3 400 МПа, серо-голубую окраску, обладает высокой щелочнустойчивостью. Так же, как все «синие» асбесты, применяется при изготовлении красок. Месторождения режикит-асбеста мелкого масштаба выявлены в России (Средний Урал).

Рихтерит-асбест $(\text{Na}, \text{K})_2\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Al})_5 [\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH}, \text{F})_2$ применяется ограниченно. Окраска его изменчива – от фиолетовой до белой.

Добыча асбеста колеблется около 2 млн т волокна в год и постоянно сокращается, это вызвано снижением спроса на асбест в автомобильной промышленности, стройиндустрии, производстве пластмасс, напольных покрытий и др. Кампания за прекращение использования асбестов в связи с их «канцерогенностью» приводит к созданию его заменителей. Первое место по добыче асбеста занимает Канада, второе – ЮАР. В связи с этим широкое распространение получила канадская терминология по отношению к группам длины волокна асбеста, мм: крюд № 1 – 18 и более; крюд № 2 – 9–18; № 3 (текстильное) – 6–9; № 4 (кровельное) – 4-5; № 5 (бумажное) – 2–4; № 6 (штукатурное) – 1-2 и № 7 – менее 1 мм. Почти весь амозит и крокидолит добываются в ЮАР. Среди экспортеров асбеста ведущее место принадлежит Канаде и ЮАР, среди импортеров – США. Цена 1 т хризотилового волокна – около 580 дол.

По масштабам месторождения асбеста подразделяются, млн т волокна: на крупные (более 5), средние (0,5–5) и мелкие (менее 0,5); антофиллит-асбеста, тыс. т волокна: на крупные (более 50), средние (5–50) и мелкие (менее 5). Наиболее распространенные месторождения хризотил-асбеста относятся к гидротермальному типу. Выделяются два геолого-промышленных типа: 1) месторождения в массивах ультраосновных пород (Баженовское, Актотрак); 2) месторождения в магнезиальных карбонатных толщах (Аспагаш).

Месторождения в массивах ультраосновных пород играют ведущую роль в добыче хризотил-асбеста. Группа этих месторождений разделяется на ряд типов, однако ведущим является так называемый *баженовский тип*. Баженовское месторождение на Урале (Свердловская область, г. Асбест) связано с массивом гипербазитов длиной около 30 км и шириной до 3,5 км, вытянутым в субмеридиональном направлении. В составе гипербазитов преобладают перидотиты, в меньшей мере развиты пироксениты и дуниты. Массив разбит рядом разломов: меридиональных, широтных и диагональных. Серпентинизация гипербазитов тяготеет к приразломным зонам. На месторождении выделен ряд промышленных залежей хризотил-асбеста. Горизонтальная мощность залежей – десятки метров, длина по простиранию – до 100 м. Простирание залежей субмеридиональное, падение от вертикального до пологого (30–40). Форма залежей сложная, эллипсоидная, штоко- и жилообразная.

В настоящее время на месторождении выделяют три типа руд: 1) с поперечно-волокнистым асбестом; 2) с продольно-волокнистым асбестом; 3) с волокном массы. В рудах первой группы выявлены: простые отороченные жилы хризотил-асбеста и отороченные полосами массивного серпентинита среди слабо серпентинизированных перидотитов. Мощность жил составляет от 6 до 60 мм, иногда до 160 мм с массовой долей волокна до 4 %. Эти жилы

характеризуются наиболее качественным, чистым поперечно-волокнистым, длиноволокнистым асбестом – с длиной волокон до 60 мм, редко до 160 мм. Сложные отороченные жилы представлены сериями субпараллельных жилок, мощность которых достигает 35 мм, а количество до 50. Промежутки между жилками выполнены массивными серпентинитами. Выход асбестового волокна от 2 до 12 %. Эти жилы встречаются совместно с простыми отороченными жилами, но характеризуются меньшей длиной асбестового волокна.

В рудах первой группы выделяются также так называемая крупная сетка и мелкая сетка жил асбеста. Петли крупной сетки (от 0,5 до 1 м) содержат прожилки асбеста до 20 мм. Массовая доля асбестового волокна в рудах от 3 до 10 %. Ультрамафиты в зоне крупной сетки в разной степени серпентинизированы. Ячейки мелкой сетки от 0,1 до 0,5 м. Руды содержат волокна средней длины (от 4 до 10 мм), выход волокна от 8 до 25 %. Ультраосновные породы сетки нацело серпентинизированы. Руды в сложных жилах состоят из крупной сети разноориентированных жилок асбеста в мощных зонах серпентинита. Мощность жилок до 20 мм. Руды так называемого мелкопрожила представлены сериями коротких параллельных тонких прожилков асбеста мощностью от 1 до 6 мм, пронизывающих массивный серпентинит. Массовая доля волокна в руде колеблется от 2 до 30 %, чаще 5–10 %. Волокно имеет размеры обычно 1–3 мм. Участки таких руд протягиваются на десятки метров по простиранию. Тончайшие прожилки асбеста (от 0,5 до 1 мм) в массивных серпентинитах носят название «волосовик» или «просечка». Непромышленные зоны просечек и единичных редких жил мощностью до 3-4 мм представляют обычно внешние зоны асбестовых залежей.

Запасы месторождений асбеста, связанных с ультрамафитами, составляют от нескольких тысяч до десятков миллионов тонн (Баженовское (Урал); Актоврак (Тыва); Молодежное (Бурятия), Джетыгаринское (Казахстан); Джеффри, Блек-Лейк и Кассиар (Канада); Шабани и Машаба (Зимбабве)). Месторождения такого типа дают около 95 % товарного асбеста.

Месторождение Молодежное связано с Молодежным гипербазитовым массивом северного склона Южно-Муйского хребта (Бурятия). Массив залегает в келянской толще среднепротерозойских метаморфических образований. Промышленная хризотил-асбестовая минерализация локализована в центральной части массива и представлена эллипсовидной залежью баженовского подтипа (рис. 9). Длина залежи около 700 м, ширина 300–460 м, глубина превышает 600 м. Общие разведанные запасы – 15 млн т при среднем содержании в рудах 6,7 %. Волокна текстильных сортов составляют 15 % запасов.

Кроме Баженовского, среди месторождений, связанных с ультрамафитами, выделяют *ешкеульмесский тип руд* – месторождения Ешкеульмесское (Казахстан) и Карачаевское (Кавказ). Месторождения этого

типа характеризуются меньшими размерами, развитием в рудах продольноволокнистого асбеста, немалита (тонковолокнистого брусита $Mg(OH)_3$), значительно ухудшающего качество руд.

Месторождения *лабинского типа* имеют небольшие размеры и сложены параллельными жилами асбеста, похожими на сложные отороченные жилы Баженовского месторождения и прослеживающимися до сотен метров при мощности, 0,1–2 м. Асбест высококачественный и в основном поперечноволокнистый. Массовая доля волокна не превышает 2,5 %. Длина волокна до 60 мм. Вмещающие породы – жиллообразные полосы серпентинитов в ультрамафитовых массивах.

Примером месторождений антофиллит-асбеста, связанных с ультрамафитами, является Сысертское (Свердловская область, 20 км к западу от г. Сысерть). Антофиллит-асбест приурочен к телам метаморфизованных гипербазитов, имеющих длину до сотен метров при мощности от нескольких до 65 м. Гидротермальный метаморфизм гипербазитов связывают с дайками гранитоидов, которые широко развиты на площади месторождения. Форма залежей антофиллит-асбеста линзо- и гнездообразная, сечения залежей в плане до 22x190 м. Залежи сложены пучковатыми и звездчато-пучковатыми рудами. Массовая доля волокна более 0,5 мм от 2,5 до 6 %. Вмещающие оливин-пироксеновые породы в разной степени серпентинизированы, карбонатизированы, актинолитизированы и оталькованы, вплоть до образования тальковых сланцев.

Месторождения в магнезиальных карбонатных породах приурочены к метаморфизованным доломитам. Типичным примером месторождений подобного типа является Аспагашское (Красноярский край, в 170 км к юго-западу от г. Красноярска, вблизи восточного берега Красноярского моря). Доломиты кембрия здесь рассечены гранитами и спессартитовыми дайками.

Среди доломитов развиты зоны серпентинитов, в которых наблюдаются субпараллельные жилки поперечноволокнистого хризотил-асбеста. Мощность жилок достигает 75 мм, обычно – до 10 мм. Асбест высокого качества, выход волокна до 1,5 %. Запасы волокна составляют несколько десятков тысяч тонн. Генезис месторождения связывают с воздействием на доломиты гранодиоритового массива, расположенного в 1 км от месторождения. Подобные месторождения разрабатываются в США и КНР.

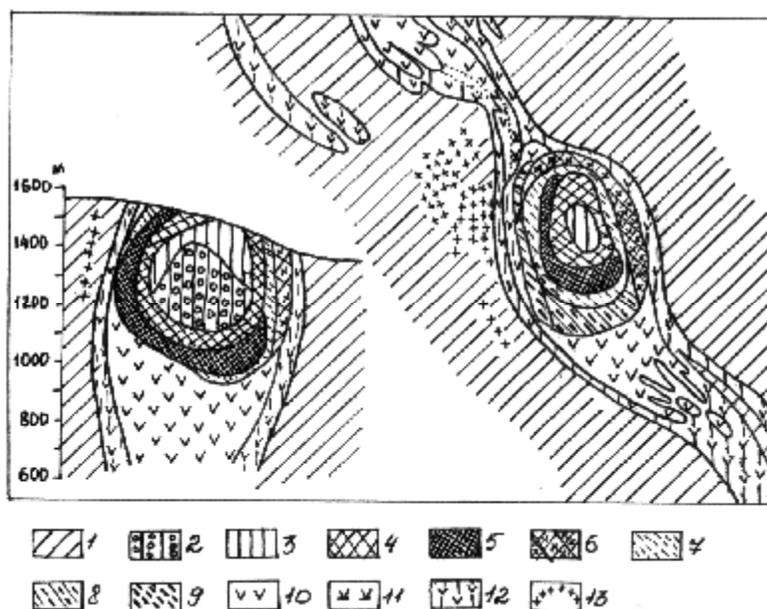


Рис. 9. Геологическая карта и разрез Молодежного гипербазитового массива (по К.Г. Башта): 1 – келянская толща (сланцы хлорит-серицит-кварцевые, эпидот-альбит-хлоритовые, кварц-карбонатные, реже рассланцеванные эффузивы); 2–4 – серпентинизированные гарцбургиты и серпентиниты (2 – с асбестоносностью типа бедных отороченных жил (ядро), 3 – с асбестоносностью типа простых отороченных жил, 4 – с асбестоносностью типа крупной сетки); 5 – серпентиниты с асбестоносностью типа крупной сетки; 6 – серпентиниты периферийной зоны с асбестоносностью типа мелкой сетки; 7 – серпентиниты с асбестоносностью типа ориентированных просечек; 8 – серпентиниты смешанной зоны с асбестоносностью типа ориентированных и сетчатых просечек; 9 – серпентиниты с асбестоносностью типа сетчатых просечек; 10 – голубовато-серые груборассланцеванные серпентиниты; 11 – серовато-зеленые груборассланцеванные карбонатизированные серпентиниты; 12 – темно-зеленые груборассланцеванные карбонатизированные и серпофитизированные серпентиниты; 13 – дайки гранит-порфиров Качойского интрузивного комплекса

Классическим примером *месторождений родусит-асбеста* стало Аскизское (Хакасия). Месторождение приурочено к Аскизской антиклинали, одному из важнейших структурных элементов Минусинской межгорной впадины. Родусит-асбест и родусит неволокнистый в виде жилок и вкрапленности залегают в пестроцветной толще ритмичного строения, сложенной мергелями, алевролитами, песчаниками и аргиллитами аскизской свиты девонского возраста. В результате диагенеза и метаморфизма породы свиты фельдшпатизированы и доломитизированы.

В зависимости от морфологических особенностей выделяются прожилково-жильный и вкрапленный типы родуситовой минерализации. *Прожилково-жильный тип*, в свою очередь, подразделяется на послойные и секущие жилы и прожилки. Мощность отдельных жил и прожилков колеблется от миллиметров до 0,3 м, протяженность – до 25 м. Контакты их с вмещающими породами четкие. Послойные жилы и прожилки чаще всего

совпадают с контактами глинисто-мергелистых пород. *Вкрапленный тип* включает в себя ромбоэдрические, конкреционные и неправильной формы агрегаты. Они приурочены к гофрированным и брекчированным породам. Неравномерная родуситовая минерализация характерна для выделенных рудных тел. Наиболее крупным является рудное тело III, имеющее 515 м по простиранию, 220 м по падению при мощности до 12,2 м. Средняя массовая доля родусит-асбеста 1 200 г/т. Форма тела близкая к пластовой, обнаруживается некоторое увеличение мощностей и содержаний с глубиной при весьма неравномерном распределении полезного компонента.

В жилах и прожилках волокнистый родусит-асбест характеризуется спутанно-волокнистым строением. Иногда отдельные агрегаты волокон взаимно переплетаются, а промежутки между ними выполнены рыхлым микроволнистым родуситом, реже карбонатом. В качестве других минералов-примесей в руде присутствуют кварц, опал, хлорит, эпидот, биотит. Длина волокон асбеста колеблется от долей миллиметра до 10–15 см. Микроволокнистый родусит-асбест редко образует жилы и прожилки.

Землистый картоновидный родусит представлен разноориентированными микроволокнами с незначительной примесью карбонатов или глинисто-карбонатного материала. Данная разновидность родусита обладает повышенной рыхлостью и, при отсутствии карбонатного или глинисто-карбонатного материала, легко разминается пальцами. Цвет картоновидного родусита от темно-голубого до темно-синего. Длина волокон его обычно не превышает 0,1 мм. Жилки асбеста приурочены к трещинам кливажа, мелким разрывам, зонам дробления.

Качество родусит-асбеста на месторождении непостоянное: эластичные разности сменяются ломкими. Шестоватый и массивный неволокнистый родусит обычно приурочены к породам, содержащим повышенное количество кремнистого материала, имеют голубовато-синий цвет, перламутровый блеск; массивный асбест пригоден для использования в качестве поделочного камня. Среди голубовато-серых мергелей и алевролитов такие асбесты образуют послойные и секущие жилы и прожилки, мощность их колеблется от нескольких миллиметров до 0,3 м, длина по простиранию от долей метра до 30 м. Генезис месторождения дискуссионный – от телегидротермального до метаморфогенного. Первооткрыватель месторождения П.П. Пискорский относит его к осадочно-метаморфическим, И.Ф. Романович – к метаморфическим интеграционным.

Месторождения амозит-асбеста и крокидолит-асбеста известны в Капской провинции (ЮАР). Сближенные параллельные прожилки асбеста в железистых кварцитах образуют зоны и серии, называемые «рифами». Мощность рифов составляет 1–4 м, мощность отдельных прожилков асбеста может достигать 13 см, число прожилков в рифе обычно 5–10. Асбест в прожилках поперечноволоконный, реже продольноволокнистый серовато-синего и синего цвета. С крокидолит-асбестом ассоциируют магнетит, кварц,

кальцит, нонтронит. Глубина зоны выветривания на месторождениях составляет десятки метров. Выветрелые разности крокидолита за счет лучшей распушки являются наиболее ценным сырьем. Генезис месторождения дискусионен. Источником вещества считают подстилающие доломиты, захороненные морские воды или гидротермы.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности асбестов.
2. Охарактеризуйте области применения асбестов.
3. Какова минимальная длина волокна текстильного асбеста?
4. Перечислите вредные примеси в асбестовом сырье.
5. Назовите примеры промышленных месторождений асбестов.

ВОЛЛАСТОНИТ

Волластонит (досчатый шпат) CaSiO_3 ($\beta\text{-CaSiO}_3$) – цепочечный силикат, относимый к пироксеноидам в связи с тем, что характер расположения цепочек SiO_3 заметно отличается от структуры пироксенов. Бесконечные перекрученные цепочки SiO_3 повторяются с интервалом через три тетраэдра и называются тройными цепочками. Большой размер иона кальция мешает ему войти в пироксеновую двухцепочечную структуру в виде отдельного катиона, зато он хорошо входит в трехцепочечную структуру. Сингония триклинная. Параметры элементарной ячейки и число формульных единиц: $a = 7,94$; $b = 7,32$; $c = 7,07$; $z = 6$. Цепочки $(\text{SiO}_3)^{-2}n \infty$, скрученные особым образом, определяют нитевидную макроструктуру волластонита, за которую он и получил название «минеральная шерсть».

В виде кристаллов встречается редко, образуя игольчатые, шестоватые или таблитчатые, вытянутые по оси b , кристаллы. Обычно волластонит присутствует в виде плотных листоватых, радиально-лучистых, скорлуповатых, зернистых или волокнистых масс. Спайность по $\{001\}$ совершенная. Твердость 5. Объемная плотность 2,9. Цвет белый, сероватый, кремовый до бурого при наличии примесей красящих оксидов. Блеск стеклянный, шелковистый в волокнистых разностях. Минерал просвечивает, иногда флюоресцирует в зависимости от присутствия марганца в твердом растворе, разлагается в концентрированной HCl с выделением кремнезема, обладает высокими диэлектрическими свойствами. Волластонит имеет пять политипов за счет разного чередования слоев в структуре. Наиболее часто встречаются моноклинный политип (*параволластонит*, или волластонит – 2M – $a = 15,33$, $b = 7,28$, $c = 7,07$) и триклинный, или псевдоромбический цикловолластонит (*псевдоволластонит*, α – CaSiO_3). Пространственные группы этих политипов, соответственно $P 2_1/a$ и $P 1$.

Чистый природный волластонит используется для изготовления с помощью плавки «горной, или минеральной шерсти» со значительной длиной волокна, имеющей большую прочность, его температура плавления 1 545 °С, температура спекания – 991–1 196 °С. Минерал обладает высокими звуко- и теплоизоляционными свойствами. В мировой практике волластонит применяют в производстве огнеупоров (кирпич), теплоизоляции (пеноволластонит), керамики, облицовочных плит, столовой посуды, электроизоляторов, минеральной ваты, пигментов, бумаги, специальных фильтров при обмазке электродов, как компонент для производства специальных цементов, пластмасс, абразивов, пестицидов, в изготовлении отливок, флюсов, каучука и др. Основной областью применения волластонита является изготовление керамики. Волластонит понижает температуру обжига керамических изделий и увеличивает их прочность, придавая изделиям термостойкость, вязкость и белизну. Изделия из такой керамики можно сверлить и пилить. В отличие от асбеста волластонит безвреден для здоровья человека в составе строительных деталей и материалов, что делает его применение экологически более предпочтительным. По качеству волластонитового сырья бедными считаются руды с массовой долей волластонита 30–40 %, средними 40–60 %, богатыми – более 60 %.

Для строительной керамики применяются концентраты с массовой долей волластонита не менее 90 % и не более 0,5 % Fe_2O_3 . В производстве фарфора используются концентраты с массовой долей, %, не более: SiO_2 – 54, Al_2O_3 – 5, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – 1, MgO – 0,3; CaO – не менее 4 %. Для изготовления электро- и радиокерамических деталей массовая доля волластонита не должна быть менее 83 %, Fe_2O_3 – не более 1 %. В лакокрасочной промышленности важны водорастворимость (не более 0,5 %), белизна – не менее 75 %, степень помола (остаток на сите 0,008 не более 40 %, рН водной вытяжки от 7 до 9). Волластонитовые глазури имеют белый цвет и сильный блеск. Единых требований научно-технической документации

к волластонитовому сырью не существует. Приведенные требования являются ведомственными, временными и не охватывают всех требований потребителей. Отходы производства используются для раскисления почв и др. В США – стране, занимающей первое место по запасам, добыче и использованию волластонитового сырья, структура его применения выглядит следующим образом, %: производство керамики – более 50; лако-красочной продукции – около 30; глазурей и эмалей – около 15; остальные виды производства – около 5.

Обычно волластонитовое сырье подвергается обогащению для достижения нужного качества концентратов – массовой доли волластонита более 60 %. Природные типы волластонитового сырья представляют собой минеральные разновидности, среди которых преобладают кальцит-волластонитовые, пироксен-волластонитовые, гранат-волластонитовые и различные их сочетания. По содержанию волластонита, %, сырье

подразделяют на сорта: богатые – не менее 60, средние – 60–40, бедные – 40–30.

Синтетический волластонит получают во всех высокоразвитых странах мира. Высокоперспективна разрабатываемая технология получения волластонита из отходов производства, в частности из нефелинового шлама алюминиевых заводов, пыли заводов по производству кремния и др.

Мировые запасы волластонита составляют первые миллионы тонн. Наибольшие запасы волластонита имеют США, Индия, Югославия, Мексика и Финляндия. Мировая ежегодная добыча волластонита составляет первые сотни тысяч тонн. Главный производитель и потребитель волластонита – США. Цена природного волластонита в зависимости от его качества колеблется от 95 до 300 дол./т.

По масштабам месторождения волластонита подразделяются в зависимости от запасов, млн т: на крупные – более 5, средние – 2,5–5, мелкие – менее 2,5.

По генезису различные исследователи выделяют регионально-метаморфические и контактово-метасоматические месторождения. Геолого-промышленные типы месторождений подразделяют на кальцифировые и скарновые.

По среднему содержанию и качеству волластонита более ценное сырье характерно для месторождений регионально-метаморфического генезиса.

Месторождения регионально-метаморфического типа тяготеют к гранулитам и залегают среди пород известково-силикатного состава. Месторождения представлены залежами линзовидной и пластообразной формы протяженностью до 1,5 км и мощностью до десятков метров. Массовая доля волластонита в рудах – более 40 %. Места локализации рудных тел – своды, участки замыкания и ундуляции складок. Рудой являются волластонитовые кальцифиры и мраморы. Ведущие парагенезисы представлены волластонит-диопсид-скаполитовыми, волластонит-гранат-кварцевыми, волластонит-диопсид-скаполит-сфеновыми ассоциациями минералов.

Типичным примером является месторождение Слюдянка (Иркутская область), где в пределах Утиликского синклинория выделяется зона интенсивной дисгармонической складчатости. К ее границе приурочена полоса проявлений волластонитовой минерализации протяженностью более 8 км. На месторождении волластонитовые руды представлены волластонитовыми мраморами и существенно волластонитовыми породами, залегающими согласно с вмещающими биотитовыми и амфибол-пироксеновыми гнейсами. В состав руд входят волластонит, диопсид, кварц, кальцит и др. Массовая доля волластонита до 80 %. Другими примерами

месторождений данного геолого-промышленного типа являются Уилсборо (США), Эмельджакское (Якутия).

Контактово-метасоматические месторождения располагаются в экзоконтактовых ореолах гранитоидов, габброидов и других изверженных пород с известняками (мраморами). Волластонитовые скарноиды представлены волластонит-анортит-кальцитовыми, волластонит-гранат-диопсидовыми, волластонит-диопсид-кальцитовыми, волластонит-анортит-тремолитовыми минеральными парагенезисами. Типичными примерами являются Койташское и месторождение Западный Джангалык в Средней Азии. Тела волластонитовых руд Койташского месторождения приурочены к экзоконтакту Койташского гранитоидного массива. Они имеют субпластовые и линзовидные формы за счет локализации руд во внутри- и межформационных полостях отслоения. Мощность залежи до 8 м, протяженность – более 100 м. Массовая доля волластонита в рудах 38 %. Другими примерами месторождений подобного типа являются Лянгар, Саяк. По запасам месторождение относится к средним.

Контактово-метасоматические месторождения в отдельных случаях содержат волластонитовые руды очень высокого качества. Типичным примером подобных месторождений является месторождение Западный Джангалык, расположенное в пределах полиметаллического месторождения с таким же названием в Северном Таджикистане. Гранат-пироксе-новые, волластонитовые и хлоритовые скарны приурочены к контакту сиенито-диоритов и известняков палеозоя. Рудное тело имеет столбообразную форму. Волластонитовые скарны белого цвета имеют шестоватое и радиально-лучистое строение. Массовая доля волластонита в рудах составляет 80 %. Примерами месторождений подобного типа также являются Владимировское, Вишневокское и др.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте области применения волластонита.
2. Какие требования предъявляются к качеству концентратов волластонита?
3. Укажите минимальную массовую долю волластонита в бедных рудах.
4. Назовите геолого-промышленный тип месторождений наиболее чистого волластонита.
5. Приведите примеры промышленных месторождений волластонита.

СЛЮДЫ

Слюды образуют одну из изоморфных групп слоистых силикатов. Кремнекислородные тетраэдры, связанные между собой алюминием в

мусковите или магнием в флогопите, с гидроксильными группами образуют отрицательно заряженные пакеты, так как в некоторых тетраэдрах кремний замещается алюминием. Отрицательный заряд пакета компенсируется натрием или калием – ионами, связывающими пакеты вместе. Упрощенные формулы слюд:

мусковит $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$;

флогопит $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$;

биотит $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$;

глауконит $(\text{K},\text{Na})(\text{Fe},\text{Mg},\text{Al})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$;

вермикулит $(\text{Mg},\text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Из приведенных формул очевидно, что флогопит при увеличении массовой доли железа переходит в биотит, а присутствие натрия в составе биотита приводит к преобразованию его в глауконит. Близкими по составу к мусковиту являются *жильбертит* (мелкочешуйчатый зеленый мусковит) и *серицит* (тонкочешуйчатая водная разновидность мусковита). При преобладании натрия над калием в составе мусковита минерал называют *парагонитом*. Алюминий может частично замещаться Mg и Fe^{2+} , в меньшей мере Cr^{3+} , образуя разновидность ярко-зеленого цвета – *фуксит*. В случае замещения ванадием – *роскаэлит*. Мусковит с высокой массовой долей кремния называют *фенгитом*. Железистая разновидность флогопита – *тетраферрифлогопит*. В связи с особенностями структуры слюды обладают весьма совершенной базальной спайностью и способностью расщепляться на тонкие и упругие пластинки.

Наибольшее практическое значение имеет мусковит и флогопит. Эти слюды обладают высоким удельным электрическим сопротивлением – до 10^{15} Ом·см, небольшими диэлектрическими потерями, термической и химической стойкостью, высокой механической прочностью. При оценке качества этих слюд учитываются размеры пластин слюды (максимальная длина, ширина, толщина и максимальный диаметр круга, вписываемого в полезную площадь, в миллиметрах; максимальная площадь вписываемого в пластину прямоугольника в квадратных сантиметрах). Большое значение имеет характер поверхности (ровная, слабоволнистая, волнистая, волнистая без горбин, волнистая без складок и морщинистости, слабоволнистая без горбин, морщинистости и зажимистости, слабоволнистая без горбин и складок – слабая рябь). Существенную роль в оценке качества играют также следующие показатели: электрическая прочность, кВ /мм; среднее пробивное напряжение, кВ; тангенс угла диэлектрических потерь при частотах 10^3 и 10^6 Гц; неравномерность по толщине, включая недоснятые, мм; площади пластинок, занятые газовыми и минеральными включениями, %; удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$; массовые доли влаги и загрязняющих примесей, %; масса объемная (насыпная), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значительное число показателей качества осложняет оценку сырья. При добыче и первичной обработке слюдяного сырья различают забойный и

промышленный сырец. *Забойным сырцом* называют кристаллы мусковита и флогопита с площадью поверхности не менее 4 см^2 , отделенные от пустой породы. Массовая доля забойного сырца измеряется в килограммах на кубический метр руды. *Промышленным сырцом* называют забойный сырец после его обработки и сортировки. Размеры кристаллов промышленного сырца не должны быть меньше 3 см^2 . Мелочь, получаемая в процессе производства промышленного сырца, называют *скрапом*. Рудничный скрап, очищенный от примеси пород, применяется для получения дробленой и молотой слюды с дальнейшим использованием его в производстве рубероида и автомобильных шин. Массовая доля загрязняющих примесей в забойном сырце не должна быть более 4 %, в скрапе – не более 5 %. Влажность забойного сырца и скрапа не должна превышать 6 %. Обогащенным сырцом называют кристаллы слюды произвольного контура неограниченной толщины, очищенные от поверхностных загрязнений и включений посторонних минералов, выходящих за пределы поверхностей кристаллов. Для Алданских месторождений флогопита это кристаллы площадью не менее 10 см^2 . В зависимости от дальнейшей технологической обработки слюды классифицируются следующим образом (ГОСТ 10698 – 80):

подборы – пластинки произвольной формы толщиной 100–400 мкм;

обрезная – прямоугольные пластинки толщиной 5–650 мкм;

щипаная – пластинки произвольной формы толщиной 5–45 мкм;

фасонные изделия – штампованные детали различной конфигурации толщиной 50–550 мкм;

дробленая – чешуйки в поперечнике 160–20 000 мкм;

молотая – порошок с размером частиц до 630 мкм.

Для применения в приборостроении и электронной промышленности (оптические, вакуумные и радиотехнические устройства) пластинки мусковита должны иметь размеры не менее $14 \times 7 \times 0,035 \text{ мм}$ и ровную слабоволнистую поверхность. Для электрической изоляции щеткодержателей электрических машин высокого напряжения применяется обрезная слюда с размерами $100 \times 50 \times 0,02 \text{ мм}$ с ровной слабоволнистой поверхностью, с неравномерностью по толщине, включая недоснятые, менее 0,02 мм и электрической прочностью не менее 50 кВ/мм. Молотая порошкообразная слюда для изготовления электроизоляционных покрытий и заливочных компаундов должна иметь удельную поверхность не менее $2 \text{ м}^2/\text{г}$ и влажность не более 0,5 %.

Молотый мусковит, применяемый для покрытия электродов дуговой сварки, должен иметь размеры не более 2 000 мкм при влажности не более 3,5 % и массовой доле загрязняющих примесей не более 5 %. Для водомерных колонок котлов высокого давления применяется мусковит в виде пластин прямоугольной формы с размерами не более $220 \times 35 \times 0,25 \text{ мм}$ с ровной слабоволнистой поверхностью, с неравномерностью по толщине не более 0,025 мм и площадью газовых включений не более 25 %. Для производства

слюдянитовой бумаги используются пластинки мусковита заданного размера и толщины. Молотый мусковит, применяемый для производства обоев, должен иметь максимальный размер частиц 160 мкм, массовую долю влаги не более 8 % и массовую долю посторонних примесей не более 0,5 %.

Обрезные мусковит и флогопит применяются также для термоизоляции тепловых элементов промышленных печей и бытовых приборов и для смотровых окон в них. Номинальные размеры пластин по согласованию, недосняtie не должно быть более 0,02 мм. Щипаные мусковит и флогопит, используемые для производства электроизоляционных материалов, разбраковывают по нагревостойкости, которая не должна быть менее 150 °С. Для производства резины применяют молотые мусковит и флогопит с размерами частиц менее 160 мкм и массой загрязняющих примесей менее 0,5 %.

В качестве добавок к краске для шпатлевки применяют слюды с установленной тониной помола. Флогопитовая слюда Ковдорского и Алданских месторождений широко применяется для производства слюдопластовой бумаги для ленточных, листовых и многослойных электроизоляционных материалов. Ограничивается массовая доля кристаллов со сплошными зажимами и объемными включениями кальцита (менее 3 %). Для производства пластмасс применяется флогопит и мусковит тонкодисперсные, получаемые путем мокрого помола на бегунах, допускается их использование для получения перламутровых пигментов различного назначения. Максимальный размер частиц не должен превышать 160 мкм. В металлургической промышленности молотый флогопит применяется для приготовления шлакообразующей смеси, используемой при разливке стали. Размер пластинок слюды при этом должен быть менее 160 мкм, ограничиваются массовые доли кремнезема, глинозема, оксидов железа и магния, фосфорного ангидрида. Значительное количество мусковита и флогопита используется как конденсаторная слюда. По ГОСТу длина пластин должна быть от 7 до 60 мм, ширина – от 4 до 50 мм при толщине менее 0,2 мм, поверхность ровная слабоволнистая.

Глаукониты – аутигенные диоктаэдрические слюды морских осадков, очень редко образующие кристаллы и встречающиеся обычно в виде мелких зерен – зеленые глауконитовые пески. Считается, что глауконит образуется из обломочного биотита и непосредственно из алюмосиликатного геля. Глауконит обладает высокой обменной емкостью и способностью к быстрой регенерации, в связи с чем его используют в качестве пермутита. Глауконитовые пески прибрежной равнины в Нью-Джерси, например, используются в качестве удобрений. Широко известно применение глауконита в качестве природного зеленого пигмента при производстве красок.

Продуктом изменения слюд в корках выветривания в виде псевдоморфоз по биотиту и флогопиту является *вермикулит*

$(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, относящийся к группе гидрослюд. У вермикулита также много общих свойств с минералами глины (монтмориллонитом). Большая часть щелочных металлов удалена, а вместо них между алюмо-кремниево-кислородными пакетами располагаются железо, магний и вода. Расстояние между алюмокремневыми пакетами по оси С увеличивается почти в полтора раза, что обуславливает ионообменные свойства вермикулита. Отличительным свойством вермикулита является его способность к сильному расширению при нагревании до 250–300 °С (до 30 раз по сравнению с первоначальным объемом). Массовая доля вермикулита в концентрате (грубом) должна быть не менее 30 %. Обычно массовая доля вермикулита в концентратах составляет от 60 до 90 %. Объемная масса вспученного вермикулитового концентрата колеблется от 100 до 400 кг/м³.

Вермикулит вспученный применяется в качестве теплоизоляционного материала при засыпке для температур от 260 до 1100 °С, а также для температур до 900 °С при изоляции вибрирующих поверхностей, как заполнитель легких бетонов и штукатурных растворов, огнезащитных, теплоизоляционных, звукопоглощающих. Засыпка необходима для изоляции паровых котлов, обкладки печей, стен инкубаторов, рефрижераторов, глушителей двигателей внутреннего сгорания и т.д. Объемная насыпная масса вспученного вермикулита для этих целей не должна быть более 300 кг/м³. Кроме того вермикулит используется как наполнитель в асбофрикционных изделиях, в линолеуме, черепице, при изготовлении алюминиевых, бронзовых и золотых типографских красок, чернил, набивке обоев. В садоводстве и огородничестве используется обожженный вермикулит с зернами менее 20 мм применяется в качестве консерванта при хранении плодоовощной продукции; субстрата, необходимого для выращивания огурцов, томатов и декоративных растений; мульчи; ионообменника, удерживающего жидкие удобрения и обогащающего почву фосфорным ангидридом, калием, кальцием и магнием; подстилочного материала для содержания домашней птицы.

Запасы мусковита, очевидно, составляют первые сотни миллионов тонн. Наибольшие разведанные запасы у Индии, России, Бразилии. Их суммарный потенциал около 10 млн т.

Наибольшими разведанными запасами флогопита обладают Канада, Малагасийская Республика, КНДР. Разведанные запасы в каждой из этих стран не превышают 1,0–1,5 млн т забойного сырца. Россия располагает суммарными запасами 8,4 млн т забойного сырца, в том числе, %: 92,3 – в Ковдорском месторождении (Кольский п-ов), 5 – в Алданском районе, 2,7 – в месторождениях Слюдянского района (Прибайкалье) и Гулинском месторождении (п-ов Таймыр).

Мировые запасы вермикулита вероятно составляют порядка 200 млн т. В США находятся наиболее крупные месторождения (Либби, Лоренс, Спартанберг), возможно насчитывающие около 100 млн т вермикулита.

Крупное эксплуатируемое месторождение Лулекоп расположено в ЮАР (район Палабора) с запасами 10 млн т. Суммарные запасы вермикулита России составляют около 47 млн т, из которых 43 млн т сосредоточено в Ковдорском месторождении, 3,4 млн т находится в Потанинском месторождении (Челябинская область) и 0,6 млн т – в Инаглинском месторождении (Республика Саха – Якутия).

Цены на слюду зависят от размера листов: листовая – около 3 900 дол./т, молотая – 44–220 дол./т.

Слюдяные месторождения подразделяют в зависимости от запасов: листового мусковита, тыс. т – на мелкие (менее 5), средние (5–25), крупные (25–50), уникальные (более 50); флогопита, млн т – на мелкие (до 0,2), средние (0,2–1,0), крупные (более 1); вермикулита, млн т – на мелкие (до 1), средние (1–10), крупные (более 10).

Генетические типы месторождений слюд весьма разнообразны: магматические месторождения мелкочешуйчатого мусковита в аляскитовых гранитах, пегматитовые месторождения листового мусковита, карбонатитовые месторождения флогопита, метаморфические месторождения флогопита, месторождения кор выветривания вермикулита, осадочные месторождения глауконита. В промышленности используются все виды слюд, однако, учитывая ценность сырья, к геолого-промышленным типам месторождений большинство исследователей относят пегматитовые месторождения мусковита, карбонатитовые месторождения флогопита, метаморфические месторождения флогопита и месторождения выветривания вермикулита. Наиболее ценное сырье – листовый мусковит пегматитовых месторождений.

Основными особенностями *пегматитовых месторождений мусковита* является кварц-мусковит-полевошпатовый состав и гигантозернистые структуры руд, сложная морфология рудных тел, приуроченность их к докембрийским высокометаморфизованным породам (гнейсам, кристаллическим сланцам, амфиболитам), группировка рудных тел и месторождений в так называемые пегматитовые поля протяженностью десятки километров.

Типичным примером месторождений мусковитовых пегматитов являются Мамско-Чуйские месторождения (Иркутская область). Группа Мамско-Чуйских месторождений сосредоточена в полосе шириной 20 км и длиной около 150 км. Месторождения приурочены к центральным частям мигматитовых куполов, вытянутых в северо-восточном направлении. Пегматитовые тела имеют размеры от сотен метров до нескольких километров и представляют собой мощные седловидные залежи и жилы. Серии пегматитовых тел и жил слагают отдельные промышленные месторождения: Чуйское, Луговское, Колотовское и др. Согласно с мигматитами пегматитовые тела имеют параллельно-полосчатое строение, плитообразные и линзовидные формы – зональное строение. Секущие

пегматитовые жилы часто сложного строения, с многочисленными апофизами, иногда образуют трубообразные тела. Минеральный состав пегматитов представлен плагиоклазами, микроклином и кварцем. Мусковит локализуется в блоковых разновидностях пегматитов и размеры его кристаллов (пластин) достигают 1–1,5 м в диаметре. Массовая доля мусковита в таких участках часто 100–300 кг/м³. Парагенезис кварца и мусковита обычно развивается по трещинам в пегматитовых телах, вдоль контактов пегматитовых тел или в виде гнезд и вкрапленности в пегматитах. Минералами-примесями в рудах являются биотит, гранат, турмалин, апатит, сульфиды.

Типичные пегматиты с мусковитовой и редкометалльной минерализацией известны в Индии и Бразилии, месторождения отрабатываются комплексно с извлечением мусковита (в том числе особенно ценного рубинового), берилла, колумбита, сульфидов, минералов лития и урана, полевых шпатов и других минералов.

Карбонатитовые месторождения флогопита являются основным источником листового флогопита. Наиболее известные промышленные месторождения Ковдорское (Россия), Лулекоп (ЮАР), Якупиранга (Бразилия).

Ковдорское месторождение флогопита находится в юго-западной части Кольского полуострова. Месторождение приурочено к крупному карбонатитовому массиву, имеющему кольцевое строение и размеры в плане 40,5 км². Крупнокристаллические выделения флогопита сосредоточены в северной части массива в зоне флогопит-диопсид-оливиновых пород, вмещающей ядро оливинитов. Протяженность крутопадающей флогопитоносной зоны до 10 км, мощность от 100 м до 1 км. Флогопитовые руды, образующие линзовидные и жильные тела, составляют менее 5 % площади продуктивной зоны. Главная флогопитовая залежь представлена слепым линзообразным телом мощностью от 10 до 100 м, падающим полого (10–20°) на протяжении сотен метров.

Центральную часть залежи слагают гигантозернистые флогопит-оливиновые породы, периферическую – флогопит-диопсидовые породы и почти мономинеральные зоны флогопита. Массовая доля флогопита в рудах весьма различна, встречаются гнезда, сложенные гигантозернистым флогопитом и имеющие размеры до 10–20 м. На месторождении выделяют четыре типа флогопитовых руд: флогопит-оливиновые пегматоидные, флогопит-диопсидовые пегматоидные, флогопит-диопсид-оливиновые неравномерно-крупнозернистые, апатитсодержащие флогопитовые. Средний выход промышленного сырца по месторождению 46,6 %. Флогопит темно-зеленый толстотаблитчатый. Дефектами кристаллов являются волнистость, участки расслоения, трещиноватость, мозаичность, минеральные включения диопсида, апатита, магнетита и др.

Вермикулитовые месторождения кор выветривания часто располагаются в верхних частях коренных месторождений флогопита. Ковдорское месторождение выветривания вермикулита представлено корой выветривания флогопит-оливин-диопсидовых пород и имеет мощность до 80 м. Верхняя часть коры выветривания сложена сунгулит-вермику-литовыми рудами и характеризуется обилием глинистых примесей. Вермикулитовая зона, имеющая среднюю мощность около 20 м, представлена золотисто-коричневыми и желтыми кристаллами вермикулита. Кристаллы мягкие, хрупкие, трудно расщепляющиеся заключены в рыхлой песчано-глинистой массе. Ниже залегают гидрофлогопитовые руды. Вермикулитовые и гидрофлогопитовые руды хорошо обогащаются. Массовая доля вермикулита в рудах изменяется от 5 до 30 %. Богатые руды имеют массовую долю вермикулита более 20 % и массовую долю чешуек размером более 0,5 мм более 70 %.

Примером *метаморфических месторождений флогопита* являются месторождения Центрально-Алданского флогопитоносного района. Флогопитовая минерализация тяготеет к замковым частям складок и их крыльев, осложненных складками волочения, часто рассеченных зонами мигматитов и дайками аляскитовых гранитов. Форма флогопитсодержащих зон линзовидная, столбообразная, седловидная. Средняя протяженность зон 70 м, средняя мощность 8 м. Флогопит короткопризматический и пластинчатый темно-бурый. Размер крупных кристаллов до 60 см в поперечнике. Дефектами кристаллов являются гидратизация (серебристый оттенок и жирный блеск), гофрировка, трещиноватость, включения чуждых минералов (диопсида, кальцита, сульфидов и др.). Вмещающими породами служат скаполит-диопсидовые, диопсидовые, шпинель-паргаситовые сланцы. Распределение флогопита неравномерное: гнездовое, сетчатое, штоко- и трубообразное. Флогопитовые жилы лестничного типа приурочены к разрывным нарушениям в диопсидовых сланцах. Часто встречаются жилы, имеющие зональное строение, в которых флогопит-диопсидовый агрегат занимает центральное положение в диопсид-плагиоклазовой или диопсид-скаполитовой оболочке. Выход промышленного сырца Алданских месторождений колеблется от 6 до 24 %. Запасы месторождений составляют первые десятки тысяч тонн, редко сотни тысяч тонн.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности слюд.
2. Охарактеризуйте области применения слюд.
3. Каков минимальный размер пластинок слюд в промышленном сырце?
4. Перечислите геолого-промышленные типы месторождений слюд.
5. Приведите примеры промышленных месторождений слюд.

ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЕ СЫРЬЕ

В данном параграфе будут рассмотрены две структурные природные разновидности углерода: алмаз (кубический) и графит (гексагональный).

АЛМАЗЫ

Кубическая сингония, решетка с голоэдрической симметрией, отвечает пространственной группе $O_h^7 - Fd_3m$; $a_0 = 3,5597 \text{ \AA}$, по другим данным $a = 3,567 \text{ \AA}$; $z = 8$ (число формульных единиц в элементарной ячейке). Ячейка алмаза – гранцентрированный куб, который поделен на 8 мелких кубов. В четырех из этих кубов в шахматном порядке размещены еще четыре атома С. Кристаллографически все 8 атомов С в элементарном кубе тождественны, каждый атом С окружен четырьмя атомами С. Четверная координация в алмазе отвечает всем алифатическим соединениям углерода. Расстояние С–С в алмазе 1,54 Å, т.е. намного больше, чем в графите. На основании изучения морфологии кристаллов признавалась гексооктаэдрическая и гексотетраэдрическая симметрии. Показатель преломления алмазов равен 2,42.

По различию люминесценции, фотопроводимости, инфракрасных спектров, наличию или отсутствию дупреломления выделены 2 группы: алмазы I – тетраэдрическая разновидность (наиболее распространенная в природе), не прозрачны для ультрафиолетовых лучей короче 3 000 Å, люминесцируют в сине-голубых тонах, обнаруживают дупреломление, в инфракрасном спектре дают полосы поглощения при 4-5 и 8–10 мкм; алмазы II – октаэдрические, прозрачны для ультрафиолетовых лучей до 2 250 Å, не люминесцируют, характеризуются наличием в инфракрасном спектре только полос 4-5 мкм. Причиной в различие физических свойств разновидностей алмаза является присутствие примесей азота, замещающего атомы алмаза в алмазе I, и очень низкая массовая доля азота в алмазе II. По особенностям строения структуры алмазы I подразделяются на подтипы Ia и Ib. Алмазы II подразделяются на подтипы IIa и IIb в зависимости от их электрических свойств.

Алмазы бывают бесцветными, бледно-окрашенными с голубыми, желтыми, розовыми, зелеными, серыми и другими оттенками или интенсивно окрашенными в желтые, зеленые, голубые, розово-лиловые, коричневые, дымчатые и черные цвета. Иногда окраска алмазов пятнистая или зональная.

Спайность совершенная по (111). Излом раковистый. Хрупок. Твердость 10 – наиболее твердый минерал; абсолютная твердость алмаза в 150 раз больше абсолютной твердости корунда. Абразивная способность нефлюоресцирующих алмазов выше, чем флюоресцирующих. Удельный вес 3,50–3,52. Блеск алмазный до жирного. Коэффициент объемной сжимаемости $0,16 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$. Плохой проводник электричества, частично полупроводник. Алмаз прекрасный проводник тепла. Он сгорает в воздухе

при 850 °С, в кислороде – при 720 °С. Теплота сгорания в воздухе 94,505 кал/моль.

Поточное производство искусственных алмазов организовано при параметрах синтеза до 1 200–1 500 °С и 30 000 кгс/см². Для синтеза алмаза в большинстве случаев используется не графит, а углерод в ином состоянии – чаще растворенный в расплавленном металле.

В вакууме при 1 500 °С алмаз переходит в графит (теплота перехода 454 кал ± 30 кал). При нагревании в воздухе до 1 400 °С переход в графит очень незначителен (всего 1-2 % алмаза). Термический анализ при 850–1 200 °С показывает окисление и выгорание алмаза.

Алмазы подразделяются на ювелирные и технические. *Ювелирные алмазы* (важнейшее валютное сырье) – это драгоценные камни первого класса, пригодные для огранки, прозрачные, не имеющие значительных дефектов (трещиноватости, включений, двойников, мути, пятен). К ювелирным алмазам относят алмазы массой не менее 0,05 кар, бесцветные или слабо окрашенные и имеющие не более пяти мелких включений. У ювелирных алмазов с массой более 50 кар есть собственные названия. Наиболее крупным алмазом считают «Куллинан» (масса 3 025,75 кар, размеры 5х6,5х10 см). После огранки и шлифовки ювелирные алмазы называют бриллиантами.

Все алмазы, не относимые к ювелирным, называют *техническими*. Обычно выделяют четыре разновидности технических алмазов: борт, баллас, карбонадо и конго. *Борт* представляет собой непрозрачные или полупрозрачные темной окраски неправильные обломки кристаллов, их сростки, зернистые или лучистые агрегаты. *Балласы* – тонкозернистые агрегаты шарообразных форм с неравномерной твердостью – оболочка более твердая, чем ядро. К *карбонадо* относят пористые микрочернистые агрегаты черного и темно-зеленого цвета. *Конго* – алмазная мелочь из обломков низкосортных кристаллов.

Область применения технических алмазов весьма велика, благодаря их уникальным свойствам и, прежде всего, их твердости. Наиболее широко технические алмазы используются при изготовлении режущего инструмента: буровых коронок, резцов, стеклорезов, отрезных дисков, алмазных игл и алмазно-металлических карандашей. Алмазы II применяются как полупроводниковые материалы и теплоотводы в электронной технике, в дозиметрах и дефекторах ионизирующих излучений и как оптические высокопрочные окна. Благодаря высокому модулю упругости технические алмазы применяют для изготовления высококачественных абразивных материалов и изделий: фильер для волочения проволоки, алмазных порошков для получения шлифовальных кругов, брусков, паст. В США на изготовление только бурового оборудования расходуется 58 % всех технических алмазов.

Запасы алмазов в мире (без России) оцениваются в 2 млрд кар. Первое место по разведанным запасам алмазов занимает Заир, далее следуют ЮАР,

Ботсвана и Австралийский Союз. На эти четыре страны приходится 70 % всех мировых запасов. Добыча алмазов в зарубежных странах составляет 100 млн кар, из которых около 55 % добычи ювелирные и полуювелирные алмазы. По размерам годовой добычи алмазов первое место принадлежит Австралийскому Союзу, по потреблению – США. Доля России в мировой добыче алмазов около 20 %. Средняя цена на необработанные ювелирные камни составляет по рудникам компании «Де Бирс» 103 дол./кар. Добыча технических алмазов – более 50 млн кар/г. Главными мировыми производителями синтетических алмазов являются компании «Де Бирс» и «Дженерал электрик». Технические алмазы поставляются в основном в виде натуральных поликристаллических алмазов, синтетической алмазной крошки и алмазной пудры. Средняя цена технических алмазов составляет от 1 до 7 дол./кар.

По масштабам, млн кар, месторождения алмазов подразделяются: на уникальные – более 500, крупные – 500–150, средние – 150–50, мелкие – менее 50.

Геолого-промышленными типами месторождений алмазов являются *кимберлитовый*, *кимберлит-лампроитовый*, *метаморфический* и *импактный* для коренных и *аллювиальный* для россыпных месторождений. Единичные месторождения алмазов импактного типа обладают значительными запасами, однако, алмазы в них имеют небольшие размеры (обычно до первых сотен микрон) и по качеству соответствуют техническим алмазам. Коренные месторождения алмазов пространственно и генетически связаны с кимберлитовыми и лампроитовыми ультраосновными породами и большинством исследователей относятся к раннемагматическим месторождениям. Формы рудных тел преимущественно трубообразны – кимберлитовые и лампроитовые трубки с глубиной переходящие в дайки. Размеры трубок от десятков до сотен метров в диаметре и до более 1 000 м по падению. В настоящее время наибольшее количество алмазов добывается из трубки Аргайл (Австралийский Союз). В россыпных аллювиальных месторождения качество алмазов значительно выше, чем в большинстве кимберлитовых трубок.

Примерами *коренных месторождений алмазов* могут служить месторождения Южной Африки, где известно более 250 кимберлитовых трубок, однако к промышленным относят лишь 10 % от общего их числа. Кимберлитовые трубки располагаются в виде отдельных групп или цепочек на территории ЮАР, Ботсваны, Зимбабве, Лесото и Свазиленда. Трубки прорывают субгоризонтальные вулканогенно-осадочные и песчано-глинистые отложения систем Карру и Вентесдорп (рис. 10). Трубки выполнены эруптивной брекчией разнообразных ультраосновных пород (эклогитов, дунитов, перидотитов и др.) и осадочных образований (песчаников, сланцев и др.), сцементированных кимберлитом. Минеральный состав кимберлитов достаточно разнообразен и представлен оливином,

флогопитом, авгитом, ильменитом, апатитом, а также вторичными минералами: серпентином, хлоритом, кальцитом, цеолитами, халцедоном и др. Типоморфными минералами эклогитов в составе ксенолитового материала трубок являются пиропы и хромдиопсиды. Трубка «Премьер», из руды которой был извлечен алмаз «Куллинан», имеет овальное сечение – на поверхности 500x800 м при массовой доле алмазов около 0,3 кар на тонну руды. Кора выветривания на кимберлитовых трубках – «желтая земля» мощностью до 40 м представлена алмазоносными глинами с включениями обломков твердых пород и минералов. Ниже располагается «синяя земля» – зона алмазоносных серпентиновых пород синего цвета, содержащих неизмененные обломки и минералы кимберлитов, плавно переходящая в коренные кимберлитовые руды. Мощность этой зоны может достигать 600 м (трубка «Де Бирс»). Распределение алмазов в пределах кимберлитовых трубок весьма неравномерно.

Запасы алмазов России в коренных месторождениях сосредоточены в кимберлитовых трубках в Якутии (Мир, Удачная, Юбилейная) и в Архангельской области (имени Ломоносова). Якутия (Республика Саха) является основной алмазодобывающей провинцией России.

Трубка «Мир» была открыта в 1955 г. и разрабатывается в настоящее время (г. Мирный). Трубка сложена кимберлитовыми туфами и грубообломочной кимберлитовой туфобрекчией. По минеральному составу кимберлиты представлены серпентинизированным оливином и карбонатами с примесями биотита, хлорита, магнетита, пикроильменита, перовскита, шпинели, диопсида. В туфах встречаются обломки известняков, серпентин-хлорит-карбонатных сланцев, кварцитов, диабазов и др. Структура туфов в основном мелкообломочная.

Кимберлитовая туфобрекчия состоит из обломков кимберлита и осадочных пород – известняков, сланцев и др.

Текстуры туфобрекчий брекчиевые крупнообломочные и миндалевидные. Эпизодически в кимберлитах встречаются крупные ювелирные алмазы массой от 20 до 300 кар, габитус кристаллов в основном октаэдрический, ромбододекаэдры встречаются реже, кубические кристаллы редки. Массовая доля алмазов размером от 0,5 до 1 мм составляет 45–50 %.

В целом особенностью этой высокоалмазоносной трубки являются крайне низкая концентрация алмазов ($1 \cdot 10^{-4}$ %) и их неоднородно-гнездовое распределение. В верхней части трубки, за счет интенсивного изменения кимберлитов и влияния процессов выветривания алмазоносность значительно возрастает по сравнению с нижними горизонтами. На поверхности в зоне мощностью до 5 м кимберлиты превращены в рыхлую породу, содержащую щебень и дресву кимберлитов. Цвет выветрелых алмазоносных пород желтовато-зеленый и голубой. Вблизи трубки разрабатываются россыпи с массовой долей алмазов более высокой, чем в коренном месторождении.

Россыпные месторождения алмазов имеют большое значение в балансе добычи алмазов (около 45 % общей добычи). К элювиальным

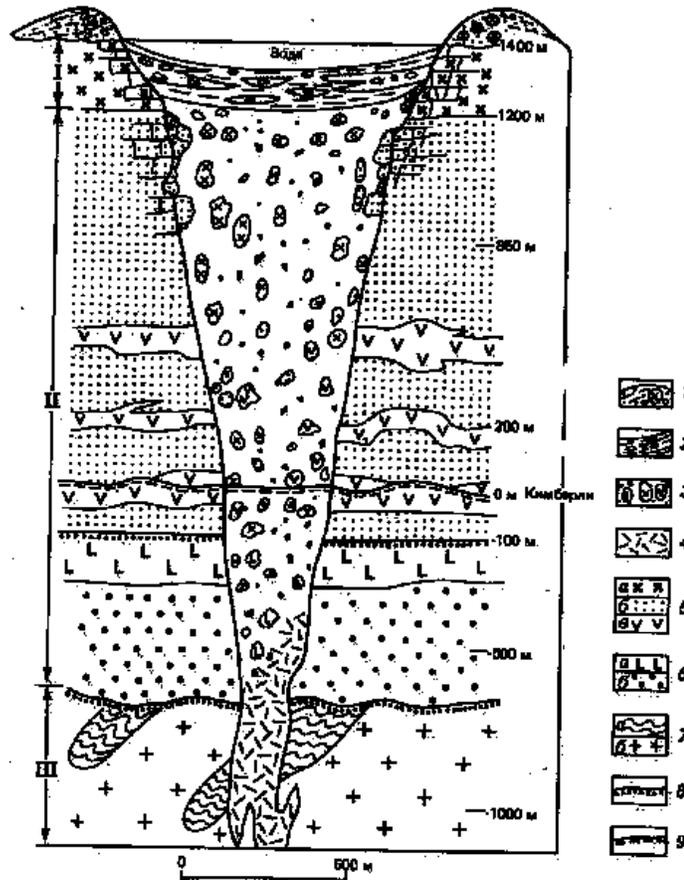


Рис. 10. Графическая модель южноафриканских кимберлитовых трубок (по Дж. Хаусону с упрощением): 1 – туфы вулканического конуса; 2 – кратерные осадки; 3 – взрывные кимберлитовые брекчии (агломераты, туфы); 4 – интрузивные брекчии и кимберлиты; 5 – породы системы Карру (С₃-Р-Т): а – основные лавы, б – сланцы, песчаники, в – долериты; 6 – система Вентесдорп (PR₁): а – андезитовые лавы, б – конгломераты, кварциты; 7 – первичная система (Ag): а – сланцы, б – гранитогнейсы; 8 – границы систем; 9 – современная поверхность трубок и силлов в поле Кимберли. Части трубок: I – кратерная; II – диатремовая, III – канальная

россыпям алмазов относят упоминавшиеся выше «желтые земли», в которых алмазы находятся в свободном состоянии и извлекаются промывкой.

Наибольшее значение среди россыпей алмазов имеют аллювиальные и прибрежно-морские россыпи. Древние аллювиальные россыпи, представленные конгломератами, гравелитами, галечниками и песчаниками, приурочены к дельтам палеорек и обрабатываются в ЮАР и Индии.

На месторождении Витватерсранд (ЮАР) алмазы попутно с золотом и ураном извлекаются из золотоносных конгломератов. Древние россыпи

являются предполагаемым важным источником современных россыпей алмазов. Аллювиальным россыпям свойственно накопление алмазов в грубозернистых отложениях (галечниках и гравелитах) в приплотиковых частях россыпей, в головах речных кос, в стрежневых зонах рек и углублениях (ямах) дна. Наиболее крупные россыпи алмазов находятся на территории Заира и Анголы. Из прибрежно-морских россыпей алмазов наиболее известны россыпи Намибии, где южнее устья реки Оранжевой расположены месторождения ювелирных алмазов, которые можно было подобрать прямо на пляжах. К северу от этой реки алмазные россыпи находятся на океаническом шельфе. Подводные разведочные работы ведутся в районе Пингвиновых островов, известных ранее богатейшими залежами гуано. Предполагается, что их недра скрывают по крайней мере 2 млн карат алмазов на общую сумму более 200 млн дол. Коренные источники алмазов этих россыпей до сих пор достоверно не установлены. Гораздо менее значимы ледниковые, озерные, карстовые и эоловые россыпи алмазов.

На территории России (27 россыпных месторождений – 6,1 % всех запасов) наиболее высоким качеством алмазов отличаются уральские россыпи. Россыпные месторождения России располагаются в пределах северной окраины Восточно-Европейской платформы (Средний Урал, Северный и Средний Тиман) и на Сибирской платформе (Мало-Ботуобинский, Средне-Мархинский, Тюнгский, Оленекский, Анабарский, Приленский районы) и многочисленные проявления в юго-западной части Сибирской платформы.

ГРАФИТ

Графит известен с древних времен, назван от греческого слова $\gamma\rho\alpha\phi\iota\tau\eta$ (пищу). Синонимы: плюмбагин, черный свинец, меланографит, графитоид, графитит. Единственный минералообразующий элемент графита – углерод. Обычно графит образует вкрапления листоватых масс отдельных таблитчатых зерен и чешуек, столбчатый, радиально-лучистый, реже зонально-концентрический, землистый (мельчайшие частички вплоть до пылевидных и коллоидальных). Наличие в решетке подвижных электронов обуславливает ряд свойств графита, приближающихся к свойствам металлов: цвет, блеск, электро- и теплопроводность, кислотоупорность и др. Наличие же связей в решетке в направлении слоистости и перпендикулярно к ней вызывает резко выраженную анизотропию твердости, электропроводности, магнитных, оптических и других свойств. Двойники роста у графита отсутствуют, спайность по {0001} совершенная, чешуйки легко разделяются. Минерал гибкий, неэластичный, жирный на ощупь, твердость 1-2, на (0001) – около 5,5 по шкале Мооса, у высокодисперсных агрегатов твердость возрастает с увеличением степени дисперсности. В связи с низкой твердостью и весьма совершенной спайностью графит легко оставляет след на бумаге.

Эти свойства графита обусловлены слабыми связями между атомными слоями. Графит легко смешивается с другими веществами, отличается малым коэффициентом трения, однако листочки графита упругие; сопротивление их на разрыв 2 кг/мм^2 , модуль упругости $(2,5-12,3) \cdot 10^{-9} \text{ Па}$. Объемный вес 2,09–2,23, цвет и черта черные, блеск от металлического до матового. Графит непрозрачен (просвечивает лишь в очень тонких листочках.). Кристаллы таблитчатые по $\{0001\}$, несовершенные с гексагональной призмой и первого порядка $\{10 \bar{1}1\}$ и $\{10 \bar{1}2\}$. На гранях наблюдается часто дипирамидами треугольная штриховка за счет полисинтетических двойников давления. Излом яснокристаллических агрегатов зернистый, плотных – ровный.

Хороший проводник электричества. Электропроводность кристаллов параллельно слоям решетки в 10^4 больше, чем вдоль оси c . Электропроводность резко убывает при повышении температуры и возрастает с увеличением влажности и содержания летучих. Электрическое сопротивление блоков крупнокристаллического графита колеблется от $9 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, мелкокристаллического – от $8 \cdot 10^{-4}$ до $20 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Диэлектрическая проницаемость 81. Удельная магнитная восприимчивость $0,0310 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$. У графита низкая теплоемкость и высокая теплопроводность. В очень тонких шлифах в проходящем свете графит темно-сине-серый, серый, зеленовато-серый, одноосный отрицательный, $n = 1,93-2,07$. В полированных шлифах в отраженном свете исключительно сильное двуотражение, $R = 22,5-23$.

Графит устойчив в кислотах и щелочах, окисляется только дихроматами калия и натрия, а также хлористым железом и алюминием. При нагревании с дымящей HNO_3 чешуйчатый графит вспучивается (реакция Броди). При длительном нагревании с бертолетовой солью образуется графитовая кислота. При сплавлении с KNO_3 быстро сгорает. Графит растворим в расплавленных металлах, а его гидрофобность учитывается при разработке схем обогащения руд.

В вольтовой дуге графит улетучивается не плавясь. Температура возгонки $3\ 527 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура плавления $(3\ 850 \pm 50) \text{ }^\circ\text{C}$. При нагревании в воздухе выше $400 \text{ }^\circ\text{C}$ начинает окисляться (чешуйки восточно-забайкальского – при температуре ниже $300 \text{ }^\circ\text{C}$). Для графита характерна высокая кроющая способность, обуславливающая пигментные свойства.

Температура горения графита зависит от строения агрегатов: крупночешуйчатое – $720-730 \text{ }^\circ\text{C}$, мелкочешуйчатое (ботогольский) – $680 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплота горения его в воздухе – $(7\ 856 \pm 1) \text{ кал/г}$ (также зависит от степени дисперсности). В атмосфере кислорода она равна $(94,051 \pm 10,8) \text{ кал/моль}$, в разреженной кислородной атмосфере при нагревании до $1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$ с увеличением давления скорость сгорания возрастает, а выше $1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$ не зависит от давления. Около $2\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ графит становится пластичным. Коэффициент его линейного расширения при нагревании $(26-29) \cdot 10^6 \text{ см}\cdot\text{град}$.

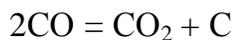
Теплопроводность при 30 °С перпендикулярно оси c 3,550 Вт⁻¹см·град, параллельно оси c – в четыре раза меньше.

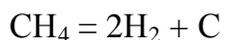
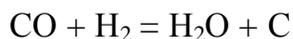
Графитом называют не только мономинеральные образования, но и графитосодержащие руды и концентраты после их обогащения. Среди природных графитовых руд выделяются разновидности явно- и скрыто-кристаллические (последние часто неверно называются аморфными). К *явнокристаллическим* относятся руды со средней величиной кристаллов более 1 мкм. В эту группу включены руды чешуйчатые и плотнокристаллические. *Плотнокристаллические графиты* также подразделяют на крупнокристаллические со средним размером кристаллов более 50 мкм и мелкокристаллические. В плотнокристаллических рудах кристаллы графита плотно прилегают друг к другу и ориентированы под разными углами. Такая структура затрудняет расщепление кристаллов и сдвиги при деформациях. Массовая доля графита в этих рудах высокая (35–40 % и более). Среди *чешуйчатых графитов* по диаметру кристаллов выделяют крупночешуйчатые (0,1–5 мм) и мелкочешуйчатые (0,001–0,1 мм). Массовая доля графита в чешуйчатых рудах изменяется обычно от 2 до 15 %, в исключительных случаях достигая 30 % (месторождения Норвегии). Во флотационных концентратах массовая доля графита составляет 60 % и более, зольность – 1–6 %.

У *скрытокристаллических графитовых руд* диаметр кристаллов графита изменяется от 1 до 100 мкм. Массовая доля графита в месторождениях бывшего СССР составляла 5–90 % (в среднем 70 %), но отрабатывались и более бедные руды с массовой долей графита 20–4 % (в среднем 18 %). Широко используются выветрелые чешуйчатые руды, в которых графит свободен от сростков с другими минералами, что облегчает процессы его извлечения из руд.

В промышленности широко применяется синтетический графит, получаемый из антрацита и нефтяного кокса, а также из отходов доменного производства. В электрических печах при температурах выше 2 200 °С графит получают из антрацита и из аморфного углерода (ачесоновский графит). В виде шестиугольных пластинок графит был получен из силикатного расплава с примесью сажи и флюорита.

В природе графит образуется из органических соединений в результате метаморфизации осадочных пород. Значения $\delta^{13}\text{C}$ графита из них составляют от –26,5 до –13,8 ‰, что соответствует биогенному углероду. В магматических породах, метеоритах и в скарнах найден «тяжелый» графит с $\delta^{13}\text{C}$ от –2,0 до –0,8 ‰. Такой графит имеет, вероятно, небιοгенное происхождение и может быть получен или при низком давлении и температуре до 1 000 °С в результате раскисления CO_2 и CO , или при разложении газообразных соединений углерода:





Графитизации могут быть подвержены как летучие, так и жидкие углеводороды, предварительно полимеризованные и переведенные в углеподобные массы под влиянием природных условий. Графитизация углей изучена и описана для процессов коксования при получении искусственного графита. Графит – главный компонент технических коксов, в которых он встречается в виде тонкозернистого агрегата, а главным образом в виде тонких чешуек по {0001}, огибающих коксовые поры. Он возникает относительно быстро из дюрена и витрена, тогда как фюзен переходит в графит очень медленно. «Полуграфиты» – промежуточные образования между графитом и анизотропными углями. Кристаллохимически их можно рассматривать как вещество, упорядоченное расположение чешуек которого в плоскости базиса обуславливает точно графитовые соотношения, а перпендикулярно к нему обладает еще меняющимися расстояниями в параметрах кристаллической структуры и содержит включения. Спайность у них по (0001) менее отчетлива, анизотропия тоже не столь четкая.

Благодаря своим уникальным свойствам графит почти не имеет заменителей и находит применение в различных отраслях промышленности. Прежде всего графит широко используется в качестве огнеупорного материала, который в основном (до 70 %) потребляется в черной и цветной металлургии. Как электропроводящий и химически стойкий материал графит применяется в электротехнике, химической и нефтехимической промышленности; в качестве смазочного материала – в машиностроении. Находит применение графит также в производстве строительных материалов, абразивов, красок и т.п. При этом графит нередко входит в состав сложных смесей.

Особый интерес представляют модифицированные графиты (интеркалированный, терморасширенный, пенографит, вспученный и т.п.). Сфера их применения весьма разнообразна: всевозможные термоэлектронагреватели, сальниковые уплотнители, адсорбенты и пожаробезопасные звукоизоляционные материалы.

В литейном производстве применяют в составе формовочных смесей, для присыпок, натирки стержней, их изготовления.

Большие количества скрытокристаллического графита используются при карбюраторном процессе выплавки стали.

Наиболее графитоемким является производство огнеупорных кирпичей и плавильных тиглей. Последние используются для выплавки особых сталей, цветных и благородных металлов. Огнеупорные кирпичи с графитовой составляющей, или так называемые графитсодержащие огнеупоры на основе периклаза, графита, глинозема, являются высокостойкими огнеупорами. Они значительно превосходят по своей

износоустойчивости традиционные шамотные, кремнеземистые и магнезиальные. В настоящее время эти огнеупоры стали основным футеровочным материалом в металлургической промышленности Великобритании, Японии и других развитых стран.

В электротехнической промышленности графит применяется для изготовления электродов электрических печей. В качестве электродов и проводящих покрытий графит используется в гальванических элементах, щелочных аккумуляторах, анодах электролизеров, гальванических матриц. Графитовые электрошетки (скользящие контакты) широко применяются в электродвигателях многих машин. Графитовые смазки, применяющиеся в машиностроении и других отраслях, представляют собой сухие графитовые порошки, консистентные мази, пасты, водные или масляные суспензии. Наиболее распространенными антифрикционными изделиями, выпускаемыми промышленностью, являются подшипники скольжения, различные втулки. Графит здесь используется в качестве подшипникового материала. Пластмассы, содержащие в качестве наполнителя графит, углеродные волокна, являются важными композиционными материалами, используемыми в авиа- и автомобилестроении, космической технике.

Особое значение имеет стойкость графита по отношению к плавиковой и горячей фосфорной кислотам, в которых разрушаются даже силикатная керамика, стекло и большинство металлов, применяемых в аппаратостроении.

За последние годы в связи с заменой асбеста при производстве тормозных накладок, например при изготовлении полуметаллических вкладышей, резко возросла доля графитового компонента – с 1-2 до 15 %.

Одной из традиционных областей применения природного графита является производство карандашей.

Используется графит при производстве резины, копировальной бумаги, синтетических алмазов, в качестве полировального и противонакипного материала, для изготовления абразивных паст с целью снижения их чувствительности к механическим воздействиям без ухудшения эксплуатационных свойств, для производства графитовой фольги, употребляемой при изготовлении сальниковых уплотнителей, набивок, нагревателей, экранов, футеровки и т.п.

В атомной промышленности из графита изготавливаются блоки и детали ядерных реакторов. В настоящее время в качестве реакторного графита в атомной промышленности используется главным образом искусственный графит, получаемый на базе производных нефти и угля.

В России и за рубежом основными потребителями графита являются металлургия, машиностроение, электротехника, химия и нефтехимия, карандашное производство. Но если в России на первом месте по

потреблению графита стоит машиностроение (62 % от всего объема потребляемого графита), то за рубежом — металлургия (50,1 %).

Графит — лишь одна из полиморфных модификаций самородного углерода. С началом синтеза искусственных алмазов резко возрос интерес к исследованию и поискам полиморфных модификаций углерода. В настоящее время, кроме алмаза и графита, достоверно установленными можно считать *лонсдейлит* и *чаоит*. Первый во всех случаях был найден только в тесном взаимопрорастании с алмазом и поэтому называется еще гексагональным алмазом, а второй встречается в виде пластинок, чередующихся с графитом, но расположенных перпендикулярно его плоскости (0001). Утверждается также, что путем синтеза получена еще одна гексагональная полиморфная модификация углерода — *карбин*. В природе она не установлена. Природные *фуллерены* — крупные кластеры углерода с химической формулой C_{60} — рассматриваются в качестве еще одной полиморфной (аллотропной) формы углерода. С этим веществом связывают перспективы получения материалов, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью.

Шунгит относится к группе антраксолитов, являясь промежуточным продуктом между аморфным углеродом и графитом. Содержит 93–98 % С, до 3–4 % Н, также N, O, S, до 8 % гигроскопической воды; в золе — значительные количества V, Ni, Mo, а также W, Se, As; по спектральным анализам присутствуют Co, Ti, Mg, Cu, Sr, Cr, Zr, Rh, Ru, Pt, Mn. Содержание ванадия связано с примесями. Шунгит 2, 3 и 4 — разновидности со слабым и с матовым блеском, содержат, соответственно, всего 40–60, 28–44 % и меньше 15 % углерода.

Клифтонит — небольшие кристаллы кубического облика, состоящие из углерода и наблюдавшиеся в ряде метеоритов. Эти кристаллы были приняты за особую разновидность углерода, образующую псевдоморфозы по алмазу. Однако исходный минерал не мог быть алмазом, так как в псевдоморфозах ось *c* графита параллельна осям [001] минерала, а при переходе алмаза в графит ось *c* последнего ориентируется параллельно осям симметрии третьего порядка алмаза.

В добываемых рудах массовая доля скрытокристаллического графита обычно выше 80 %, хотя эти руды трудно поддаются обогащению. Массовая доля кристаллического графита в рудах может достигать лишь 2,2–2,4 %, для открытого способа отработки, но они легкообогатимы методом флотации. При оценке качества графита учитывается наличие в его составе золы, а также других инертных вредных примесей: для тиглей — слюды, кальцита и сульфидов; для батарей — меди, железа, никеля и других металлов; для пигментного производства — сульфидов; для смазочных материалов — кварца, полевого шпата, сульфидов; для угольных щеток — абразивных материалов, меди и других металлов.

Мировые запасы графита оцениваются ориентировочно в 150 млн т. Ежегодная добыча составляет около 600 тыс. т. Наиболее крупными

производителями графита являются Китай (185 тыс. т/г), Южная Корея (101 тыс. т/г) и Украина (48,3 тыс. т/г). Большое значение в мире приобретает производство синтетического графита. Наиболее высококачественный плотнокристаллический графит (жильный) производится в Шри-Ланке, чешуйчатый – в Индии. Основные запасы аморфного графита сосредоточены в Южной Корее и Мексике. Широко используется чешуйчатый графит выветрелых руд, практически не требующий обогащения. В России и за рубежом основными потребителями графита являются металлургия, машиностроение, электротехника, химия и нефтехимия, карандашное производство. Но если в России на первом месте по потреблению графита стоит машиностроение (62 % от всего объема потребляемого графита), то за рубежом – металлургия (50,1 %).

Структуру потребления графита можно проследить на примере США. В сталелитейной промышленности США используется около 33 % графита, в литье – 18 %, в производстве огнеупоров – 17 %, тиглей и тормозных колодок – 8 %, смазочных материалов – 6 %. Крупнейшими экспортерами графита в мире являются Мадагаскар, Шри-Ланка, Южная Корея, Мексика. Наибольшее количество графита импортируют США, ФРГ и Япония. Цена одной тонны графита в зависимости от сорта колеблется от 750 до 1 500 дол./т.

По масштабам месторождения графита подразделяют, млн т: на крупные – более 1, средние – 0,5–1, мелкие – до 0,5. Наибольшее число исследователей выделяют следующие геолого-промышленные типы месторождений графита: магматические, пегматитовые, метаморфизованные и метаморфические.

Магматические месторождения обычно дают графит высокого качества. Классическим примером месторождений графита магматического происхождения обычно служит Ботогольское (центральная часть Восточного Саяна). Промышленные залежи графита приурочены к нефелиновым, реже пироксеновым сиенитам северной части Ботогольского массива, контактирующей с известняками. Графит образует гнезда округлой формы («штоки»). Наибольший из них Корнельевский шток (размеры в плане 50x35 м) прослеживается на глубину 80 м среди нефелиновых сиенитов и подстилается карбонатными породами. Основной разновидностью графита на месторождении является плотнокристаллический, менее развит чешуйчатый, образующий с плотнокристаллическим постепенные переходы. Наиболее высококачественные руды месторождения (60–90 % C) имеют массивные текстуры, руды с полосчатыми и вкрапленными текстурами содержат включения нефелина, пироксена, волластонита и кальцита. Бедные руды имеют массовую долю углерода от 2 до 30 %, однако легко обогащаются. Наличие процессов скарнирования известняков на месторождении осложняет толкование его генезиса.

Пегматитовые месторождения (пневматолитово-гидротермальные) служат источником высокоценного чешуйчатого графита

(месторождения Шри-Ланки и Канады). На месторождениях Шри-Ланки графитовые жилы протяженностью десятки метров и мощностью до нескольких метров залегают в виде секущих тел в линейных сколовых зонах среди гнейсов и тяготеют к контактам пегматитовых тел и трещинам в них. Наиболее крупные скопления пегматитов и графитовых жил локализованы в гребнях брахиантиклиналей. Жилы графита имеют неправильные формы с раздувами и пережимами, иногда они зональны (в центральной части жил преобладает плотнокристаллический графит, в зальбандах – крупночешуйчатый). Типичными минералами-примесями в графитовых рудах являются пироксены, апатит, кальцит, кварц, волластонит и пирит, которые тяготеют к центральным частям жил.

Метаморфизованные месторождения графита за счет контактового метаморфизма угольных пластов известны в Тунгусской графитоносной провинции (Ногинское месторождение). Месторождение представлено тремя промышленными пластами графита в сланцах-адинолах хлорит-биотит-кварцевого состава (рис. 11). Между пластами графита встречаются также песчаники, брекчии, кварциты и межпластовые интрузивные траппы. Мощность пластов графита до 6 м. Графитовые руды месторождения в основном принадлежат к скрытокристаллическим, среди которых выделяются столбчатые, слоистые, «свинцовые» и брекчированные разновидности. В пределах графитовых пластов встречаются линзовидные включения адиноловых сланцев, примеси хлорита, кальцита, цеолитов и пирита.

В районе месторождения наблюдается метаморфическая зональность графитовых и угольных пластов в зависимости от близости их к контактам траппов. Сверху вниз по разрезу слои сменяются следующим образом: крупночешуйчатый графит – мелкочешуйчатый графит –

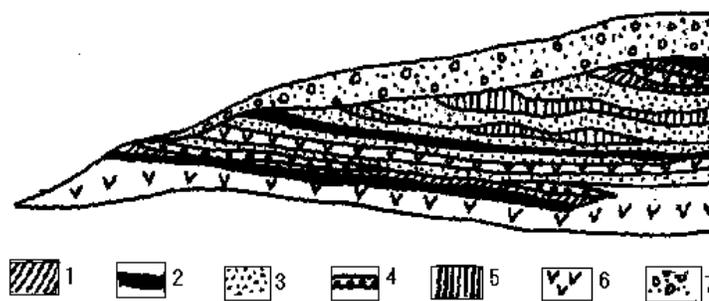


Рис. 11. Геологический разрез Ногинского месторождения (по В.П. Солоненко): 1 – адиноли; 2 – графиты; 3 – песчаники; 4 – кварциты и брекчии; 5 – глинистые сланцы; 6 – траппы; 7 – современные отложения

скрытокристаллический графит – графитизированный антрацит – полуантрацит – тощий уголь.

Метаморфические месторождения располагаются среди древних метаморфических пород, имеют большую значимость и продуктивность. Наиболее известно в литературе Завальевское месторождение, расположенное на Украине в Кировоградской области. Продуктивными здесь являются графитсодержащие биотит-хлоритовые, полевошпат-гранатовые и амфиболовые гнейсы. Графитоносные гнейсы, образующие от одного до пяти горизонтов, переслаиваются с безрудными гнейсами и по простиранию прослеживаются на 3 км при мощности до 250 м. Они приурочены к крупной и крутой синклинальной складке, подстилаются безрудными амфиболовыми гнейсами и перекрываются кварцитами и кристаллическими известняками. Массовая доля графита в рудах в среднем 6–10 %. Графит представлен чешуйчатыми разностями. Чешуйки имеют размеры от долей миллиметра до первых миллиметров и редко до 1 см. Текстуры руд вкрапленные и пятнистые, реже массивные. Руды высококачественны и легкообогатимы. Генезис месторождения связывается с возникновением графитовой минерализации за счет метаморфизма первичноосадочных пород, содержащих органику. На территории России разрабатывается метаморфическое Тайгинское месторождение чешуйчатого графита на Урале.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте области применения алмазов и графита.
2. Назовите разновидности алмаза, графитов.
3. Какова минимальная массовая доля графита в добываемых рудах?
4. Перечислите геолого-промышленные типы месторождений алмазов, графитов.
5. Приведите примеры промышленных месторождений алмазов, графитов.

КАРБОНАТНОЕ СЫРЬЕ

В этом параграфе рассматриваются карбонатные породы и минералы: исландский шпат, известняки и мел, доломиты и мраморы, в составе которых преобладают минералы класса карбонатов – кальцит и доломит.

ИСЛАНДСКИЙ ШПАТ

Кальцит оптического качества называется исландским шпатом в связи с тем, что в значительных количествах добывается из кавернозных зон в базальтах Исландии. Исландский шпат представляет собой чистые прозрачные крупные и гигантские кристаллы и сростки кристаллов кальцита. Для кристаллов исландского шпата характерны призматические, таблитчатые, скаленоэдрические и ромбоэдрические формы, обычны двойники. Цвет кристаллов желтый, красновато-желтый, светло-коричневый, зеленый,

голубоватый, фиолетовый в зависимости от количества и качества примесей и дефектности кристаллической решетки. Спайность совершенная по ромбоэдру. Твердость 3. Плотность 2,71. Высокая прозрачность для видимого и ультрафиолетового света и большое лучепреломление (n_o 1,6584; n_e 1,4864) обеспечили успешное применение этого вида сырья в оптической промышленности.

Оценке подлежит сырье, представляемое в виде пластин, блоков, ромбоэдров и заготовок оптических деталей. *Пластиной* называют распиленную часть кристалла, ориентированную относительно оптической оси. *Блок* – пластина толщиной более 30 мм (вдоль оптической оси). *Ромбоэдр* (спайный выкол) – часть кристалла, которая ограничена не менее чем с четырех сторон плоскостями спайности (естественные грани ограничивают меньшую часть поверхности). Поверхности пластин и блоков просветляются травлением. Поверхность, не имеющая включений более 0,05 мм, шлифуется и полируется. К дефектам сырья относятся трещиноватость кристаллов, включения, свилеватость, окраска и двойники.

Исландский шпат, пригодный для работы в интервале длин волн 400–1 900 нм, относят к группе А. Сырье желтого цвета, который невозможно удалить, используется для работы в интервале длин волн 700–1 900 нм. Его относят к группе Б. В каждой группе выделяются сорта с учетом светорассеяния, количества включений (шт/см³), границ двойников и пирамид роста. Отнесение заготовок к определенному сорту проводится при визуальном просмотре сырья на темном фоне с подсветкой его электрической лампой мощностью не менее 100 Вт. Массовая доля пригодного к дальнейшему использованию сырья не должна составлять в пластине и блоке менее 20 %, в ромбоэдре – менее 50 %. Минимальная толщина пластины – 10 мм, размер ромбоэдра – 29x29x9 и 18x18x14 мм. Минимальная бездефектная область должна равняться кубу со стороной 10 мм (одно ребро параллельно оптической оси). Массовая доля исландского шпата в руде обычно первые десятки граммов на 1 м³.

Несмотря на широкое распространение кальцита, кристаллы исландского шпата, отвечающего кондициям, встречаются довольно редко и представляют большую ценность. Основными геолого-промышленными типами месторождений исландского шпата являются месторождения в вулканогенных породах основного состава и месторождения в карбонатных породах.

Из месторождений в вулканогенных породах основного состава в России наиболее известны месторождения Тунгусской синеклизы – бассейны рек Нижней Тунгуски, Вилюя, Индигирки. Месторождения здесь связаны с зонами дробления агломератовых туфов, с секущими интрузиями траппов, мандельштейнами и шаровыми лавами. Наиболее перспективными являются месторождения в мандельштейнах (рис. 12). Кальцитоносная зона связана с покровом мандельштейнов мощностью до 15 м. Жилы кальцита и халцедона

имеют мощность от 5 до 80 см. Отдельные гнезда в жилах вмещают кристаллы исландского шпата с размерами 30х30 см. В парагенезисе с исландским шпатом находятся цеолиты, хлорит, пирит и халькопирит

За рубежом источниками добычи исландского шпата являются месторождения Исландии и Южной Африки в вулканогенных породах основного состава. Известны случаи добычи гигантских кристаллов из кальцитового тела в амфиболитах (США, штат Нью-Мексико). Здесь из трубообразного тела были добыты два кристалла исландского шпата массой 30 и 40 т.

Месторождения в карбонатных породах (Северный Кавказ, Тува, Крым, Закавказье, Памир и др.) представлены линзообразными и штокверкообразными телами в известняках и реже в мергелях, осложненных зонами дробления и трещиноватости. Карстовые полости в них с кристаллами исландского шпата выполнены глинистым материалом (рис. 13, 14). Размер кристаллов достигает десятков сантиметров. В ассоциации с исландским шпатом встречаются флюорит, барит и сульфиды. Окраска сырья желтая и серая. Прозрачные зоны в кристаллах от 2 до 20 см. По значимости месторождения в известняках уступают месторождениям в вулканогенных породах основного состава.

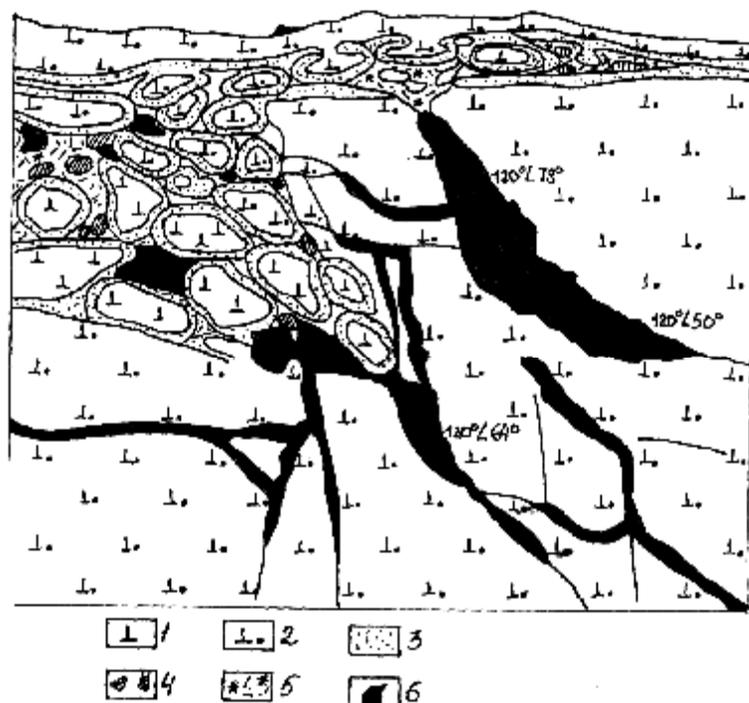


Рис. 12. Скопления исландского шпата в клиновидных трещинах миндалекаменных базальтов и перекрывающих их шаровых лавах (по М.С. Васильевой): 1–2 – базальт (1 – плотный, 2 – миндалекаменный); 3 – мандельштейн; 4 – дресва шаровых лав с морденитом, халцедоном, кальцитом; 5 – выделения халцедона; 6 – блоковый кальцит и кристаллы исландского шпата

Месторождения исландского шпата большинством исследователей связываются с деятельностью гидротермальных растворов, извлекающих

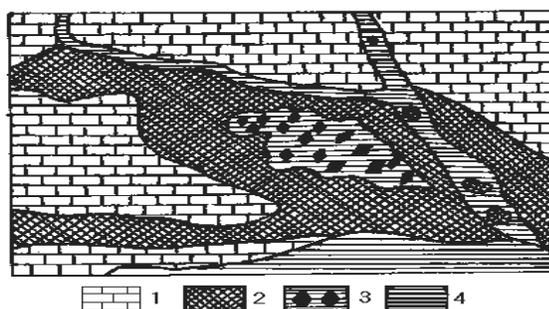


Рис. 13. Карстовая полость с исландским шпатом (по А.В. Скропышеву): 1 – известняк; 2 – мелкозернистый и шестоватый кальцит; 3 – глина; 4 – глина с кристаллами исландского шпата

кальций из вмещающих пород: известняков, вулканического стекла, плагиоклазов.

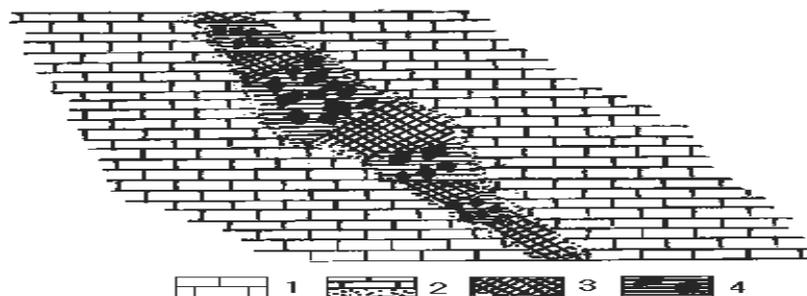


Рис. 14. Исландский шпат в раздуже кальцитовой жилы 9 (по Я.А. Левину): 1 – известняк; 2 – известняково-кальцитовая брекчия; 3 – жильный кальцит; 4 – глина с кристаллами исландского шпата

ИЗВЕСТНЯКИ И МЕЛ

Известняки – осадочные породы, в составе которых преобладает кальцит, реже арагонит. Массовая доля СаО в теоретически чистых известняках составляет 56,04 %, CO_2 – 43,96 %. Значительная доля чуждых примесей в известняках, в зависимости от вида примеси, уточняет их название: известняки окварцованные, битуминозные, фосфатизированные, железистые и др. Типичными примесями в известняках являются доломит и глины. Известняк, массовая доля глинистых примесей в котором более 20 %, называется *мергелем*. При массовой доле CaCO_3 78–80 % мергель называют «высоким», менее 71–76 % - «низким». Пористые известняки: *ракушечник*, *известковый туф (пильный камень)* – карбонатная порода, возникшая за счет осаждения карбонатов из холодных минерализованных вод; *травертин* – карбонатная порода (преимущественно арагонитовая), возникшая за счет осаждения карбонатов из вод горячих источников. *Гажга (известковая гажга, мел озерный, известняк луговой, лимнокальцит, известняк пресноводный)* – порошкообразная масса, отложенная в пресных водоемах в результате выпадения кальцита из растворов.

Мел – мягкая белая слабосцементированная пористая карбонатная порода, сложенная почти целиком (более 90 %) тонкозернистым кальцитом (0,5–10 мкм) в составе обломков кокколитофоридов и фораминифер, в меньшей мере иноцерамов, морских ежей и кораллов. Порошковатый кальцит, входящий в состав мела, составляет от 30 до 40 %. Излом породы землистый. При воздействии мела на другие предметы остается белый пачкающий след (пишущий мел). Меловые породы нередко загрязнены глиной и песком, реже другими минералами и породами. Основными посторонними химическими примесями являются оксиды алюминия и железа. В зависимости от массовой доли глинистых примесей CaCO_3 различают, %: мел чистый – более 95, мел глинистый – 90–95, меловой мергель – 80–90.

Мел глинистый и меловой мергель разделяют на разновидности: *глауконитовый* зеленоватого цвета, *кремнеземистый* и «*меловой туф*» (рыхлая порошкообразная порода с обломками кораллов и мшанок).

Карбонатные породы применяются в различных отраслях промышленности в соответствии с их составом, свойствами и текстурно-структурными особенностями строения. В общемировом балансе добычи и потребления минерального сырья потребление карбонатного сырья по объему уступает только потреблению песчано-гравийных материалов и превышает 3 млрд т/г. Более половины добытого сырья используется в производстве нерудных строительных материалов, второе место занимает металлургия, далее следуют химическое и сахарное производство, применение в сельском хозяйстве и др.

Известняки применяются в производстве строительных материалов, черных и цветных металлов, цементов, карбида кальция, кальцинированной соды, хлористого кальция, кормовых добавок, удобрений, строительной извести, лимонной кислоты и др. В качестве облицовочного и стенового строительного камня употребляются в большей степени светло-серые, серые, розовато-серые и кремовые известняки и доломиты с различной степенью декоративности и полируемости, известняки-ракушечники и травертиновые известняки (пильный камень). Объемная плотность сырья колеблется от 1 700 до 2 500 кг/м³. Предел прочности известняков при сжатии – от 4 до 63 МПа, пористость – от 2,6 до 36 %, водопоглощение – от 1,0 до 16 %.

Для применения карбонатных пород в качестве бутового камня (размер кусков 150–500 мм) для кладки фундаментов, наружных и внутренних стен и других элементов зданий и сооружений плотные известняки и доломиты должны иметь прочность на сжатие не менее 10 МПа, морозостойкость более 15 циклов (замораживания – оттаивания), примесь глинистых частиц не более 10 %. Кроме того, бутовый камень используется в качестве заполнителей для бетонов, который применяется для возведения бетонных и массивных железобетонных сооружений и отмолок. Бутовый камень не должен содержать глину, мергель, а также видимые расслоения, определяемые визуальным осмотром.

В большем объеме строительный известковый и доломитовый камень используется в виде щебня (размер кусков 5–70 мм, редко больше) как наполнитель бетонов. Прочность на сжатие такого наполнителя не должна быть менее 20 МПа, дробимость в цилиндре (по потере массы) не более 60 %, морозостойкость не менее 15 циклов, объемная плотность не менее 1 800 кг/м³, примесь глинистых частиц не более 6 %. Для наполнителей легких бетонов (щебень и песок из известняков-ракушечников и пористых известняков и доломитов) эти требования могут быть снижены. Объемная насыпная плотность такого сырья может быть менее 300 кг/м³.

Плотные однородные микрозернистые известняки применяются в небольшом количестве в качестве литографского камня. Они не должны

иметь песчанистых примесей. Минеральную крошку (5–20 мм), песок дробленный (0,14–5 мм) и порошок минеральный (0,071 мм) из карбонатных пород применяют для изготовления декоративных покрытий и изделий, наполнителей бетонов, асфальтобетонов, битумоминеральных смесей.

Для производства наиболее распространенного цемента – силикатного, называемого портландцементом, требуется известняковое сырье с массовой долей, % CaO – не менее 40, MgO – не более 4, сумма щелочей $K_2O + Na_2O$ – не более 1, SO_3 – не более 1,3 и P_2O_5 – не более 0,4. Этим условиям по составу отвечают так называемые мергели-натуралы. Обычно же известняки, мел или мергель используются с добавками глины, доменного шлака, золы, белитового шлама, кремнеземистых пород, пиритовых огарков, колошниковой пыли, бокситов или других ингредиентов для обеспечения силикатного ($n = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$) и глиноземного ($p = Al_2O_3 / Fe_2O_3$) модулей. Значение силикатного модуля шихты должно составлять от 1,2 до 3,5, значение глиноземного модуля – от 1 до 2,5.

Для производства белых и цветных цементов массовая доля CaO должна быть не менее 50 %, а массовая доля Fe_2O_3 – не более 0,35 %. Добавляемые при помоле клинкера пуццолановые добавки, кроме упомянутых выше, могут включать глиежи (горелые породы), цеолиты, отходы керамики, а также выветрелые диабазы и базальты. Известняки для производства строительной извести должны иметь массовую долю CaO не менее 40,32 %, MgO – не более 9,52 %, а сумма массовых долей кремнезема и полуторных оксидов (глинистые примеси) не должна превышать 20 %.

В металлургической промышленности в качестве флюсового сырья для доменного производства применяются известняки и доломитизированные известняки с суммарной массовой долей CaO + MgO не менее 50,5 % и массовой долей MgO не более 10 %. Расход известковистого сырья на выплавку одной тонны чугуна достигает от сотен килограммов до одной тонны. Для флюсовых и доломитизированных известняков в сталеплавильном и ферросплавном производстве массовая доля должна быть, %: CaO + MgO – не менее 51,0, (при MgO не более 5), SiO_2 – не более 3, S – не более 0,9, F – не более 0,6. Расход флюсовых известняков и доломитов на выплавку одной тонны стали достигает более сотни килограммов.

В производстве конвертерной извести суммарная массовая доля CaO + MgO не должна быть менее 51,5 %, SiO_2 – не более 2,8 %, а допуски по сере и фосфору аналогичны их массовым долям в предыдущем случае. Флюсовые известняки для медного производства применяются при массовой доле CaO не менее 48 %, а массовой доле нерастворимого остатка не должна превышать 10 %. Известняки, использующиеся в производстве извести для цианирования и флотации, плавки и обогащения оловянных и сурьмяных руд, а также для производства глинозема, должны иметь массовую долю CaO не менее 52 %, MgO – не более 1,5 %, SiO_2 – не более 3 %. Для получения одной тонны глинозема расходуется от 5 до 7 т известняка. Для плавки окисленных

никелевых руд в известняковом флюсовом сырье массовая доля CaO не должна быть менее 55 %, для плавки свинцовых руд – менее 47 %.

Для производства карбида кальция, щелочей (едкого натра, едкого калия) и хлора, а также целлюлозно-бумажного производства массовая доля CaO не должна быть менее 53 %. Вредными примесями при этом являются оксиды магния (не более, соответственно, 1,0; 1,5; 1,2 %), кремнезем (не более, соответственно, 2, 3, 1,8 %), учитываются также массовые доли серы и фосфора. В производстве стекла используются известняки с массовой долей, %: CaO – не менее 51, MgO и Fe₂O₃ – не более 2,5, Fe₂O₃ – не более 0,3, Al₂O₃ – не более 1,5. В производстве стеклянной ваты применяется известняки с массовой долей, %: CaO – не менее 48,15, MgO – не более 3,66, SiO₂ – не более 5,97, Fe₂O₃ – не более 1,33, Al₂O₃ – не более 0,69.

Для применения карбонатного сырья в виде подкормки и для производства комбикормов массовая доля CaO должна быть не менее 47,6 %, вредными примесями при этом являются CaSO₄, S, Pb, As, SO₃, которые не должны превышать, соответственно, 5; 5; 0,15; 0,012; 0,08 %. При известковании кислых почв используется известковая мука с суммарной массовой долей CaCO₃ + MgCO₃ не менее 85 %. В меньших количествах известняковое сырье применяется для производства хлорной извести, химически осажденного мела и гидроксида кальция, фосфатных удобрений, сахара, лимонной кислоты и др.

Товарный мел используется в виде мела комового, молотого, молотого сепарированного, молотого сепарированного гидрофобизированного, молотого обогащенного и химически осажденного. Широкое применение мела в различных отраслях промышленности обусловлено важнейшими свойствами сырья: белым цветом, малой гигроскопичностью, показателем преломления $n = 1,56$, объемной плотностью от 1 360 до 2 800 кг/м³, низкой твердостью (менее 1), высокой дисперсностью (более 99 % частиц имеют размеры менее 0,01 мм и почти половина – менее 0,002 мм), формой частиц, приближающейся к округлой. Кроме того, мел отличается, низкой растворимостью в воде, химической стойкостью по отношению к щелочам, способностью гидрофобизироваться, чистотой химического состава и др.

В сыром виде мел разделяют на «комовый» и «рыхляк» (легко рассыпающийся). *Комовый мел* представляет собой крупные куски, получаемые на месте добычи без последующей обработки. Он применяется в строительстве и для ремонта зданий и сооружений, для производства извести, в стекольной, керамической и других отраслях промышленности. Кусковой мел должен иметь массовую долю CaCO₃ + MgCO₃ в пересчете на CaCO₃ не менее 90 %. *Молотый мел* получают путем размола мела комового и применяют в тех же отраслях и с теми же ограничениями, как и комовый, кроме производства извести. В сельском хозяйстве молотый мел используют для известкования кислых почв (химический мелиорант) и производства

комбикормов. Для подкормки птицы и животных применяется мел с массовой долей нерастворимого остатка менее 5 %, массовая доля $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ в пересчете на CaCO_3 не должна быть ниже 85 %, мышьяка – менее 0,015 %, тяжелых металлов и бария – менее 0,008 %, влажности – менее 10 %, металлических примесей размером до 2 мм – менее 100 мг/кг. Тонина помола регулируется соответствующими НТД. В производстве стекла применяется мел с массовой долей CaCO_3 не менее 97 % (массовая доля Fe_2O_3 не должна быть более 0,1 %). При разведочных работах оцениваются также массовые доли других красящих оксидов (титана, марганца и хрома).

Комовый и молотый мел применяют для покрытия электродов, используемых при дуговой сварке металлов. Массовая доля углекислого кальция в сырье для производства электродов не должна быть меньше 96 %, массовая доля нерастворимого в соляной кислоте остатка – не более 2,0 %, массовая доля серы и фосфора – не более 0,04 % каждого. Массовая доля влаги для комового мела не более 6,0 %, молотого – не более 2,0 %.

Мел молотый обогащенный получают обогащением природного мела и применяют в качестве наполнителя в резиновой, кабельной, лакокрасочной и полимерной промышленности. Легкая диспергируемость, округлая форма частиц, слабая растворимость в воде, способность гидрофобизироваться с помощью органических веществ являются чрезвычайно ценными свойствами мела как наполнителя резины. Массовая доля $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ в пересчете на CaCO_3 для производства резины должна быть не менее 98,5 %. Массовые доли свободной щелочи в пересчете на CaO , марганца и водорастворимых веществ в сырье не должны превышать 0,010 % каждая. Массовая доля полупрозрачных оксидов железа и алюминия – не более 0,4 %, в том числе оксида железа не более 0,15 %, меди – не более 0,001 %. Учитываются также массовая доля влаги (не более 0,15 %) и доля ионов SO_4 и Cl в водной вытяжке (не более 0,05 %). В производстве соды используется дробленый мел с массовой долей 90–97 % CaCO_3 . Для производства в лакокрасочной (клеевые краски) и полимерной промышленности массовая доля карбонатов в пересчете на CaCO_3 несколько ниже – не менее 98,2 %. Для этого вида использования мела, а также для его использования в парфюмерной, медицинской, пищевой отраслях учитывается показатель коэффициента отражения, который не может быть ниже 85 %.

В парфюмерной, косметической, медицинской и других отраслях, а также в производстве резины используется и *химически осажденный мел*, получаемый при обработке гашеной извести углекислотой, массовая доля CaCO_3 в сырье достигает при этом 98 %. Химически осажденный мел имеет наименьший размер частиц (средняя величина не превышает 0,4 мкм). Мел применяется также при изготовлении цемента, эбонита, клеенок, кожзаменителей, в производстве соды, паст, шпаклевок, замазок и др. Требования к качеству мела, применяемого для производства извести, аналогичны требованиям к известнякам.

Известняки широко распространены в разных странах мира. Запасы их в России составляют по промышленным категориям около 12 млрд т в более чем 800 месторождениях. В 1996 г. в России добыто 78,4 млн м³ известняков, запасы мела промышленных категорий составляют более 3 млрд м³. Около 80 % этих запасов мела учтены в балансе цементного сырья. Ежегодная добыча составляет более 28 млн т. В зарубежных странах высококачественное меловое сырье добывается во Франции, Великобритании и Дании.

Основными геолого-промышленными типами месторождений карбонатных пород являются: 1) осадочные геосинклинальные и платформенные; 2) метаморфические; 3) карбонатитовые.

Классическим примером *осадочных геосинклинальных месторождений* служит Новороссийская группа месторождений цементных известняков в районе г. Новороссийска. Верхнемеловая толща карбонатно-терригенных отложений мощностью около 2 000 м слагает крыло антиклинальной складки. Продуктивная маркхотская свита мощностью 250–300 м сложена карбонатными и глинистыми породами, тонко и ритмично переслаивающимися между собой. Мощность карбонатных прослоев в продуктивной свите от 0,02 до 1,0 м, мощность глинистых прослоев от 0,5 до 4 см. По массовой доле CaCO₃ породы подразделяются на «высокие» мергели (более 75 %) и «низкие» (менее 75 %). На месторождении Новороссийск 1 мощность продуктивной толщи высоких и низких мергелей от 100 до 250 м. Вредные примеси находятся в допустимых пределах. Пласты падают в основном под углами 23–80°. В целом полоса месторождений цементных известняков и мергелей в районе г. Новороссийска протягивается более чем на 50 км. Месторождения интенсивно разрабатываются: добыча известняков достигает 8 млн т/г. Месторождения подобного генезиса широко распространены на территории России.

Осадочные платформенные месторождения известняков и мела связываются с трансгрессиями моря при спокойном тектоническом режиме и равнинном характере рельефа. Известняк и мел отлагались в условиях теплого гумидного климата.

По масштабам месторождения мела подразделяют на крупные (более 7 млн т) и средние (менее 7 млн т).

Все месторождения мела приурочены к отложениям верхнего отдела меловой системы. По условиям образования они являются осадками морского бассейна, а по составу – переходными от органогенных известняков к известнякам химического происхождения. Форма залежей пластовая или пластообразная. Практически все эти месторождения можно отнести к одному геолого-промышленному типу осадочных платформенных месторождений, однако ряд исследователей выделяет промышленные типы месторождений мела в зависимости от химической чистоты сырья, горнотехнических и экономических условий отработки месторождений.

Месторождения мела развиты широко в пределах Восточно-Европейской и Сибирской платформ. Типичными примерами месторождений являются месторождения мела Вольской группы (Саратовская область, район г. Вольска). Мощность мело-мергельной пачки, залегающей здесь среди верхнемеловых песчанистых и глинистых пород, составляет от 6,4 до 66 м. В пределах пачки сверху вниз выделяют: 1) мел белый; 2) мел промежуточный; 3) мел мергелистый. Залегание пород близко к горизонтальному. Массовая доля СаО составляет от 50,73 до 54,19 %.

ДОЛОМИТ

Доломит – $\text{CaMg}(\text{CO})_3$, довольно широко распространен в природе. Теоретический состав доломита, масс. %: СаО 30,41; MgO 21,86; CO_2 7,73. Структура доломита образуется в результате попеременного замещения атомов кальция через один атомами магния. Структура тригональная, параметры элементарной ячейки следующие: $a = 4,842$, $c = 15,95$, $z = 3$. Характерны кристаллы ромбоэдрической формы или таблитчатые с обычно горизонтальной штриховкой, часто изогнуты или сложены отдельными индивидами, субпараллельная ориентировка которых придает им седловидную форму. Агрегаты плотные массивные, зернистые, реже почковидные скрытокристаллические. Спайность совершенная по ромбоэдру {1011}. Объемная плотность 2,85. Твердость 3,5-4. Излом полураковистый. Цвет бесцветный, белый, серый с желтоватыми, красноватыми или коричневатыми оттенками. Черта белая. Прозрачен до просвечивающегося. Блеск стеклянный до перламутрового. Магний в доломите частично замещается железом, реже кобальтом и цинком. Массовая доля марганца может достигать нескольких процентов. Растворим в кислотах с выделением CO_2 .

Доломитами называют также осадочные породы, в составе которых преобладает доломит (массовая доля $\text{Ca, Mg}(\text{CO})_3$ более 50 %). Типичными примесями в доломитах являются кальцит, анкерит, магнезит, сидерит, оксиды железа, кварц и глины. Между известняками и доломитами существуют постепенные переходы (доломитистый известняк, известковистый доломит). Природные и технологические типы доломитов различаются по компонентному составу и наличию примесей: *доломит* – примесь кальцита 0–10 %; *известковистый доломит* – примесь кальцита 9–50 %; *глинистый доломит* – примесь глинистого материала 10–25 %; *известково-глинистый доломит* – примесь кальцита 10–45 % и глинистого вещества 10–25 %.

Применение доломитового сырья имеет свои особенности, связанные с повышенной массовой долей MgO. Доломит сырой металлургический предназначается для высокотемпературного обжига – получения металлургического доломита, который используется для подсыпки порогов и

заправки мартеновских и двухванных печей. Для этих целей массовая доля MgO не должна быть менее 12 %. Вредными примесями являются SiO₂ (не более 6 %) и полуторные оксиды (Al₂O₃ + Fe₂O₃ – не более 5 %). Дробленый доломит после обжига во вращающихся печах применяется для изготовления безобжиговых магнезит-доломитовых и доломитовых изделий для футеровки кислородных конвертеров. Массовая доля MgO для этой цели не должна быть менее 19 %, вредными примесями являются: CaO – не более 33 %, SiO₂ – не более 1,3 %, полуторные оксиды (Al₂O₃ + Fe₂O₃) – не более 2 %. В то же время для доменного и агломерационного производства доломиты применяются в качестве флюса. Для этой цели массовая доля MgO должна быть более 16 %, вредными примесями являются SiO₂ (не более 5 %), полуторные оксиды (не более 4 %). Для применения доломита в качестве флюса учитывается также предел прочности его на сжатие – не ниже 20 МПа.

Производство стекла требует доломитовое сырье с массовой долей, %: MgO – не менее 18 (при CaO – не более 34), SiO₂ – ниже 5, Fe₂O₃ – ниже 0,4 и Al₂O₃ – ниже 2,5. Для получения керамики, глазурей в электрокерамике массовая доля должна быть, %: MgO – не меньше 19, CaO – не более 32,5, Fe₂O₃ – не более 0,05, Al₂O₃ – не более 0,5 и SiO₂ – не более 3.

Для производства стеклянной ваты и других стеклянных волокон применяются доломиты с массовой долей MgO и CaO, соответственно, 19,9 и 32 %. Вредной примесью является Fe₂O₃, массовая доля которого не должна превышать 0,02 %. Быстротвердеющий доломитовый цемент для производства ксилолита и совелита получают, обжигая доломит при температуре 750–800 °С с добавлением хлорида или сульфата магния.

Для производства строительной извести доломиты не должны содержать более 21,4 % MgO и 8 % потерь при прокаливании, а массовая доля CaCO₃ должна составлять в них более 26,3 %.

Доломиты, используемые для производства соды и оксида магния, должны иметь массовые доли MgO и CaO, соответственно, более 19,5 и 30,0 %. В химической промышленности для производства хромонатриевых солей применяют доломит в качестве компонента смеси с массовой долей MgO не менее 17 %, CaO – 30 %, SiO₂ + R₂O₃ – не более 4 %. Кроме того, доломит особой чистоты используется для производства белой магнезии (5MgO·4CO₂·6H₂O), жженой магнезии-упса, сернокислого и хлористого магния. В связи с меньшей температурой диссоциации доломитов их применение для производства технической углекислоты предпочтительнее применения известняков. Общие требования к доломитам для химической промышленности отсутствуют, однако доломиты Первоуральского рудоуправления, пригодные для использования в этой области, должны иметь массовую долю MgO не менее 12 % и массовую долю R₂O₃ не более 5 %.

В производстве удобрений доломит используется в качестве добавки к тукам из аммиачной селитры для обеспечения неслеживаемости удобрений.

Для этой цели доломиты должны содержать, %: MgO – не менее 19–20, CaO – не менее 32–33, SiO₂ – не более 2,5, R₂O₃ – не более 1,5.

Доломиты пригодные для применения в целлюлозно-бумажной промышленности должны иметь массовую долю, %: MgO – не менее 14,4, SiO₂ – не более 0,5–2,0, а R₂O₃ – не более 3.

Для производства абразивных материалов (полирование стекла и металлов) используют доломитовую муку и обожженный доломит («венская известь»). Венская известь применяется не только для полирования никеля, бронзы и меди, но также и других материалов – целлюлозы, перламутра и др. Она используется в виде паст с жирами или теста с водой также в гальванотехнической, автомобильной и химической отраслях промышленности. Для производства венской извести доломиты должны содержать, %: MgO – не менее 19,5, CaO – не менее 32,5, нерастворимого остатка – не более 2.

Для производства лаков и красок требуется высокая белизна сырья – более 90 %, высокая массовая доля MgO (не менее 20 %), SiO₂ не более 1,0 % и R₂O₃ не более 1,5 %.

Для нейтрализации сернокислых сточных вод и стабилизационной обработки воды применяются фильтры из доломита с массовой долей MgO не менее 20 %, R₂O₃ + SiO₂, в том числе SiO₂, не более 1 %.

В резиновой промышленности тонко размолотый доломит применяется в качестве наполнителя для ускорения вулканизации каучука и придания твердости изделиям. Вредной примесью в доломите является марганец, вызывающий старение резины из натурального каучука.

В производстве кож применяется доломитовая известь для удаления волосяного покрова, для размельчения, сглаживания кож и для приготовления дубителей. Доломитовое сырье в этом случае должно быть пригодно для производства наиболее жирной извести.

Доломитовая мука, применяемая в сельском хозяйстве для раскисления почв, как антисептик и источник магния, должна удовлетворять следующим требованиям: массовая доля CaCO₃ + 1,2 MgCO₃ (в пересчете на CaCO₃) – не менее 85 %, влаги в пылящей муке – не более 1,5 %, в слабопылящей – 6 %.

В России и других странах СНГ запасы доломита для флюсов и огнеупоров 3 180 млн т, для производства строительных материалов – около 700 млн т. Для производства стекла, огнеупоров и флюса добыча составляет более 20 млн т.

Наибольшие объемы добычи доломитов за рубежом в Великобритании, Канаде, Японии, Бельгии, США, Испании и Индии.

По запасам, млн т, месторождения доломитов подразделяются: на большие (более 100), средние (10–100) и мелкие (менее 10).

По происхождению доломиты классифицируются на *эндогенные* и *экзогенные*. Основная масса доломитов образовалась в экзогенных условиях.

Среди экзогенных доломитов различают *морские* и *континентальные* (при значительном преобладании морских месторождений). По условиям образования доломиты разделяются большинством исследователей на первично-осадочные и метасоматические. Основным геолого-промышленным типом месторождений доломитов являются морские осадочные (седиментационные хемогенные) месторождения с большими масштабами, выдержанностью пластов по мощности, чистотой химического состава, высокой массовой долей MgO и незначительной пористостью. Континентальные месторождения доломитов образуются в условиях бассейнов озерного типа и имеют небольшое промышленное значение. Метасоматические доломиты образуются в эндогенных и экзогенных морских и континентальных условиях в основном за счет процессов инфильтрационного метасоматоза, характеризуются незначительными масштабами, невыдержанностью состава, изменчивой мощностью и сложной морфологией залежей.

Морские осадочные месторождения доломитов достаточно широко, хотя и неравномерно, распространены на территориях России. Типичными представителями таких месторождений являются Лисьегорское (на Урале) и Щелковское (в Московской области).

Лисьегорское месторождение расположено в Челябинской области и относится к осадкам нижнего карбона. Мощность пластообразной залежи доломитов, приуроченной к крылу синклинали достигает от 180 до 500 м. Углы падения залежи 25–35°. Массовая доля MgO составляет в среднем 19,73 % и колеблется незначительно.

Щелковское месторождение представлено почти горизонтальной пластообразной залежью доломитов верхнего карбона. Средняя мощность залежи составляет 12 м при средней массовой доле MgO 19,73 %.

Доломиты образуются преимущественно в условиях аридного климата. Для месторождений характерна чистота состава, MgO – от 0,30 до 0,54 %.

МРАМОР

Мрамор – метаморфическая порода, в составе которой преобладают перекристаллизованные кальцит и доломит. По преобладанию одного из минералов среди мраморов выделяют *кальцитовые* и *доломитовые разности*.

Мраморы в большей степени, чем другие карбонатные породы, применяются в качестве декоративного облицовочного и строительного камня. Блоки, добываемые из массива горных пород для производства облицовочных изделий, должны обладать декоративными свойствами для изготовления облицовочных плит, архитектурно-строительных изделий и других облицовочных материалов. Выход блоков из горной массы составляет обычно 10–30 %. Форма блоков – прямоугольный параллелепипед или

близкая к нему. По виду поверхности такие блоки подразделяются на пиленые и колотые.

Мраморы и мраморизованные известняки относятся к породам средней прочности (табл. 2). На поверхности блоков не допускается более одной трещины тектонического происхождения шириной не более 0,05 мм и длиной не более $\frac{1}{3}$ наименьшего размера граней, распространяющейся на две смежные грани.

Таблица 2.

Характеристика мраморов, известняков и доломитов

Породы	Предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа, не менее	Коэффициент снижения прочности при насыщении водой, не менее	Марка по морозостойкости, циклы, не менее
Мраморы и мраморизованные известняки	40	0,7	25
Плотные известняки и доломиты, травертины	20	0,65	25
Пористые известняки и доломиты	10	0,65	25
Известняк-ракушечник	10	0,65	15

Отходы при добыче блоков применяются для производства декоративных плит, декоративного щебня и песка, известковой муки и др. Камни и блоки стеновые выпиливаются в виде прямоугольных параллелепипедов определенного размера и разделяются на рядовые и лицевые. Рядовые камни предназначаются для кладки стен зданий и сооружений с последующим оштукатуриванием. Расслоения, прослойки глины и мергеля в лицевых и рядовых камнях не допускаются.

Достаточно высокое удельное объемное электрическое сопротивление мраморов обусловило их применение в электротехнике не только в качестве щитов, но и в качестве наполнителя цоколевочной мастики. Для этой цели используется крошка мраморная электротехническая. Для изготовления крошки применяют белый, светло-розовый, светло-голубой и светло-серый мрамор, имеющий в составе массовую долю CaCO_3 не менее 91 %, MgCO_3 – не более 5 %, сумму нерастворимого в соляной кислоте остатка и полуторных оксидов алюминия и железа не более 4 %, с удельным электрическим сопротивлением более 10 Ом·см, электрической прочностью при постоянном напряжении более 2 кВ/мм, влажностью менее 7 %. Размер поставляемой

фракции от менее 5 до 40 мм. Мрамор для изготовления сварочных материалов применяется в виде порошка, крошки и кусков. В таком сырье массовая доля не должна быть, %: CaCO_3 – менее 92, SiO_2 – более 2, MgO – не более 3, серы – не более 0,04, фосфора – не более 0,015.

Метаморфические месторождения мраморов и мраморизованных известняков образуются при региональном и контактовом метаморфизме осадочных толщ. Классическим примером является крупное Кибик-Кордонское месторождение мраморов в Хакасии. Мраморы в виде линзы приурочены к нижней части протерозойской джебашской серии. Длина тела по простиранию 18 км, мощность до 1 км, угол падения до 80° . На западе мраморы контактируют со Щербельским гранитоидным интрузивом. В пределах тела мраморов установлены дайки диабазов мощностью от 0,2 до 5,5 м. Прослоем сланцев залежь мрамора разделена на два пласта – Северный и Южный. Южный пласт слагают белые, розовато-белые, сырые, темно-серые и кремовые мраморы, Северный – преимущественно розовато-белые. Мраморы хорошо полируются. Выход блоков составляет до 30 %, выход облицовочных плит – от 16 до $40 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Высокое качество мрамора позволило использовать его при строительстве наиболее известных зданий городов края и Красноярска.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности карбонатного сырья.
2. Охарактеризуйте области применения исландского шпата, известняка, доломитов, мраморов.
3. Перечислите основные вредные примеси в известняках и доломитах.
4. Какие геолого-промышленные типы месторождений карбонатного сырья вам известны?
5. Приведите примеры промышленных месторождений карбонатного сырья.

ПЛАВИКОВОШПАТОВОЕ СЫРЬЕ

Кларк фтора в земной коре 0,066, в гранитоидах – 0,08. Повышенной массовой долей фтора отличаются также некоторые щелочные и ультраосновные породы, иногда осадочные породы (глины). В природе фтор представлен одним изотопом ^{19}F . Фтор содержится во многих минералах, однако промышленными являются флюорит (плавиковый шпат) CaF_2 , криолит $3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$ и фторапатит. Главным промышленным минералом является флюорит.

Флюорит обычно образует агрегаты кубических кристаллов фиолетового, голубого, зеленого или желтого цвета, имеющие твердость 4 и

плотность 3,18 г/см³. Прозрачные бесцветные или слабоокрашенные кристаллы флюорита называются *оптическим флюоритом*, землистые разновидности – *ратовкитом*, плотные тонкозернистые – *фарфоровидным флюоритом*. Температура плавления флюорита 1 270–1 350 °С.

В промышленности флюорит наиболее широко используется в металлургической и химической отраслях. В металлургии флюорит применяется в качестве флюса при получении высококачественного чугуна, сталей в мартеновских и электропечах. В черной металлургии могут использоваться бедные карбонатно-флюоритовые руды с массовой долей флюорита более 3 %. Их применение увеличивает производительность металлургических печей и снижает расход кокса. Такие руды применяются также для получения флюоритизированных железорудных окатышей. Бедные руды используются для получения растворов фтористого натрия и криолита аммиачным или щелочным способом.

Обычно флюоритовые руды подвергаются обогащению флотационным, гравитационным и другими способами. Низкосортными рудами считаются флюоритовые руды с массовой долей флюорита 15–35 %, средними по качеству – 35–75 %, высокосортными – более 75 %. Концентраты, полученные в процессе обогащения, применяются в качестве флюсов при выплавке сталей и чугуна (табл.3).

Кремнезем является вредной примесью, его массовая доля может меняться в зависимости от марки сырья от 2 до 30 %. Вредными примесями в металлургическом сырье являются также сера (допустимы массовые доли от 0,15 до 0,30 %) и фосфор (допустимы массовые доли от 0,1 до 0,3 % в зависимости от марки сырья). В химической промышленности используются флотационные концентраты (ФФ – флюорит флотационный) следующих марок: ФФ-90 – для производства плавикошпатовых брикетов, ФФ-92Б – для производства стекла и полевошпатовых брикетов, ФФ-92А – для производства плавиковой кислоты, фтористых солей и стекла, ФФ-95Б – для производства стекла, безводной HF и силикатных эмалей повышенного качества.

Марка флюорита ФФ-95А употребляется для производства электролитического алюминия, плавиковой кислоты и безводного HF, стеклянных термостойких труб, стеклянных шариков, стекловолокна – «забелитель» стекла, высококачественных силикатных эмалей. Марка ФФ-97Б используется для производства фтористых солей, марка ФФ-97А – для производства фтористых соединений высокой чистоты, безводной HF, плавиковой кислоты и фтористых солей. Кроме перечисленных выше вредных примесей, исключая фосфор, для флюорита, используемого в химической промышленности, вредной примесью является также примесь CaCO₃ (не более 1–4 % в зависимости от марки сырья). Преимущественное применение флюоритового сырья в металлургии и химии отражается в разделении его за рубежом на металлургический и кислотный сорта.

Таблица 3

Использование концентратов флюорита в металлургии

Массовая доля флюорита, %	Марки концентрата	Область применения
55–65	ФГ-55, ФГ-65, ФК-65	Для выплавки сталей и чугуна
75–85	ФМГ-75, ФГ-75, ФК-75, ФГ-85, ФК-85	Для выплавки средне- и низколегированных сталей
Не ниже 92	ФГ-92, ФК-92	Для выплавки сталей в электродуговых печах и конвертерах
Не ниже 95	ФК-95А, ФК-95Б	Для выплавки высоколегированных сталей и сплавов

примечание. Условные обозначения: Ф – флюорит; Г и К –соответственно, гравитационный и кусковой (концентраты); М – мелкий концентрат; А и Б – пониженная или повышенная массовая доля кремнезема.

Заметное место в применении флюорита занимает производство сварочных материалов. Для производства сварочных флюсов общего назначения используются флюоритовые кусковые, гравитационные и флотационные концентраты с массовой долей флюорита от 75 до 92 %, для производства порошковой проволоки, электродов и сварочных флюсов общего назначения – 95–97 % (марки ФКС-95Б, ФФС-95, ФФС-97Б, буква С – сварочный), для производства сварочных электродов и флюсов специального назначения – 95–97 % (марки ФКС-95А и ФФС-97А). Вредными для производства сварочных материалов являются все вышеперечисленные примеси, включая фосфор.

Наиболее высокие требования к сырью предъявляет производство оптических монокристаллов фторида кальция, массовая доля флюорита должна быть не менее 99,5 %, а количества примесей Si, Al, Mg, Fe, Ba, Sr и суммы Cu + Cr + Mn + Mo + Sn не должны превышать первых тысячных долей процента, размеры монокристаллов – 5–35 мм. Природные оптические флюориты встречаются достаточно редко и к ним применяются очень жесткие требования (бесцветность, бездефектность, размеры не менее 6х6х5 мм, высокая прозрачность в ультрафиолетовой и инфракрасной областях). Потребность же в оптическом флюорите высока. Он используется в производстве линз для объективов, призм для спектрографов, монохроматоров, тепловизоров, окон приборов и др. Фтор, получаемый из фторсодержащего сырья, широко применяется при производстве полимеров (тефлон и др.), термостойкого фторкаучука, фторсодержащих жидкостей и паст используемых в производстве трансформаторных масел, медицине, компонентов ракетного топлива, в производстве фреонов, криолита, кремнефтористого магния для кислотостойких бетонов и др.

Мировые запасы флюорита оцениваются в 246 млн т. Большая часть из них сосредоточена в ЮАР и Мексике. В год в мире добывается более 3 млн т флюорита. Ведущими странами по добыче и экспорту флюорита являются Мексика, ЮАР и Таиланд, крупнейшими потребителями и импортерами – США и Япония. Цены на флюорит кислотного и металлургического сортов составляют от 100 до 130 дол./т.

По масштабам месторождения флюорита подразделяются, млн т.: на очень крупные – свыше 10, крупные – 5–10, средние – 2–5, мелкие – 0,5–2. Некоторая часть флюоритового сырья добывается попутно из полиметаллических и других руд. Собственно флюоритовые месторождения разрабатываются при массовой доле флюорита более 30 %.

Промышленный интерес представляют месторождения флюорита с запасами не менее сотен тысяч тонн, поэтому наиболее важными геолого-промышленными типами месторождений являются пегматитовые месторождения оптического флюорита, карбонатитовые (флюорит-редкоземельные) месторождения, грейзеновые и гидротермальные месторождения.

Пегматитовые месторождения оптического флюорита редки, на территории СНГ они известны в ряде районов Казахстана. Запасы месторождений небольшие и к промышленным эти месторождения относятся исключительно в связи с особой ценностью сырья. Месторождения связаны с крупными камерами часто трубообразной формы, заполненными глинистой массой и содержащими кристаллы оптического флюорита, раухтопаза, мориона и горного хрусталя. Размеры кристаллов флюоритов до десятков сантиметров. Внешними зонами месторождений являются кварц-полевошпатовые гранитные пегматиты, залегающие в двуслюдяных или мусковитовых разностях гранитов, реже среди осадочных пород.

Карбонатитовые (флюорит-редкоземельные) месторождения известны в Намибии, ЮАР и на территории СНГ. Примером таких месторождений может служить месторождение Амба-Донгар (Индия) в районе штата Гуджарат в 35 км к югу от г. Чхота. Месторождение приурочено к массиву ультраосновных-щелочных пород мел-эоценового возраста диаметром около 6,5 км. Массив имеет форму купола, прорывающего верхнемеловые песчаники и известняки и частично перекрытого потоками базальтов. Флюоритоносные карбонатиты с конической формой залежи слагают кальдеру проседания и ряд тел жиллообразной и неправильной формы на склонах купола. Контакты рудных тел с вмещающими породами постепенные и характеризуются развитием фенитизации. В состав карбонатитов, кроме крупнозернистого кальцита, доломита, анкерита, кварца, полевого шпата и флюорита, входят мартитовая, баритовая, нефелиновая и апатитовая минерализация, тантало-ниобаты и сульфиды. По запасам месторождение относится к очень крупным.

Грейзеновые месторождения (или, по данным разных авторов, *скарно-грейзеновые, грейзено-гидротермальные*) связаны с контактными зонами интрузий гранитоидов в преимущественно доломитовых и известняковых толщах. Примером может служить месторождение Солнечное (Казахстан, Карагандинская область, 3 км от поселка Джамбул (рис. 15)). Здесь Караобинский массив аляскитовых и лейкократовых гранитов пермского возраста прорывает эффузивные и терригенно-осадочные породы девона и карбона. Промышленные метасоматические руды слюдисто-топаз-грейзенового состава залегают среди известняков на 1 000 м по простиранию и до 170 м по падению. По составу руды карбонатно-флюоритовые, карбонатно-слюдисто-флюоритовые, карбонатно-топаз-флюоритовые. Текстуры руд массивные, полосчатые, брекчиевидные, прожилково-

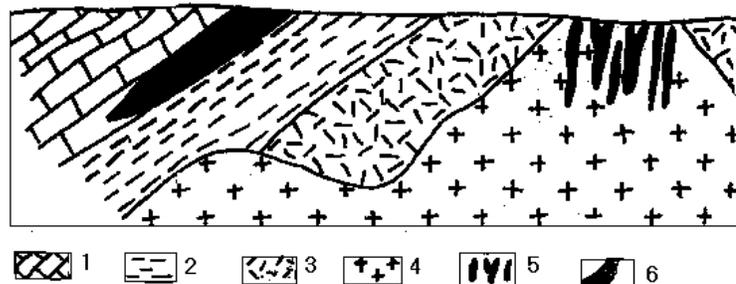


Рис. 15. Схематический разрез Солнечного месторождения (по А.Е. Карякину, П.А. Строна, Б.Н. Шаронову и др.): 1 – осадочные карбонатные породы; 2 – терригенно-осадочные породы; 3 – туфы; 4 – граниты; 5 – кварц-вольфрамитовые жилы (штокверк); 6 – плавиковошпатовое рудное тело

вкрапленные. Метасоматические руды группируются в рудные зоны, вытянутые субсогласно с известняками.

Среди рудных зон выделяются отдельные рудные тела седловидной формы мощностью от 0,5 до 20 м, вытянутые по простиранию на 10–70 м. Массовая доля флюорита в рудах от 15 до 50 %. Наиболее богаты на месторождении пролювиально-делювиальные руды. Более ранним по отношению к флюоритоносным грейzenам на месторождении является скарново-магнетитовый парагенезис, более поздним – комплекс секущих кварц-вольфрамитовых и кварц-молибденитовых жил и прожилков.

Гидротермальные месторождения (среднетемпературные, низкотемпературные, вулканогенные гидротермальные) имеют наибольшее значение среди промышленных месторождений флюорита. Крупные флюоритовые месторождения представлены чаще всего жилами и зонами брекчий протяженностью до первых километров при мощности от одного до десятка метров. Руды имеют простой состав, в котором флюорит играет

ведущую роль, в меньших количествах присутствуют кальцит, кварц, барит и сульфиды.

В России месторождения такого типа широко развиты в Забайкалье, например, Калангуйское в Восточном Забайкалье. Месторождение приурочено к зоне разлома секущей песчано-глинистые нижнеюрские отложения. Флюоритовая минерализация тяготеет к изгибам зоны разлома, где наблюдается наибольшая мощность флюоритовой жилы – до 6-7 м. В слабо минерализованной брекчиевидной породе прямолинейных участков разлома промышленная флюоритовая минерализация отсутствует. По падению флюоритовая минерализация прослеживается до 500 м. Наиболее богатыми являются центральные части жил. Наиболее распространены почковидные, кокардовые, корковые текстуры руд. Массовая доля флюорита в среднем составляет 75–85 %. Подобными месторождениями Читинской области являются Волдинское (рис. 16), а также Горинское, Шахтерское и др.

Единственное промышленное грейзеновое месторождение криолита Ивигтут в Гренландии уже отработано.

Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте области применения флюорита.
2. Назовите вредные примеси во флюоритах для металлургии.
3. Какова минимальная массовая доля флюорита в бедных рудах?
4. Какие сорта флюорита известны в мировой практике?
5. Перечислите геолого-промышленные типы месторождений флюорита?
6. Приведите примеры промышленных месторождений флюорита.

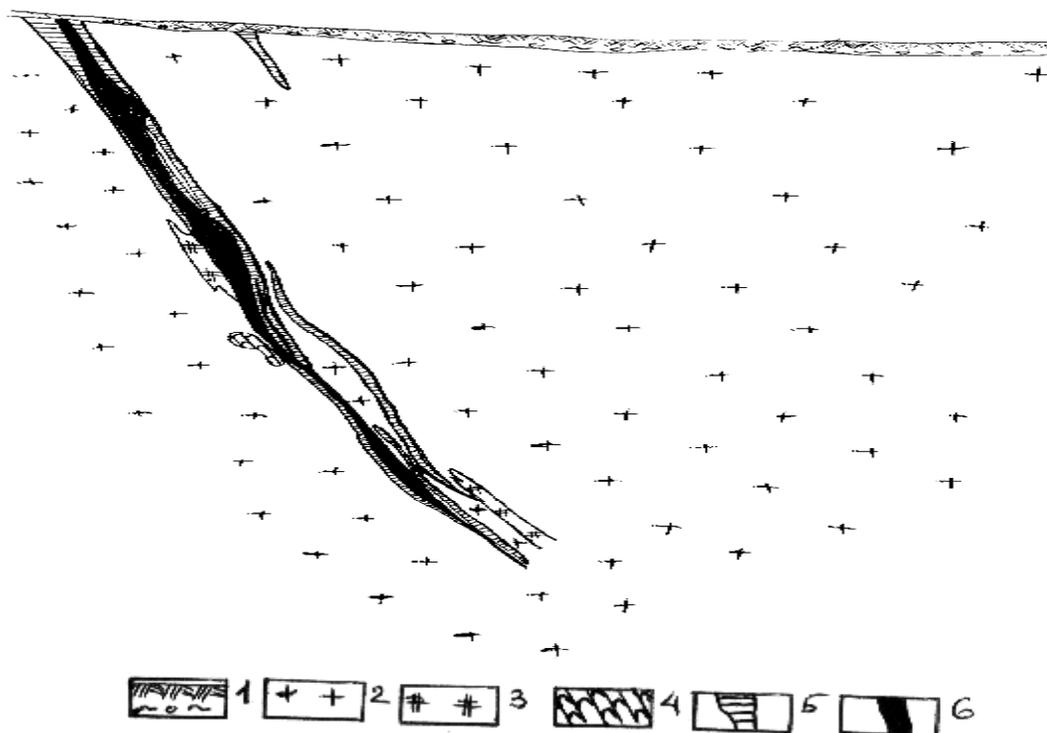


Рис. 16. Геологический разрез Волдинского месторождения флюорита (по В.М. Борзунову с упрощениями): 1 – почвенно-растительный слой и аллювиально-делювиальные отложения; 2 – граниты; 3 – андезиты; 4 – сланцы; 5 – брекчия гранита на кварцевом цементе; 6 – кварц-флюоритовая брекчия

ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТОЕ СЫРЬЕ

Кристаллы *корунда* Al_2O_3 принадлежат к гексагональной сингонии, как правило, они таблитчатые по {0001} до короткопризматических и дипирамидальных. В наждачных породах – массивные зернистые образования и округлые зерна. Спайность отсутствует, твердость 9, минерал хрупкий, однако мелкозернистые образования вязкие. Объемная плотность 4,0–4,1. Цвет синий (разновидность *сапфир*), красный (разновидность *рубин*), желтый (разновидность *драгоценный топаз*), желто-коричневый и зеленый (разновидность *драгоценный изумруд*), пурпурный до фиолетового (разновидность *драгоценный аметист*). Блеск от яркого полуметаллического до стеклянного. Температура плавления 2 050 °С.

Группу силикатов алюминия (андалузит, силлиманит, кианит), имеющих одинаковый основной состав (Al_2SiO_5), объединяет и их способность при нагревании превращаться в муллит $Al_6Si_2O_{13}$ и обогащенное кремнеземом стекло. Муллит плавится при 1 810 °С и в кислотах не растворяется, обладает повышенными прочностными и диэлектрическими свойствами.

Андалузит в кристаллах (ромбическая сингония) встречается редко, крупнозернистый, призматический с почти квадратными поперечными сечениями, чаще массивный. Спайность хорошая по {110}. Твердость 7,5. Удельный вес 3,15. Цвет белый, серый, розово-красный, зеленый (разновидность *виридин*), часто наблюдается дихроизм. Многие кристаллы содержат углистые включения (разновидность *хиастолит*).

Силлиманит редко встречается в виде кристаллов (ромбическая сингония), типичны тонковолокнистые и грубопризматические массы, спайность совершенная по {010}. Твердость 7. Удельный вес 3,24. Цвет белый, редко коричневый и зеленоватый. Блеск стеклянный, шелковистый в волокнистых разностях.

Кианит (дистен) обычно встречается в кристаллах (триклинный), а также образует пластинчатые массы. Кристаллы упругие, часто изогнутые и закрученные. Спайность совершенная по {100}. Твердость параллельно оси *c* 4-5, параллельно оси *b* 6-7. Удельный вес 3,63. Цвет пятнистый синий, белый, серый, зеленый. Блеск стеклянный, на плоскостях спайности перламутровый. Просвечивает до прозрачного.

Руды корунда – собственно корундовые и наждаки. *Собственно корундовые руды* кроме корунда содержат обычно плагиоклазы и слюды. Для *наждаков* характерен более сложный состав: корунд, хрупкие слюды, магнетит; минералами-примесями являются сульфиды, диаспор, кальцит, турмалин, апатит и серицит. В связи с тем, что корундовые руды в природе встречаются редко, промышленностью освоены методы получения искусственного корунда и его заменителей, однако значительную роль в получении высокоглиноземистого сырья играют комплексные месторождения кианита, андалузита, силлиманита и корунда. Собственно корундовые руды и наждаки применяются в основном для производства абразивов и в меньшей мере как добавки при производстве огнеупоров или упрочнения бетонных изделий. В производстве абразивов наждаки используются без предварительного обогащения.

Кианит, силлиманит и андалузит служат сырьем для получения высокоглиноземистых огнеупоров, специального фарфора и силумина. Огнеупоры используются в металлургии, производстве стекла и керамики, поскольку их огнестойкость выше огнестойкости шамота в 2–2,5 раза (футеровка металлургических печей, изготовление припаса для разлива металла и плавки стекла, изоляторы свечей для двигателей внутреннего сгорания и др.). Промышленностью используются руды высокоглиноземистых минералов с массовыми долями силлиманита и андалузита 10–15 %, кианита 10–30 %.

Мировая добыча корунда по данным Горного бюро США составляла в 1981 г. около 22 тыс. т. Из них более 20 тыс. т добывалось в Зимбабве. Высокоглиноземистое сырье добывается в количествах сотни тысяч тонн в

год. Стоимость корунда около 200 дол./т, андалузита 57–200 дол./т, силлиманита – 340 дол./т.

Драгоценные корунды встречаются в своеобразных пегматитах и скарнах, технические корунды – в щелочных (сиенитовых) пегматитах, однако основное промышленное значение имеют: 1) гидротермальные месторождения корунда с андалузитом; 2) контактово-метаморфические залежи наждака; 3) метаморфические кианит-силлиманитовые месторождения.

Гидротермальные месторождения корунда с андалузитом, залегающие обычно в пределах распространения вторичных кварцитов, обладают высоким качеством сырья и крупными запасами. Классическим примером месторождений этого типа является месторождение Семиз-Бугу в Казахстане (150 км к северо-востоку от г. Караганда). Вторичные кварциты в районе месторождения возникли за счет воздействия гранитоидной интрузии на девонские кварцевые и полевошпатовые порфиры. В пределах вторичных кварцитов установлено несколько коренных залежей корундового сырья, имеющих в основном линзовидные формы. Наиболее крупная залежь с размерами по простиранию 180 м при мощности 6–44 м и крутым до вертикального падением. Вмещающими породами служат андалузитовые и серицитовые вторичные кварциты. Основные минералы руд - корунд и андалузит. Минералами-примесями в рудах являются мусковит, гематит, кварц, диаспор, сульфиды, барит, пирофиллит, рутил. Диаметр зерен корунда от 0,1 до 6 мм. Массовая доля корунда и андалузита местами достигает 95 %.

В районе месторождения Семиз-Бугу выявлена делювиальная россыпь с массовой долей корунда до 14 %. Крупные делювиальные россыпи высокоглиноземистых минералов известны в Южной Африке, Индии и в Малагасийской Республике.

Контактово-метаморфические месторождения наждаков образуются на контактах основных и кислых интрузивных пород. Считается, что их происхождение связано с первично обогащенными глиноземом осадочными породами (Синангойское месторождение в Хакасии).

Метаморфогенные месторождения связаны с регионально метаморфизованными породами и представляют собой отдельные горизонты кристаллических сланцев и гнейсов, обогащенных высокоглиноземистыми минералами. Общеизвестным примером подобных месторождений является месторождения Кейвы на Кольском полуострове. Эта группа месторождений связана с кристаллическими сланцами кейвской серии нижнего протерозоя. Продуктивный горизонт кварц-кианитовых, ставролит-кианитовых и кианитовых сланцев имеет протяженность до 140 км по простиранию при мощности до 150 м. Преобладающие углы падения 45°. На отдельных месторождениях (Тяшп-Манюк) мощность пластообразного рудного тела 60–110 м при длине залежи до 4 км. Руды сложены кианитом (до 40 %), кварцем и мусковитом. Минералами-примесями в рудах являются ставролит,

плагиоклаз, графит, диксит, хлорит, биотит, гранат и клиноцоизит. Наиболее богаты кианитом крупноконкреционные руды. Они представлены почти мономинеральными скоплениями тонковолокнистого кианита и неравномерно распределены в кварц-слюдистой массе. Размер скоплений до 100 мм. Так называемые «параморфические руды» – агрегаты кианита по хиастолиту. Кроме конкреционных и параморфических типов на месторождении выделены игольчато-волокнистый и смешанный типы руд.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите ювелирные разновидности высокоглиноземистого сырья.
2. Охарактеризуйте области применения корунда, кианита, силлиманита, андалузита.
3. Какова минимальная массовая доля силлиманита, андалузита и кианита в рудах?
4. Перечислите геолого-промышленные типы месторождений высокоглиноземистого сырья.
5. Приведите примеры промышленных месторождений высокоглиноземистого сырья.

ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНОЕ СЫРЬЕ

В этом параграфе рассматривается нерастворимое в воде высокомагнезиальное сырье: магнезит и брусит, тальк и пирофиллит.

МАГНЕЗИТ И БРУСИТ

Теоретический состав магнезита $MgCO_3$ включает, %: 47,62 MgO, 52,38 CO_2 . Обычными изоморфными примесями являются Fe, Ca, Mg. Характерен изоморфный ряд: *магнезит* $MgCO_3$ – *брейнерит* $(Mg,Fe)CO_3$ – *сидерит* $FeCO_3$. Минерал в виде ромбоэдрических и призматических кристаллов встречается редко, образуя массивные грубо- до тонкозернистых или плотных, землистых до мелоподобных, пластинчатые или волокнистые агрегаты. Цвет белый, серовато-белый, желтый до бурого. Блеск стеклянный. Прозрачный до просвечивающего. Объемная плотность 3,0. При промышленном использовании термином «магнезит» называют породу, состоящую в основном из минерала магнезита с примесями гидромагнезита, талька, хлорита, кальцита, глинистого и углеродистого веществ.

Брусит $Mg(OH)_2$ содержит до 69 % MgO, гексагональный, имеет слоистую структуру, пакеты из двух слоев OH-групп, образующих плотнейшую гексагональную упаковку, параллельны $\{0001\}$. Между ними проложены слои из атомов Mg. Кристаллы редки, формы чаще в виде табличек параллельных базопинакоиду. Агрегаты пластинчатые субпараллельные, листоватые массивные или волокнистые с легко

разделяющимися упругими волокнами. Спайность совершенная, листочки гибкие и режущиеся. Твердость 2,5. Удельный вес 2,39. Цвет брусита белый до бледно-зеленого, светло-коричневый, серый или синий, *манганбрусита* – буро-красный. Блеск на поверхностях спайности перламутровый, на остальных поверхностях от воскового до стеклянного. Прозрачен. *Брусититы* – породы, состоящие из брусита с примесями кальцита, магнезита, доломита. *Бруситовые мраморы пенкатиты* и *предациты* содержат в составе, соответственно, ведущую и подчиненную массовые доли брусита.

Магнезиты больше, чем брусититы, распространены в природе и значительно чаще используются промышленностью. Магнезиты и брусититы применяются в промышленности в сыром и термически переработанном виде. В сыром виде магнезит (массовая доля MgO – не менее 39 %, CaO – менее 7 %, Fe₂O₃ – менее 2,5 %) используется для производства спеченых, периклазовых и периклазо-известковых порошков. Для производства пестицидных препаратов применяется кусковой *талькомагнезит*, в котором массовая доля MgO может быть не менее 12 %, а сумма Fe₂O₃ + Al₂O₃ – не более 8 %.

При термической обработке магнезита (обжиге при 600–1 000 °С) образуется так называемый «*каустический магнезит*» – магнезит, потерявший большую часть CO₂ и представляющий собой белую аморфную порошковатую массу. Основным оценочным параметром качества сырья является массовая доля MgO, которая не должна быть меньше 75 %. Вредными примесями в сырье считаются CaO, SiO₂, Al₂O₃ + Fe₂O₃ (не должны превышать 3,5 % каждая), а также потери при прокаливании (должны быть менее 8 %). В бумажной промышленности каустический магнезит применяется при варке целлюлозы как слабощелочной реагент, при обработке бумаги под прессами и как наполнитель пленочных покрытий бумаги. В химической промышленности он применяется для получения магниевых солей: бората магния (удобрения), хлората магния (яд) и др. В производстве стекла и керамики каустический магнезит используется как флюсующая добавка. В качестве вяжущего вещества он образует вместе с концентрированными растворами хлористого и сернокислого магния магнезиальный цемент, который используется в производстве строительных изделий (фибролит, ксилолит), термо- и звукоизоляции, абразивных кругов, жерновов и др.

Обжиг магнезитового порошка при температурах 1 450–1 800 °С в шахтных и вращающихся печах приводит к получению *периклаза* MgO, имеющего температуру плавления 2 800 °С, и каустического магнезита как пылеватого отхода производства. Спеченный периклазовый порошок широко используется в производстве огнеупоров: периклазовых, периклазшпинелидных, периклазфорстеритовых, известковопериклазовых, периклазхромитовых порошков и изделий. Вредными примесями в

получаемых продуктах являются CaO (не более 4 %) и SiO₂ (не более 4,5 %). Избыток CaO и SiO₂ при производстве огнеупоров вызывает излишнюю пористость, ведущую к трещиноватости и разрушению изделий, а также к возникновению недостаточно огнеупорных минеральных фаз (монтчеллита и мервинита). Спеченные периклазовые порошки применяются при ремонте и заправке подин мартеновских и электросталеплавильных печей и как составная часть для изготовления безобжиговых магнезит-доломитовых изделий на смоляной и пековой связке. Массовые доли вредных примесей при этом не должны превышать, %: CaO – 8, SiO₂ – 4,5. Порошки из плавленного магнезита для открытых и вакуумных индукционных печей не должны содержать SiO₂ более 2,5 %, Fe₂O₃ более 0,5 %.

Магнезит плавленный кусковой для производства набивных масс и изделий керамическим способом должен иметь массовую долю MgO не менее 93 %. В этом случае магнезит должен быть полностью проплавлен. Порошки для производства такого магнезита не должны содержать CaO и SiO₂ более 3 % каждой, а для фасонного литья – CaO не более 4,5 % и SiO₂ не более 3,5 %. Для производства высокотемпературного мертеля спеченный порошок не должен иметь массовую долю CaO более 6 %, а массовую долю SiO₂ более 5 %.

В приготовлении магнезиально-железистой смеси для производства высокоогнеупорного раствора применяется периклазовый порошок и чугунная стружка, которые при совместном помоле дают связующий материал при кладке металлургических агрегатов из магнезитохромитовых изделий. Массовая доля Fe₂O₃ должна быть в пределах от 42 до 58 %. Порошок плавленного магнезита для производства плит шиберного затвора не должен содержать CaO более 25 %, а Fe₂O₃ – 0,50 %. Порошки электротехнические периклазовые из магнезита и брусита, применяемые в качестве электроизоляционных наполнителей в трубчатых электронагревателях и других электроприборах и устройствах, не должны иметь массовую долю Fe₂O₃ более 0,25 %. Легирующими добавками при этом являются оксиды магния, кремния и алюминия. Кроме того, в небольших количествах магнезит применяется в производстве пластмасс, рафинировании сахара (использование гидрата оксида магния из магнезита), адсорбентов, красок и др. Качество добываемого магнезита определяется массовой долей MgO, которая не должна быть ниже 38 %.

Брусититы являются ценным сырьем для производства магнезиальных вяжущих, термоизоляционных материалов, вискозы, керамики, стеклоизделий, синтетического каучука, чернил и красок, покрытий сварочных электродов, электротехнического периклаза, целлюлозы, при обогащении урана, в сахарной промышленности, при изготовлении художественных поделок. Качество добываемого бруситита так же, как и магнезита, определяется массовой долей MgO, которая не должна быть ниже 55 %. Специальные технические требования на бруситовое сырье

отсутствуют, а качество продукции оценивается по НТД, разработанным для магнезита.

Мировые запасы магнезита составляют 4,8 млрд т. Добыча магнезита – 18,8 млн т/г. Цена периклаза (85–90 % MgO) – от 200 до 230 дол./т.

По величине запасов, млн т, месторождения магнезитового и бруситового сырья подразделяют: на уникальные – более 300, крупные – 100–300, средние – 30–100, мелкие – менее 30.

Генезис наиболее известных крупных магнезитовых месторождений во многом является дискуссионным. По формационной принадлежности ведущее значение в добыче и запасах магнезита имеют формация кристаллического магнезита в доломитовых толщах и формация жильного криптокристаллического магнезита в ультрамафитах. Поскольку определение генетических типов месторождений магнезита (гидротермально-метасоматический или осадочный) дискуссионно, отсутствует единство и в определении геолого-промышленных месторождений, связанных с доломитами.

Магнезитовое сырье преимущественно добывается на месторождениях двух геолого-промышленных типов: 1) месторождения кристаллического магнезита в карбонатных толщах; 2) остаточно-инфильтрационные в коре выветривания ультраосновных пород.

Месторождения кристаллического магнезита в карбонатных толщах наиболее распространены. Саткинская группа месторождений (Южный Урал) приурочена к доломитовым отложениям верхнесаткинской подсвиты саткинской свиты нижнего рифея. Расположение месторождений контролируется тектоническими нарушениями на крыльях складок. Магнезитовые тела пластообразных, линзообразных и жилообразных форм залегают субсогласно с доломитами – Карагайское месторождение (рис. 17) и др.

Простираение залежей северо-восточное, углы падения от 15 до 45°. Залежи часто пересечены дайками диабазов и содержат прослои доломитов мощностью в единичных случаях до 13 м. Размеры залежей по простиранию достигают до 1 700 м, по падению – до 600 м при мощности до 80 м. Магнезиты Саткинской группы месторождений представлены обычно разнозернистой мономинеральной породой и относятся к высококачественному сырью с низкой массовой долей оксидов железа. Минералами-примесями являются большей частью доломит, кварц и графит, в меньшей степени распространены (в контактах с дайками диабазов), тальк, брусит, кальцит, серпентин, магнетит и сульфиды.

Кроме Саткинской группы месторождений к этому наиболее важному геолого-промышленному типу (свыше 80 % мировой добычи) относятся Савинское, Киргитейское, Тальское, Онотское, Верхотуровское (все Россия), Пэгам, Намгэ, Тэхын и другие (все КНДР), месторождения штата Вашингтон

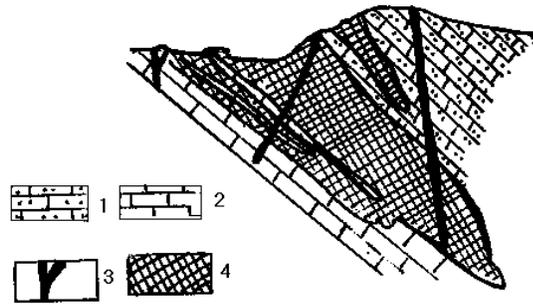


Рис. 17. Геологический разрез Карагайского месторождения магнезита (по М.И. Гараню): 1 – серые и темно-серые доломиты; 2 – черные доломиты с прослоями сланцеватого мергелистого доломита; 3 – диабазы; 4 – магнезиты

(США), Вейтша (Австрия), Южно-Маньчжурские месторождения (КНР), Алморские (Индия) и др.

Остаточно-инфильтрационные месторождения пелитоморфного магнезита в коре выветривания ультраосновных пород менее масштабны. Типичным примером является Халиловское месторождение. Пелитоморфные магнезиты месторождения связаны с площадными корами выветривания серпентинитов. Рудные тела штокверковых и жильных форм залегают в выветрелых серпентинитах. Мощность кор выветривания – десятки метров, мощность жил – до первых метров. В пределах штокверковых тел кроме прожилков и жил магнезиты залегают в форме гнезд и желваков неправильных форм. На Халиловском месторождении диаметр лепешкообразных гнезд достигает 2 м, магнезит скрытокристаллический. К гипербазитовому формационному типу кроме Халиловского месторождения относятся месторождения Салем (Индия), Деларо-Тауншип (Канада), Сьерра-Невада (США), о.Эвбея (Греция), Краубат (Австралия), Дубница (Югославия) и др.

Осадочные озерные месторождения пелитоморфного магнезита в молодых (миоцен-плейстоцен) континентальных образованиях сложены обычно магнезитом и гидромагнезитом с прослоями глин, песчаников, мергелей и конгломератов. Наиболее известны месторождения Югославии (Бела-Стена, Кремна, Бранешко-Поле), а также месторождения Греции, Турции, Кубы и др.

ТАЛЬК И ПИРОФИЛЛИТ

Тальк $Mg_3 Si_4 O_{10}(OH)_2$ образует листоватые массы или тонкозернистые агрегаты, моноклинный, спайность совершенная по {001}, пластинки по спайности гибкие, но не упругие. Твердость равна 1. Мягкость и чешуйчатость талька является результатом слабых вандерваальсовских связей между незаряженными слоями в структуре. Цвет бледно-зеленый, белый или серый, иногда красноватый и коричневый, в порошке всегда белый, блеск жирный или матовый, перламутровый на плоскостях спайности. Мыльный на ощупь, тальк обладает такими ценными свойствами, как химическая стойкость, огнеупорность,

высокие диэлектрические свойства, гидрофобность, повышенная сорбционная способность. При нагревании от 875 до 1 000 °С тальк полностью теряет воду.

Высокосортные тальковые руды называются талькитами (массовая доля талька более 75 %), низкосортные – тальковыми камнями (массовая доля талька в руде менее 75 %). Талькит с массовой долей тремолита или актинолита до 30 % называют асбестинотом, массивный тонкочешуйчатый талькит – стеатитом. Рассланцеванные тальковые камни называют тальковыми сланцами и, в зависимости от состава оталькованных пород, сланцы носят названия тальк-глинистые, тальк-доломитовые и т.д. В промышленности применяются тальк-хлоритовый, или горшечный, камень (огнеупорность 1 000–1 100 °С) и тальк-магнезитовый, или тальк-брейнеритовый, камень (огнеупорность 1 400–1 500 °С). Тальк-хлоритовый камень используется при изготовлении фильер для волочения проволоки из мягких металлов, химически стойких покрытий и художественных изделий.

Пирофиллит $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ образует радиальные сферолитовые агрегаты мелких пластинчатых кристаллов или плотные мелкозернистые массы. Спайность совершенная по {001}, листочки по спайности гибкие, но не упругие. Твердость 1–1,5, цвет обычно красноватый коричневатый или синеватый, реже белый или бледно-желтый. Блеск на плоскостях спайности перламутровый, но обычно жирный или матовый. Многие общие черты талька и пирофиллита приводят часто к аналогичным областям применения талькового и пирофиллитового сырья, статистические данные о торговле этими минералами публикуются совместно. Однако подчеркивается, что пирофиллит – самое лучшее сырье для производства порошковатых средств борьбы с вредными насекомыми. Кроме производства инсектицидов, порошковатый пирофиллит в качестве наполнителя применяется в производстве картонов, бумаги, резины и антицементационных обмазок. В производстве огнеупоров пирофиллит используется для получения шамотных (ковшовых) изделий и жаростойких фосфатных материалов. Однако наибольшее применение пирофиллит находит в производстве керамики: керамического кирпича, фасадных, облицовочных, термокислотоупорных плиток и изделий.

Тальк также применяется в основном в виде порошка (тальк молотый, среднемолотый, тонкомолотый, микротальк). Для цельноточенных изоляционных деталей, художественных изделий используется кусковой тальк (стеатит), иногда пирофиллит. Применение талька обычно обусловлено повышенной массовой долей MgO и минимальной массовой долей железа и других металлов. Для применения талька в качестве наполнителя резины для кабельной промышленности массовая доля Fe₂O₃ в нем не должна превышать 0,6 %, а меди – 0,005 %. Массовые доли сульфат- и хлор-ионов не должны превышать 0,01 %. В то же время массовая доля нерастворимого в соляной кислоте остатка должна превышать 90 %. Для производства эмалей, красок, грунтовок, шпатлевок темных цветов и карандашей микротальк должен иметь

нерастворимый остаток не менее 82 %, pH 8,5–9,5, водорастворимых солей менее 0,3 %, белизну не менее 70 % (производство лаков – не менее 65 %) и 90 % и более частиц с размерами менее 20 мкм. Тальк для электронной промышленности должен иметь нерастворимого остатка не менее 90 %, Fe_2O_3 не более 0,6 %, потерь при прокаливании не более 6 %, белизну не менее 65 %. Для производства пластмасс и химической продукции массовая доля Fe_2O_3 не должна превышать 1 %, потери при прокаливании – 6 %, а белизна должна быть более 65 % и нерастворимый остаток – более 90 %. При производстве пищевой продукции используется тальк с массовой долей нерастворимого остатка не менее 87 % или массовой долей MgO не менее 22 % и белизной не менее 70 %. Для производства резинотехнической продукции, искусственных кож белизна должна быть не менее 60 %. Для производства медицинских, парфюмерных изделий и электрокерамики массовая доля MgO должна быть более 22 %, Fe_2O_3 не должна быть более 1,2 %, SiO_2 – не более 63,5 %, а CaO – не более 0,8 % при массовой доле потерь при прокаливании не более 5 %.

Общие запасы талька в капиталистических странах приблизительно оцениваются в 270 млн т, ресурсы – около 1 млрд т. Наиболее крупными по запасам странами являются США, Франция, Италия. Основные запасы пирофиллита сосредоточены в Японии, США, Канаде и Бразилии. Мировая добыча талька и пирофиллита составляет 8 млн т. Первое место по добыче талька и талькового камня занимает США, пирофиллита – Япония. Эти же страны являются основными потребителями талькового и пирофиллитового сырья. В США тальковый камень используется преимущественно в керамической промышленности (28 %), в производстве красок (16 %), инсектицидов (6 %), в бумажной промышленности (5 %), в производстве резины (3 %), остальное – в парфюмерной, текстильной, фармацевтической промышленности, производстве пластмасс вместе с металлической пудрой, а также при спайке различных металлов. Стеатит поступает в стратегические резервы США и используется в производстве высоковольтных изоляторов в электронной аппаратуре. Основным экспортером талька являются США. Цена на тальк в зависимости от качества колебалась от 20 до 500 дол./т. Цена на пирофиллит составляла около 14 дол./т.

По масштабам (запасы, тыс. т) месторождения талька разделяются на следующие группы: уникальные – более 20 000, крупные – 1 500–20 000, средние – 500–1500, мелкие – 10–500, незначительные – меньше 10; месторождения талькового камня – крупные – более 40 000, средние – 15 000–40 000, мелкие – менее 15 000.

В промышленных месторождениях тальк образуется как продукт гидротермальной переработки магнезиальных магматических, метаморфических и осадочных пород. Поэтому тальк обычно ассоциирует с серпентином, хлоритом, тремолитом, доломитом и магнезитом, образуя массивные или слоистые породы. Главными являются три геолого-промышленных типа месторождений: 1) месторождения в метаморфических

карбонатных толщах; 2) месторождения в серпентинитовых массивах; 3) залежи в корах выветривания месторождений первых двух типов.

Месторождения в метаморфических карбонатных толщах дают наиболее ценное маложелезистое тальковое сырье. Оротское месторождение расположено в предгорьях Восточного Саяна (127 км к юго-западу от г. Черемхово). Продуктивным является вулканогенно-карбонатный горизонт камчадальской свиты нижнего протерозоя мощностью 600 м, представленный доломитами, которые местами почти нацело замещаются магнезитом. Он прослеживается с перерывами на расстояние 25 км. Тальковая минерализация приурочена к залежам магнезита и к их контактам с антигорит-хлоритовыми сланцами, серпентинитами и амфиболитами. В таких приконтактовых участках располагаются наиболее крупные скопления талька в форме неправильных жил и линз. Промышленные залежи образованы группой тел талькитов мощностью до 23 м и протяженностью до 500 м (залежь Камчадал). Чаще тальк в магнезитах образует мелкую вкрапленность и прожилки. Тальковые руды высокого качества представлены апомагнезитовыми талькитами массивной текстуры (стеатиты). Между талькитами и магнезитами установлены постепенные переходы. Генезис месторождения связывают с метасоматическим оталькованием магнезитов, возникших, в свою очередь, за счет доломитов.

Месторождения в серпентинитовых массивах. Пугачевское месторождение (Челябинская область, в 88 км к юго-западу от г. Миасс) располагается в пределах Миасской тальковой провинции, в которой подавляющее большинство месторождений связано с серпентинитами. Кроме того, в провинции широко проявился гранитоидный магматизм. В районе Пугачевского месторождения серпентиниты слагают два крупных тела: Западное (мощностью 20–70 м и длиной по простиранию 900 м) и Восточное (средняя мощность 30 м, длина по простиранию 250 м). Средний угол падения тел – 50°. Форма тальковых залежей в телах серпентинитов сложная линзообразная с серией апофиз. Известно более двух десятков залежей, из которых наиболее крупная (залежь 1) достигает 650 м в длину при мощности до 23 м. Тальковые руды представлены тальковыми сланцами и в меньшей мере стеатитами.

Месторождения в корах выветривания. В Красноярском крае к этому геолого-промышленному типу относится Киргитейское месторождение (Мотыгинский район). Высококачественные остаточные порошокватые талькиты, возникшие за счет аподоломитовых руд, располагаются в мезозойской линейной коре выветривания, мощность которой достигает 150 м. Состав коры выветривания представлен на месторождении глинами, доломитовыми песками и мукой, маршаллитоподобным элювием и порошокватыми пелитоталькитами, которые представляют собой ценнейшее сырье не требующее обогащения. Массовая доля оксидов железа в руде не превышает 1 %.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности высокомагнезиального сырья.
2. Охарактеризуйте области применения магнезита, брусита и талька.
3. Перечислите вредные примеси в тальковом сырье для кабельной промышленности и в магнезитовом сырье для производства периклаза.
4. Какие основные геолого-промышленные типы месторождений высокоглиноземистого сырья вам известны?
5. Приведите примеры промышленных месторождений высокоглиноземистого сырья.

БАРИТ И ВИТЕРИТ

Барит $BaSO_4$ наиболее распространен в природе среди безводных сульфатов после ангидрита. Выделяют следующие разновидности: баритоцелестин (повышенные массовые доли стронция), хокутолит (повышенные массовые доли свинца и железа), кальцитобарит. Кристаллы барита относятся к ромбической сингонии и встречаются обычно в виде табличек, реже в виде призматических столбчатых и изометричных форм. Иногда попадаются прозрачные кристаллы «оптического» барита. Агрегаты зернистые, реже – скрытокристаллические натечных форм. Спайность по {010} совершенная. Цвет водяно-прозрачный в кристаллах. Обычно белый или серый, другие цвета и оттенки зависят от массовой доли примесей (железа, битумов и др.). Блеск стеклянный, на плоскостях спайности перламутровый. Твердость 3–3,5, хрупок. Почти нерастворим в воде, химически инертен, хорошо поглощает рентгеновское и радиоактивное излучение. Плотность барита 4,3–4,7 г/см³.

Витерит $BaCO_3$ по свойствам очень похож на барит, однако хорошо растворяется в воде и слабых кислотах, ядовит. В природе распространен редко, известны лишь единичные месторождения витерита.

Благодаря широкому распространению и уникальности свойств барит применяется в самых различных областях промышленности. Основным оценочным показателем качества баритового сырья является массовая доля $BaSO_4$, которая в рудах месторождений составляет 10 % и более, в комплексных рудах – от 5 %, в связи с чем барит потребляется в виде концентратов. Браковочными показателями концентратов барита служат массовые доли SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , $CaCO_3$, рН водной вытяжки, а также массовая доля водорастворимых солей.

Баритовый концентрат сорта А, учитывающий наличие вредных примесей, применяют для производства солей бария, электровакуумного и электролампового стекла, литопона, в качестве наполнителя красок и др. Микробарит, используемый для производства эмалей и красок, получают

путем обогащения, отбели (облагораживание кислотами, декрипитация) и микроизмельчения. Маслосодержание не более 13 г/100 г продукта. Коэффициент яркости барита, применяемого в качестве наполнителя в лакокрасочной промышленности, должен быть не менее 80 %. Баритовый концентрат получают флотацией, гравитацией и рудоразборкой.

Флотоконцентрат барита сорта Б, не учитывающий массовые доли вредных примесей, применяется для производства утяжелителей буровых растворов. Утяжелитель используется в порошкообразном состоянии и характеризуется низкой массовой долей водорастворимых солей и высокой гидрофильностью поверхности, позволяющей предупреждать потерю стабильности буровых растворов и их аэрацию. Баритовое сырье должно иметь плотность не менее 4,00 г/см³, массовую долю влаги не более 2 %, массовую долю водорастворимого кальция не более 0,025 % и показатель гидрофильности не менее 80 %. Оба сорта баритового концентрата должны содержать не менее 80 % массовой доли BaSO₄. Сырье должно быть обработано триполифосфатом натрия или натрия-калия. Не применим для буровых растворов на нефтяной основе.

Из других областей применения барита необходимо отметить его использование в медицине, изготовление износостойких баритсодержащих резинотехнических изделий (шины, шланги) и изделий, предохраняющих от жесткого излучения, особых сортов бумаги высокой белизны (фотоподложка, ватман и др.), асбестотехнических изделий. В химической промышленности барит применяется для производства пластмасс. В строительстве барит используется как наполнитель специальных сортов штукатурок и бетонов (изолятор от жесткого излучения), как наполнитель утяжеленных бетонов и асфальтов для аэродромов и ракетодомов, в производстве искусственного мрамора, кафельных плиток, беложгущихся глиняных изделий. При прокладке трубопроводов под водой и в болотистой местности барит используется в тяжелых фундаментах железных конструкций.

В металлургии барит является интенсификатором процесса получения ферросплавов и сырьем для выплавки барийсодержащих сплавов, применяется также в качестве флюса при плавке меди и производстве ферритов бария. Присадка баритсодержащих лигатур в сталь способствует глобулизации неметаллических включений, снижению массовой доли серы, более глубокому раскислению, увеличивает пластичность и ударную вязкость, снижает порог хладноломкости сталей. Кусковой барит используется для получения солей бария, которые имеют еще более широкое применение.

Мировые запасы барита на 1994 г. составляют 550 млн т. Годовое потребление 5,4 млн т. Крупнейший потребитель барита – США (порядка 55 % мирового потребления), значительно потребление и в таких странах, как Мексика, ФРГ, Франция, Великобритания.

Цены на барит варьируют в зависимости от качества продукции (от 38 до 300 дол./т). Главные импортеры: США, ФРГ, Великобритания; экспортеры – Китай, Ирландия, Турция.

Баритовые месторождения (в которых барит является единственным полезным минералом) по запасам, млн т, делятся на весьма крупные – более 5, крупные – 0,5–5, средние – 0,1–0,5, мелкие – менее 0,1.

К комплексным баритовым месторождениям относятся месторождения, из руд которых барит извлекается попутно. По запасам барита, млн т, комплексные месторождения подразделяются на весьма крупные – более 20, крупные – 10–20, средние ~ 1–10, мелкие – менее 1.

Руды собственно баритовых месторождений целесообразно добывать при массовой доле барита 30–50 %. Из некоторых комплексных месторождений барит извлекается при массовой его доле 5 %. Основными промышленными геолого-генетическими типами месторождений барита являются гидротермальные месторождения жильного типа, гидротермально-метасоматические залежи в карбонатных толщах и месторождения осадочного типа. Барит как устойчивый к выветриванию и тяжелый минерал накапливается в элювиально-делювиальных образованиях за счет баритсодержащих пород. Дополнительными источниками барита могут стать конкреции дна мирового океана, содержащие до 20 % барита, хвосты обогатительных фабрик, а также отработанные утяжеленные буровые растворы.

Классическим примером *гидротермальные месторождения жильного типа* является Арпакленское на юге Туркмении. Баритовые жилы и линзы мощностью от 0,2 до 6 м слагают участки в брекчиях зоны дробления песчаников, прослеживающейся на 4 км при ширине 25–30 м. Жилы несут барит-витеритовую минерализацию. Массовая доля барита в руде колеблется от 43 до 97 %. Барит представлен в основном крупными (до 3–5 см) кристаллами и мелкими сахаровидными скоплениями. Цвет его чисто-белый, реже розоватый, иногда барит замещается витеритом. Количество витерита также подвержено значительным колебаниям. Витерит встречается чаще в центральных частях жил и совместно с баритом образует иногда крупные кристаллы и радиально-лучистые агрегаты белого и медового цвета. Кроме барита и витерита в состав руд входят кварц, кальцит и сульфиды.

Гидротермально-метасоматические залежи в карбонатных толщах – пластообразные залежи, которые образуются путем метасоматического замещения в основном карбонатных пород. Примером может служить Медведевское месторождение в Кусинском районе Южного Урала. Рудная залежь приурочена к контакту глинисто-филлитовых сланцев и доломитов верхнепротерозойского возраста. Залежь представлена кварц-карбонатными породами с вкрапленностью барита. Главная залежь имеет пластообразную форму, залегает согласно с вмещающими породами и прослеживается в меридиональном направлении на 3,2 км и по падению на 100 м, падение

залежи под углами 30–40° при мощности от 4 до 16 м. На флангах залежь постепенно выклинивается. В ее пределах барит образует мелкую рассеянную вкрапленность, отдельные гнезда и прожилки. Средняя массовая доля барита от 13 до 23 %. В ассоциации с баритом наблюдается вкрапленность галенита, сфалерита и пирита. На площади месторождения с рудными телами связаны элювиально-делювиальные россыпи барита.

Осадочные месторождения барита подразделяются на собственно осадочные и вулканогенно-осадочные. Наиболее крупными объектами среди осадочных месторождений барита являются месторождения в кремнисто-сланцевых толщах, представляющие собой стратифицированные залежи большой мощности и протяженности. Примером может служить месторождение Чиганак в Прибалхашье. Крутопадающий пласт существенно баритовых и кремнисто-баритовых руд протяженностью до 2 км при мощности до 10 м разбит пострудными нарушениями на три тела. В направлении с запада на восток мощность и массовая доля барита в рудах уменьшаются, вплоть до полного выклинивания, где барит замещается яшмами и яшмокварцитами. Подстилающими пласт породами являются яшмы и яшмокварциты, перекрывающими – фосфоритоносные песчаники и алевроитоглинистые сланцы с конкрециями барита. Руды имеют средне- и крупнокристаллическую структуру. Массовая доля барита в рудах месторождения колеблется от 30 до 90 %.

Контрольные задания

1. Назовите основные области применения барита и виверита.
2. Перечислите вредные примеси в баритовом сырье.
3. Охарактеризуйте геолого-промышленные типы месторождений баритового сырья.
4. Приведите примеры промышленных месторождений баритового сырья.

КВАРЦЕВОЕ СЫРЬЕ

Кварцевое сырье достаточно разнообразно и включает пьезокварц, оптический кварц, кварц для плавки, жильный кварц, кварциты, кварцевые песчаники и природный кварцевый песок. В то же время все разновидности сырья характеризуются совершенно определенным минеральным и химическим составом – абсолютным преобладанием в них кремнезема в виде кварца.

Пьезокварц, оптический кварц и кварц для плавки с целью получения прозрачного кварцевого стекла представлены в природе низкотемпературной разновидностью кварца (β -кварцем) и обычно встречаются в виде кристаллов тригональной сингонии. Типичные призматические кристаллы кварца ограничены двумя различными ромбоэдрами. Широкое разнообразие форм

кристаллов кварца обусловлено неодинаковым развитием сходных граней: тригональные пирамиды появляются как небольшие грани, срезающие углы между ромбоэдром и гранями призмы, грани трапецоэдра в комбинации с гранями пирамид срезают углы между гранями пирамиды и призмы. Если ромбоэдры развиты одинаково, кристалл имеет вид гексагональной дипирамиды; в большинстве же случаев один ромбоэдр развит лучше другого и тогда противоположащие грани ромбоэдра одинаковы, а смежные – различны (правый и левый кварц различают по положению граней тригонального трапецоэдра и дипирамиды). Пластинки правого кварца вращают плоскость поляризации вправо, пластинки левого кварца – влево.

Двойники обычны и являются причиной брака, поскольку пьезоэлектрические пластины должны быть свободны от двойников. Спайность отсутствует. Излом раковистый. Твердость 7. Плотность 2,65–2,66. Кварц хорошо пропускает лучи в инфракрасной и ультрафиолетовой областях, обладает механической прочностью, химической стойкостью к кислотам, однако растворим в плавиковой кислоте и щелочах. Состав чистого кварца близок к 100 % SiO₂. При нагревании до 573 °С α-кварц переходит в гексагональный β-кварц. При достижении температуры 870 °С α-кварц превращается в α-тридимит, который при дальнейшем повышении температуры до 1 470 °С преобразуется в α-квистаболит, имеющий температуру плавления 1 710 °С. Кварц встречается двух типов: крупнокристаллический и скрытокристаллический.

Крупнокристаллические разновидности кварца имеют наибольшую ценность. *Горный хрусталь* – бесцветные прозрачные кристаллы, иногда эта разновидность называется «херкимерский бриллиант». *Аметист* – фиолетовый прозрачный кварц, используется как декоративный и полудрагоценный камень. *Розовый кварц* розово-красный или ярко-розовый (редок). *Цитрин* – ярко-желтый или лимонно-желтый кварц очень похожий на топаз. *Раухтопаз* – дымчатый кварц прозрачный или полупрозрачный, коричневый, серый до почти черного («*кернагорм*» – по имени местечка в Шотландии, где он широко использовался в качестве декоративного камня), *морион* – черный. Известны также разновидности кварца с аллохроматической окраской, обусловленной включениями посторонних окрашенных минералов. *Празем* – зеленоватый кварц с включениями иголок зеленого актинолита. *Авантюрин* – желтоватый или буровато-красный кварц с мерцающим отливом из-за мельчайших включений слюды или гематита. *Кошачий, тигровый, соколиный глаз* – кварц светлых и темных оттенков с шелковистым отливом, обусловленным примесями асбестов – хризотила, крокидолита и др.

Пьезоэлектрические свойства кварца заключаются в том, что при механическом воздействии на кристалл в направлении двойной оси возникает электрический заряд с противоположными знаками на концах кристалла.

К оптическому кварцу относятся крупнокристаллические разновидности – кристаллы бесцветного горного хрусталя. Для пьезоизделий пригодны бесцветные, дымчатые, серые, светло-серые, желтые и черные

кристаллы кварца, а также гальки, куски и обломки кристаллов. Дефекты сырья: двойники, зональность, трещиноватость, чуждые включения твердые и газовой-жидкие, свилеватость, мозаичность, окраска кристаллов (для оптического кварца). Степень проявления дефектов в сырье снижает его качество или делает сырье непригодным к использованию. Кварц для плавки представлен обычно кристаллами и обломками горного хрусталя, прозрачными перекристаллизованными и гранулированными метаморфизованными чистыми разновидностями кварца.

Кварциты, кварцевые песчаники и жильный кварц не имеют жестких ограничений в отношении физических свойств и размеров слагающих их зерен кварца.

Природный кварцевый песок – мелкообломочная рыхлая осадочная горная порода, более чем на 90 % состоящая из окатанных и угловатых зерен (песчинок) кварца с преобладающим размером 0,1–1,0 мм. По размерам частиц, мм, выделяют пески: крупнозернистые (0,5–1), среднезернистые (0,25–0,5) и мелкозернистые (0,1–0,25). Форма зерен песка бывает округлая, округло-угловатая и угловатая; по степени окатанности – окатанная, полуокатанная и остроугольная; по характеру поверхности – зерна гладкие и шероховатые.

Использование кварца в промышленности обусловлено его уникальными свойствами. Горный хрусталь и окрашенные разновидности крупнокристаллического кварца применяются в качестве ювелирного сырья. В оптике кварц используется при изготовлении линз, призм, пластинок, клиньев, окон для самых разных приборов: микроскопов спектрографов, поляриметров и др. Пьезокварц широко применяется в радиотехнических изделиях (звукосниматели, микрофоны, резонаторы и стабилизаторы радиочастот и др.), в ультразвуковых приборах (гидроакустика, дефектоскопия, ультразвуковые исследования внутренних органов человека и животных, очистка поверхностей твердых веществ и др.). Отходы производства могут использоваться для плавки кварцевого стекла, выращивания искусственных кристаллов кварца и др.

Оценка оптического кварца и пьезокварца в сырье определяется несколькими показателями, однако главным из них является размер – выход бездефектной монообласти. Под монообластью понимают область, свободную от недопустимых дефектов в пределах кристалла, его обломка или гальки кварца. Выход монообласти – ее процентная массовая доля в каждом индивидуальном образце сырья. Согласно отраслевому стандарту выход монообласти пьезокварцевого сырья из кристалла, обломка или гальки должен составлять для сорта экстра не менее 30 % по объему и не менее 1 кг по массе. Минимальные размеры монообласти должны обеспечивать выход пластинки размером не менее 12x12x1,5 мм. Для оптического кварца учитывается положение оптической оси, которая должна быть перпендикулярна большей поверхности сечения монообласти.

Предварительную оценку пригодности сырья можно сделать уже при макроскопическом его изучении. Смачивание керосином и просмотр образца на просвет с помощью лампы мощностью 300–500 Вт позволяет определить степень трещиноватости и включения. Сложная поверхность скола с нитевидными линиями на нем свидетельствует о наличии свилеватости и мозаичности. На гранях призм или на распилах, протравленных плавиковой кислотой, появляются линии двойниковых швов.

Главным показателем качества при оценке кварца для плавки прозрачного кварцевого стекла является чистота его состава: массовая доля SiO_2 должна быть более 99,9 %, примесей железа и алюминия – менее тысячных долей процента, а примесей титана и магния – менее десятитысячной доли процента. Кварцевое стекло широко применяется в оптико-механической, химической, металлургической, электротехнической и других отраслях промышленности. Вредными для сырья являются все виды примесей, включая механические и газовой-жидкие.

Наиболее крупными потребителями кварцитов и кварцевых песчаников являются огнеупорная промышленность и металлургия. Отдельные разновидности кварцитов и кварцевых песчаников используются в производстве абразивов, стекла и тонкой керамики. Огнеупорная промышленность использует кварциты и кварцевые песчаники для производства динаса. Наиболее ценным свойством динаса как огнеупора является его способность выдерживать нагревание до высоких температур (1 690–1 730 °С) под нагрузкой, без заметной деформации. Эта способность выгодно отличает динас от огнеупорных шамотных (из обожженных глин) изделий, которые начинают терять плотность уже при 1 250–1 400 °С.

В качестве флюса кварциты и кварцевые песчаники (а иногда и песчано-гравийный кварцевый материал) в цветной металлургии применяются в основном при выплавке меди и никеля. Их использование обусловлено свойством кремнезема способствовать переводу в шлак содержащегося в рудах железа. Кварциты как флюсы используют и при переработке карбонатных железных руд. Кроме того, их применяют для производства различных силикосплавов (ферросилиция, силикомарганца, силикобария, трансформаторной стали и др.). Они используются при производстве стали для раскисления расплавленного металла и как легирующая добавка для увеличения прочности стали на растяжение, повышения устойчивости к коррозии и высокотемпературному окислению, улучшения электрических характеристик.

Большое значение в технике имеют силумины – сплавы алюминия с кремнием, содержащие в малых количествах (до 0,5 %) магний, марганец, иногда медь и цинк. Силумины обладают малой плотностью и высокой прочностью. Высокие механические свойства имеют легкие медно-кремниевые сплавы (содержащие 2–5 % кремния), употребляющиеся взамен оловянистой бронзы. Силициды бора, молибдена и вольфрама обладают

весьма высокой (до 2 000 °С и выше) огнеупорностью. Силикогаллиевый расплав может использоваться для получения монокристаллов очень чистого кремния. На основе чистого кремнеземного сырья производится карбид кремния, который благодаря высокой твердости, хорошей теплопроводности и значительному электросопротивлению применяется для изготовления абразивов и режущих инструментов.

Применение чистого кремнеземного сырья в керамической промышленности позволяет существенно улучшать качество фарфоровых и фаянсовых изделий. Вводимый в состав глазурей и эмалей кварц повышает температуру их плавления, химическую и термическую устойчивость, а также улучшает другие технические характеристики.

Жильный кварц применяется для производства специального стекла и тонкой керамики.

Незначительными минеральными примесями в кварцевых песках являются мусковит, полевые шпаты, обломки кремнистых пород и др. Песок стандартный эталонный для испытания цементов должен иметь массовую долю SiO_2 не менее 98 %. Для производства карбида кремния необогащенный формовочный песок должен содержать такое же количество кремнезема, обогащенный – не менее 99,1 % SiO_2 . Производство предохранителей требует в качестве наполнителя кварцевый песок с массовой долей SiO_2 не менее 98,5 %, а производство обмазки для стеклянных блоков и измерение твердости абразивного инструмента – не менее 98 %. В производстве стекла пески кварцевые являются одним из главных ингредиентов стекольной шихты – для получения одной тонны стекла расходуется до 920 кг кварцевого песка. Для этой цели используется песок кварцевый, молотые песчаник и жильный кварц с массовой долей SiO_2 не менее 95 %. Такая же доля SiO_2 необходима для применения кварцевых песков в производстве бытовой химии, тонкой керамики – не менее 93 % SiO_2 . Для производства набивных огнеупорных кварцглинистых масс для футеровки сталеразливочных ковшей массовая доля SiO_2 не должна быть менее 91 %.

Пески формовочные подразделяются на кварцевые, тощие и жирные с массовой долей SiO_2 не менее, соответственно, 93, 90 и 50 %. Кварцевые пески, применяемые в производстве цементов для строительных растворов и в производстве фильтров водоочистных сооружений, не должны иметь массовую долю SiO_2 менее 90 %. Менее качественные пески с массовой долей 75 % SiO_2 используются для песочниц локомотивов. Кварцевые пески имеют также ограничения по гранулометрическому составу и массовым долям вредных примесей, которыми являются оксиды алюминия, железа, титана, кальция, магния и серы, сумма щелочей натрия и калия, сера сульфидная.

Промышленные месторождения оптического кварца и пьезокварца встречаются редко (95 % добычи такого природного кварцевого сырья обеспечивает Бразилия). Мировое производство искусственных кристаллов кварца значительно превышает его добычу. Цены на пьезооптическое сырье

на международном рынке колеблются от сотен до 1 000 дол. за килограмм моноблока.

Производят кварцевое сырье, кроме стран СНГ, Австрия, Бельгия, Саудовская Аравия, Австралия, импортируют – ФРГ, Швеция, Япония.

Мировое потребление кварцевых песков составляет порядка 100–120 млн т/г. На долю стран СНГ приходится, млн т, около 36, США – 28, ФРГ – 10–14, Франции – 6, Англии – 4, Бельгии и Бразилии – по 3-4, Австрии и Австралии – по 2.

Кондиционный кварц (горный хрусталь) добывается из пегматитовых месторождений, гидротермальных жильных месторождений, а также из примыкающих к ним элювиально-делювиально-аллювиальных россыпей. Кварц для плавки прозрачного кварцевого стекла добывается также из метаморфизованных месторождений жильного гранулированного кварца. Кварцевые пески характерны для платформенных районов и обычно образуются в условиях влажного жаркого климата в результате переотложения продуктов глубокого химического выветривания материнских пород. Вне связи с климатом – при длительном переотложении их различными природными агентами, а также при формировании осадков за счет размыва более древних кварцевых песков или песчаников.

Пегматитовые месторождения располагаются в эндо - и экзоконтактных зонах гранитоидов в полостях пегматитовых тел (хрустальные погреба, занорыши). Типичными примерами являются пегматитовые месторождения пьезокварца Украины. Хрусталеносные пегматиты расположены в краевой зоне гранитоидного массива в форме неправильных округлых тел, имеющих обычно зональное строение.

Занорышевые полости приурочены к нижним частям кварцевого ядра. Формы полостей разнообразны и изменчивы – от изометричных до щелевидных. Занорыши содержат крупные кристаллы кварца, топаза, флюорита и слюд. Масса некоторых короткопризматических и обелископодобных кристаллов кварца достигает десятков и сотен килограммов. Цвет кристаллов меняется от белого до бесцветного и дымчатого, головки кристаллов представлены морионами, реже аметистами. Дефектами кристаллов являются трещиноватость в их нижних частях, свилеватость, газовой-жидкие включения и двойники. Нижние части занорышей – брекчии морионовых кристаллов (тоже используемых как пьезосырье), сцементированные опалом, халцедоном, слюдами и каолином. Стенки полости выстилают кристаллы калиевого полевого шпата, агрегаты кварца, топаза, клевеландита. Вмещающие пегматиты представлены последовательно: зоной мономикроклина и альбита, крупно- и среднезернистым кварц-полевошпатовым пегматитом и внешней зоной графического пегматита. Такая зональность не всегда сохраняется. Кроме кварца в занорышах найдены уникальные кристаллы топаза массой до 40 кг и более, берилла, касситерита, флюорита, циркона и др. В районе

месторождений развиты небольшие по размерам элювиально-делювиальные топаз-морионовые россыпи.

Среди пегматитовых месторождений (рис. 18) редко встречаются крупные объекты. В Канаде известны пегматитовые тела протяженностью до 1 000 м. Диаметр занорышевых полостей колеблется от первых до 80 м. Пегматитовые месторождения пьезокварцевого сырья известны в КНР,

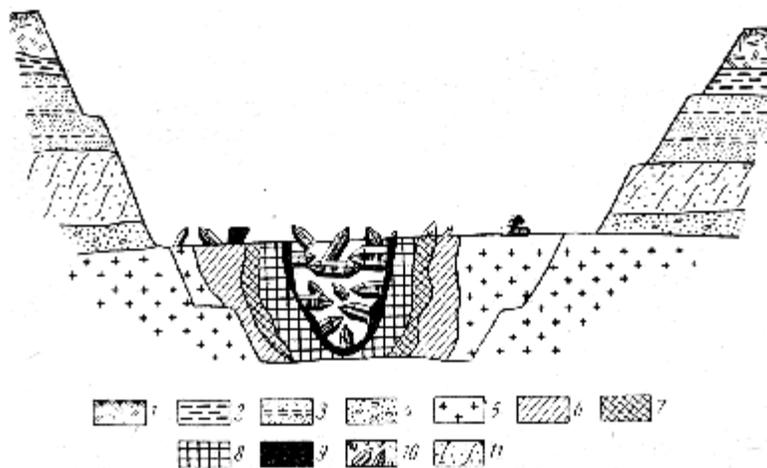


Рис. 18 Схематический геологический разрез через пегматитовое тело (по Н.П. Ермакову): 1 – почвенно-растительный слой; 2 – суглинок; 3 – песок с прослоями глины; 4 – песок с кварцем и кремнем; 5 – гранит каолинизированный; 6 – графическая зона; 7 – пегматоидная зона; 8 – зона полевых шпатов; 9 – зона массивного кварца; 10 – зона свободного роста кристаллов; 11 – песок кросслоистый

Монголии, Афганистане, Шри-Ланке, США, Бирме и других странах.

Гидротермальные жильные месторождения являются главным геолого-промышленным типом месторождений пьезооптического сырья. Все исследователи отмечают приуроченность месторождений к вмещающим породам, обогащенным кремнеземом: кварцитам, кварц-сланцевым сланцам, гранитам. Другой особенностью подобных месторождений является их безрудность. Хрусталеносные жилы и внежильные полости имеют разнообразную форму – от плитообразных, линзовидных до штокверковых. Мощности отдельных жильных тел измеряются от первых метров до первых десятков метров. Длина жил по простиранию может достигать 500 м. Обычно же длина жил с промышленной хрусталеносностью не превышает первые десятки метров по простиранию и десятков метров по падению. Крупнокристаллический кварц приурочен к полостям в пределах кварцевых жил, которые называют гнездами (объем менее 1 м³) или погребами (объем более 1 м³). Формы полостей от изометричных до сложных щелевидных, иногда полости располагаются вне кварцевых жил.

Масса кристаллов пьезооптического кварца достигает 20 кг и более. Кварц представлен горным хрусталем, раухтопазом, аметистом и цитрином.

Отдельные кристаллы и друзы располагаются на стенках и дне полостей, которые заполнены гидрослюдами, каолинитом и хлоритом. Околожильные изменения вмещающих пород представлены альбитизацией, хлоритизацией, карбонатизацией, серицитизацией. Типичными примерами являются Алданские месторождения горного хрусталя. Хрусталеносные жильные тела часто приурочены к дайкам гранитоидов среди кварцитов и гнейсов архея. Формы хрусталеносных кварцевых жил сложные штокверкообразные. Жильные тела сложены молочно-белым и полупрозрачным шестоватым кварцем. Полости с пьезооптическим кварцем в пределах жильных тел образуют гнезда, карманы и погреба в жильных телах или кварцитах. Крупные кристаллы длиной от 10 до 80 см и толщиной до 20 см нарастают на стенках полостей и обломках кварцитов. Кристаллы относят к горному хрустальному, раухтопазу и мориону. Дефектами кристаллов являются в основном газово-жидкие включения и свилю.

Россыпные месторождения пьезооптического сырья распространены достаточно широко вблизи от коренных источников (Украина, Россия, Бразилия, Китай и др.). Примером могут служить россыпные месторождения Южного Урала, приуроченные к каолиновой коре выветривания палеозойских пород. Делювиально-аллювиальные россыпи приурочены к ложковым формам рельефа. Окатанный в различной степени горный хрусталь вместе с обломками жильного кварца образует скопления в нижней части рыхлых отложений над горизонтом глин. Длина россыпей небольшая. Коренным источником россыпей послужили хрусталеносные гнезда в кварцевых жилах.

Осадочные месторождения кварцевых песков образуются в процессе осадконакопления на платформах в прибрежных частях эпиконтинентальных морей как в условиях влажного жаркого климата, так и вне связи с климатом при длительном переотложении их различными природными агентами, а также при формировании осадков за счет размыва более древних кварцевых песков или песчаников. В процессе катагенеза они перерождаются в песчаники. Пласты и линзы кварцевых песков и песчаников мощностью до десятков и сотен метров имеют залегание субгоризонтальное (пески мезокайнозойского и реже палеозойского возраста), а иногда крутое (песчаники) в толщах различного возраста (Люберецкое и Егановское месторождения песков в Московской области, Черемшанское месторождение песчаников в Бурятии и др.).

Метаморфизованные месторождения представлены обычно жилами гранулированного кварца и являются основным источником получения кварца для плавки прозрачного стекла. Крупные месторождения гранулированного кварца известны в пределах южной части Уральского антиклинория. Жильные поля и линейные зоны объединяют скопления жил секущих и субсогласных с преобладающим простираанием вмещающих пород. Размеры отдельных жил достигают по простираанию 20 м при мощности до 3

м. Формы жил плитообразны и линзовидны. Гранулированный кварц жил образовался при перекристаллизации первично гидротермальных жильных тел и представлен зернами прозрачного кварца с тонкими матовыми оторочками. К метаморфическим относят не только собственно метаморфические, но и метасоматические, и вторичные кварциты, образующие крупные (до нескольких километров) мощные пластовые тела и массивы на Урале, в Западной Сибири, в Мурманской области, Бурятии и др.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности кварцевого сырья.
2. Перечислите ювелирные разновидности кварца.
3. Охарактеризуйте области применения кварцевого песка.
4. Какие вредные примеси в кварцевом сырье вам известны?
5. Каковы основные геолого-промышленные типы месторождений кварцевого сырья?
6. Приведите примеры промышленных месторождений кварцевого сырья.

КРЕМНЕЗЕМИСТОЕ СЫРЬЕ

К кремнеземистому сырью (кремнеземистым породам) относят обычно кристобалит-опаловые породы: диатомиты, трепелы, опоки, спонголиты, радиоляриты, силикофлагеллиты с массовой долей общего кремнезема выше 75 %. Для них характерно микрозернистое глобулярное строение. Обычными примесями в таких породах являются минералы глин, цеолиты, глауконит и карбонаты. Степень раскристаллизации опалового кремнезема различна – до перехода в α -кристобалит и кварц. Опаловый состав характерен для диатомитов, опоки, спонгалиты и трепелы имеют опал-кристобалитовый состав. Вредными примесями в рассматриваемых породах являются глины, особенно монтмориллонит. К разновидностям кремнеземистого сырья относятся также пуццоланы и трассы.

Диатомит – землистая, рыхлая или сцементированная кремнистая (опаловая) порода белого, светло-серого или желтоватого цвета, состоящая более чем на 50 % из панцирей диатомей. Диатомиты содержат 70–98 % растворимого кремнезема. Это легкие (объемная плотность диатомитов составляет от 250 до 960 кг/м³), тонкопористые (общая пористость – от 65 до 92 %), мягкие (прочность – до 3 МПа) породы, землистые разновидности которых называют кизельгуром. Диатомиты обычно не содержат карбонатов.

Трепел представляет собой рыхлую или слабосцементированную, очень легкую, тонкопористую осадочную породу. Трепел отличается от диатомита малой массовой долей или почти полным отсутствием органических остатков и состоит из мелких округлых и сферических

опаловых телец (глобул) размером от 0,01 до 0,001 мм. Цвет трепелов белый, серый, бурый, красный до черного. Синонимы – *полировальная земля, триполит*. Выделяют три разновидности трепелов: 1) глобулярный трепел (глобулярный силицит – бездиатомовый, состоящий из глобулей опала); 2) диатомовый (диатомовый силицит – присутствие скелетов диатомей); 3) мексиканский (тизар). Объемная плотность трепела составляет от 500 до 1 270 кг/м³, пористость от 50 до 70 %. Для трепела характерна наивысшая концентрация «активного» кремнезема, однако трепелы могут содержать значительные примеси карбонатов.

Опока – твердая тонкопористая порода, сложенная опалом с примесью глинистого вещества, скелетов диатомей, радиолярий, кремнистых губок, зерен кварца, полевых шпатов, глауконита. Сохранность органических остатков плохая, преобладают обломки. Объемная плотность опок от 1 040 до 1 820 кг/м³, твердость 3–5 и выше. Излом полураковистый, прочность до 30 МПа. Массовая доля SiO₂ может достигать 98 %, однако опоки могут содержать значительную примесь карбонатов. Синонимы: *гезы, пламенный мергель, кремнистый мергель, кремнистая глина*.

Спонголиты (спонгиолиты) – породы, сложенные более чем на 50 % спикулами губок и опаловой основной массой, частично перешедшей в халцедон, нередко примеси раковин фораминифер и радиолярий. Плотные разности похожи на опоки (спонгиевые опоки), слабые – на трепела. Цвет спонголитов зеленоватый или светло-серый. Рыхлые разности (спонгиевые пески) представлены окатанными обломками спикул губок.

Радиоляриты – породы, состоящие более чем на 50 % из сложенных кремнеземом раковин радиолярий. Кремнезем частично раскристаллизован до халцедона и кварца. Типичные примеси в радиоляритах представлены фосфатным, глинистым и алевритистым материалом, глобулами опала, остатками диатомей, спикулами губок и др. Рыхлые разности похожи на трепелы и диатомиты, плотные – на опоки.

Силикофлагеллиты – легкие тонкопористые породы, напоминающие диатомиты, которые состоят в большей степени из опаловых створок, их обломков и шипов силикофлагеллит и примесей скелетов диатомей.

Пуццоланы представляют собой слабосцементированные вулканические отложения (пеплов, пемзы, туфов, вулканических песков).

Трассы – твердые пористые аналоги пуццоланов. По химическому составу трассы и пуццоланы отвечают составу липарита-дацита или андезита-базальта.

Многоцелевое использование кремнеземистого сырья объясняется прежде всего его уникальными свойствами: тонкой пористостью, малой объемной плотностью, наличием опаловой (цеолитной и гидратной) воды и, главное, наличием активного кремнезема, способного связывать свободную известь.

Гидравлические («пуццоланические») свойства кремнеземистых пород используются для предотвращения вредного действия свободной кальциевой извести в составе цементов и бетонов. Свободная известь, реагируя с портландцементом, образует сульфоалюминат кальция, который вызывает появление в бетоне и кладке игольчатых кристаллов – «цементных бацилл». Это происходит с увеличением объема до 2,5 раз, а возникающие напряжения разрушают бетон и затвердевшие строительные растворы. Визуально на поверхности бетона и кирпичной кладки появляются белые пятна. Кремнеземистые добавки поглощают свободную известь из растворов. Качество добавок определяется количеством, мг, поглощенной извести из известкового раствора в течение 30 сут одним граммом добавки. Пуццоланы и трассы должны поглощать не менее 50 мг извести; диатомит, трепел или опока – не менее 150 мг. Активность поглощения свободного CaO диатомитов, трепелов и опок может достигать 450 мг/г, а у спонголитов – до 398 мг/г. Активные добавки вводят в цементный клинкер при его помоле с целью связать свободную известь в нерастворимый гидросиликат: $\text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 1,5 \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O}$.

Кроме гидравлических свойств в кремнеземистом сырье обязательным показателем качества служит массовая доля SiO_2 . К вредным примесям относятся оксиды алюминия, железа, кальция, калия и натрия, а также сульфат-ионы. Наиболее качественное кремнеземистое сырье, с массовой долей SiO_2 90 % и более, применяется как адсорбент в пищевой промышленности – при очистке масел, маргарина, фруктовых соков и др. Примесь Al_2O_3 не должна составлять более 3 %, массовая доля $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – не более 2 %.

Для производства белых портландцементов используются диатомиты с массовой долей, %: SiO_2 – не менее 80, Al_2O_3 – не более 8, Fe_2O_3 и CaO – менее 2, SO_3 – менее 3. Для производства портландцементов опоки и трепелы должны иметь массовую долю, %: SiO_2 – не менее 50, Al_2O_3 – менее 10, CaO – менее 15, SO_3 – менее 3. Производство цементов потребляет основную долю кремнеземистого сырья.

В производстве легковесного огнеупорного и строительного кирпича опоки, трепелы и диатомиты применяются при массовой доле, %: SiO_2 – не менее 70, SiO_2 – не более 15, CaO – не более 7. Объемная плотность готового кирпича должна быть не более 1 200 кг/м³. Кремнеземистое сырье с массовой долей SiO_2 более 70 % применяется наиболее широко: для производства стекла, осушителей горючих газов и керамзита. Для производства кондиционирующих добавок (грануляция и опудривание удобрений против слеживания) и термолита возможно использование сырья с массовой долей более 66 и 50 % соответственно. Термолит является легким наполнителем бетонов и производится путем обжига кремнеземистого сырья при температурах 1 150–1 250 °С.

Диатомиты и трепелы для производства термоизоляционных материалов и изделий должны иметь состав, %: SiO_2 – не менее 55, Al_2O_3 – не

более 10, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ – не более 1; а объемная плотность должна быть не более 900 кг/м^3 . Производство термоизоляционных материалов занимает в общем объеме использования кремнеземистого сырья второе место после цементной промышленности. Изделия для термоизоляции – кирпич, сегменты, скорлупы, асбозурит, вулканит, пенодиатомит и др. Небольшое количество диатомитов применяется в качестве наполнителей бумаги, ленолиума, пластмасс, резины, красок, мыла, ядохимикатов, полировальных материалов, носителей катализаторов, при изготовлении керамики и жидкого стекла.

Запасы кремнистых пород в мире оцениваются в 3,4 млрд т. Значительными запасами обладают США и Россия. Ежегодная добыча сырья превышает 1,6 млн т.

По величине запасов, млн м^3 , месторождения опал-кристаллитов подразделяются на очень крупные (опоки и трепелы более 50, диатомиты – более 20), крупные (соответственно, 20–50 и 5–20), средние (3–20 и 1–5) и мелкие (менее 3 и менее 1).

Выделяются два основных геолого-промышленных типа кремнеземистого сырья: 1) вулканогенные месторождения; 2) морские и озерные осадочные месторождения.

Вулканогенные месторождения распространены в областях проявления кислого вулканизма при накоплении рыхлых пеплов, туфовых песков (пуццоланы), а также сцементированных туфов, туфолов и пемзы (трассы). Месторождения пуццоланов и трассов обнаружены на Дальнем Востоке, Северо-Востоке, на Камчатке, на Северном Кавказе. Зарубежные месторождения известны в Крыму, Италии, Греции и других странах.

Осадочные морские и озерные месторождения. Типичными примерами морских осадочных месторождений в литературе служат месторождения диатомитов в Инзенском районе Ульяновской области. Самое крупное Инзенское месторождение находится вблизи железнодорожной станции Инза. Диатомиты образуют мощный (до 60 м) слой среди опок. В составе диатомитов преобладают панцири диатомей и их обломки, скелеты радиолярий, иглы губок, примеси (слюды, глауконит, глинистое вещество, опаловый кремнезем) распространены незначительно. Массовая доля SiO_2 достигает 86 %. Объемная плотность диатомита колеблется от 700 до $1\,000 \text{ кг/м}^3$. Диатомиты представлены пористыми светло-серыми и желтовато-белыми мягкими мелоподобными породами. Благодаря высокому качеству диатомиты месторождения используются в производстве фильтровальных порошков, теплоизоляционных изделий, кондиционеров для удобрений и др. Между опоками и диатомитами наблюдаются постепенные переходы. Опоки сложены опаловым кремнеземом с примесями глины, органики и обломочного материала. По А.Н. Семихатову, диатомиты и опоки образовались в связи с проникновением в эоценовое море планктонных диатомей из Северного Ледовитого океана.

Осадочные озерные месторождения имеют меньшие масштабы и в России распространены в Карелии, на Кольском полуострове и Приморье. За рубежом месторождения озерного типа распространены в Скандинавии, Шотландии, на Аляске и др. В качестве примера обычно приводятся месторождения озер Массельского и других в Кировском районе Мурманской области. Диатомовые илы месторождений имеют мощность от 0,5 до 11 м. Илы сложены панцирями диатомей, их обломками и органикой. Месторождение озера Массельского II представляет залежь диатомитов линзовидной формы длиной 0,8 км, шириной 360 м, мощностью 0,3–2,5 м. Подстилающими породами являются пески, переходящие в супеси с гравием и галькой. Наиболее качественные диатомиты располагаются в центре залежи. Массовая доля SiO_2 в среднем составляет 91,3 %, массовая доля активной кремнекислоты – 71,4 %, объемная насыпная масса – 100–154 кг/м³. Пористость обожженного диатомита 92 %.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности кремнеземистого сырья.
2. Что такое «пуццоланические свойства» кремнеземистого сырья?
3. Какова основная область применения кремнеземистого сырья?
4. Перечислите вредные примеси в кремнеземистом сырье.
5. Охарактеризуйте геолого-промышленные типы месторождений кремнеземистого сырья.
6. Приведите примеры промышленных месторождений кремнеземистого сырья.

ПОЛЕВОШПАТОВОЕ И КВАРЦ-ПОЛЕВОШПАТОВОЕ СЫРЬЕ

Согласно ГОСТ 23034-78 материалы подразделяются на полевошпатовые с массовой долей кварца менее 10 % и кварц-полевошпатовые с массовой долей кварца более 10 %.

Полевые шпаты относятся к наиболее распространенным минералам и представляют собой алюмосиликаты натрия, калия и кальция, кристаллизующиеся в моноклинной или триклинной сингонии. Минералы имеют светлую окраску, низкие показатели преломления, совершенную спайность, твердость их колеблется от 6 до 6,5, объемная плотность – от 2,5 до 2,7. Полевые шпаты близки по структуре, но делятся на две подгруппы: 1) калиевые и бариевые полевые шпаты с моноклинной или близкой к моноклинной симметрией; 2) натриевые и кальциевые полевые шпаты (плагиоклазы) с триклинной симметрией. Общая формула полевых шпатов может быть выражена как WAlSi_3O_8 , где W = K, Na, Ca или Ba, но бариевые полевые шпаты редки.

Обычно полевые шпаты рассматриваются как система, состоящая из трех компонентов: KAlSi_3O_8 (*ортоклаз*, *микроклин*), $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (*альбит*) и $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (*анортит*). Сложность системы обусловлена образованием твердых растворов между компонентами и полиморфизмом. При температуре около 660°C между KAlSi_3O_8 и $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ существует непрерывный твердый раствор. При более низких температурах промежуточные твердые растворы между калиевым полевым шпатом и альбитом нестабильны. При медленном остывании они распадаются, образуя пластинки, пленки, пятна плагиоклаза внутри ортоклаза или микроклина – *пертит* или, в случае обратных соотношений, – *антипертит*. В результате длительного нагревания при температуре $1\ 000^\circ\text{C}$ возвращается состояние твердого раствора. Между ортоклазом и анортитом не образуются твердых растворов и промежуточные различия между ними не встречаются.

Калиевые полевые шпаты обнаруживают постепенные фазовые переходы, связанные с изменением моноклинности-триклинности их симметрии. Наиболее низкотемпературный калиевый полевой шпат (триклинный) называется микроклином, моноклинный калиевый полевой шпат – ортоклазом, наиболее низкотемпературная разновидность ортоклаза – адуляром. Высокотемпературный моноклинный калиевый полевой шпат называется санидином.

Натриевые и кальциевые полевые шпаты (триклинные), называемые плагиоклазами, образуют изоморфный ряд с крайними членами ряд альбит – анортит. Наиболее высокотемпературный член ряда (анортит) имеет температуру плавления $1\ 550^\circ\text{C}$, наиболее низкотемпературный (альбит) – $1\ 100^\circ\text{C}$.

Полевые шпаты наиболее часто встречаются в измененных и неизмененных магматических горных породах (граниты, сиениты, анортозиты, альбититы, фарфоровые камни и др.) и пегматитах, где они часто являются главными минералами. В меньшей мере полевые шпаты развиты в метаморфических (гнейсы, кристаллические сланцы и др.) и осадочных (пески, песчаники и др.) породах.

Красиво окрашенные в зеленые цвета микроклины называются *амазонитами*. Закономерные сростания микроклина и кварца часто образуют «письменную структуру» пегматитов. Кислые плагиоклазы и калинатровые полевые шпаты, обладающие синеватым отливом, носят название *лунный камень*, с искристо-золотым отливом – *солнечный камень*, или *авантюрин*. Плагиоклаз альбит-олигоклазового состава светлой окраски называется *перистеритом*. Основной плагиоклаз – *лабрадор* – обладает на плоскостях спайности переливчатыми отсветами в синих и зеленых тонах. Перечисленные привлекательные разновидности полевых шпатов употребляются в качестве поделочного камня.

Наибольшую ценность для промышленности представляют пегматиты с крупными и чистыми кристаллами полевых шпатов. Кристаллы микроклина в

пегматитах достигают нескольких метров в длину. Пегматиты, обогащенные микроклином и микроклин-пертитом, носят название керамических. Однако в настоящее время пегматитовое полевошпатовое сырье не в состоянии удовлетворить растущую потребность в нем. В связи с этим промышленностью используются продукты обогащения разнообразных горных пород для получения полевошпатовых и кварц-полевошпатовых концентратов. Обогащение осуществляют в основном методами флотации, в меньшей мере применяются электромагнитная и электростатическая сепарация или химическое обогащение при обработке гранитов, аплитов, альбититов, сиенитов, песчаников, и др. Вредными минералами-примесями являются оксиды и гидроксиды железа, гранаты, биотиты, турмалины, пирит, мусковит. Минералы, содержащие железо, ухудшают белизну изделий и их диэлектрические свойства, появление «мушки», слюды резко ослабляют механическую прочность изделий.

ГОСТ 23034-78 определяет преимущественные области применения полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья, его типы, марки и основные параметры качества. По крупности к кусковому относится сырье размером от 20 до 200 мм, к молотому – менее 1,25 мм, тонкомолотому – менее 0,63 мм.

Полевошпатовое и кварц-полевошпатовое сырье применяется в основном в производстве стекла и керамики, в меньшей мере оно используется в производстве абразивов, ситаллов, глазурей, электронной промышленности. При изготовлении лаков и красок, резины, мыла полевошпатовое сырье служит наполнителем. Кроме того, известно применение полевошпатового сырья в составе полировальных порошков, черепицы, белой штукатурки, бетона, теплоизоляционных материалов, силикатных материалов автоклавного твердения, вяжущих материалов, сульфатно-щелочных удобрений и др.

Полевой шпат кусковой и молотый, применяемые для покрытия сварочных электродов, должны иметь массовую долю SiO_2 не менее 70 %, сумму $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ не менее 12 %, а их отношения (калиевый модуль) не менее 3; массовая доля вредных примесей, %: Fe_2O_3 – не более 1; $\text{CaO} + \text{MgO}$ – не более 1,5; SO_3 – не более 0,1; P_2O_5 – не более 0,1. Высококалиевый полевой шпат служит стабилизатором электрической дуги, шлакообразователем и флюсом.

Для производства стекла полевошпатовое сырье должно иметь следующий состав, %, более (табл. 4)

Таблица 4

Полевошпатовое сырье для производства стекла

Стекло	Al_2O_3	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	SiO_2
Вакум	20	12	63

ное

Вредной

примесь в сырье является Fe_2O_3 (для вакуумного стекла – не более 0,3 %, для технического – не более 0,2 %).

Наличие глинозема улучшает механическую прочность вакуумного стекла: повышается его устойчивость к ударам, изгибу, уменьшается коэффициент линейного расширения, возрастает твердость стекла, увеличивается сопротивляемость воздействию химических реагентов. Обычно в стекломассу добавляется до 10 % полевошпатового компонента.

Производство художественного и хозяйственного фарфора и фаянса, электротехнического фарфора является одной из основных областей применения полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья. Массовая доля полевого шпата в шихте для производства фарфора должна быть 26–30 %, полуфарфора – 7–9 %, фаянса – 0–2 %, кроме того, в состав шихты входят черепок (бой изделий), каолин, кварц, беложгущаяся глина. Нагревание смеси приводит к превращению полевых шпатов в вязкую массу, которая в состоянии растворить кварц, каолин и другие компоненты. Застывание массы превращает ее в молочно-белое стекло, армированное кристаллами муллита. Особенно ценным является сырье, существенно состоящее из калиевых полевых шпатов, поскольку при нагревании фарфоровой смеси до температур 1 100–1 400 °С калиевые полевые шпаты переходят в расплав постепенно, при обжиге деформируются слабо, дают плотный монолитный фарфор с высокими декоративными, механическими и диэлектрическими свойствами. Натрокальциевые полевые шпаты (плагиоклазы) плавятся в коротком температурном интервале, пленка расплавленного плагиоклаза покрывает всю поверхность изделия, что затрудняет газоотделение, способствуя образованию пор и снижению диэлектрических свойств фарфора.

В зависимости от области использования к кварц-полевошпатовому сырью предъявляются различные требования (табл. 3).

Оксид железа снижает белизну фарфора (вызывает образование пятен – «мушек») и диэлектрические свойства изделий. Повышение массовой доли суммы оксидов в сырье приводит к снижению вязкости расплава фарфоровой смеси и накоплению в ней газообразных компонентов («прыщи»).

Глазури значительно увеличивают вязкость и химическую стойкость фарфоров и фаянсов. В сырьевую смесь при производстве глазури для получения изделий из фарфора и фаянса вводят от 20 до 50 % полевого шпата.

Добавками к шихте при производстве глазури и специальных стекол (ситаллов и др.) служат лепидолит, амблигонит, поллуцит, цинвальдит, сподумен, петалит. При производстве эмалей для металлической посуды в основном применяют

натровые полевые шпаты в количестве 12–35 %, они увеличивают химическую стойкость покрытий.

Таблица 5
Состав кварц-полевошпатового сырья, %

Производство	K ₂ O + Na ₂ O, не менее	Кварц	Вредные примеси		TiO ₂ , не более	Значение калиевого модуля, не менее
			Fe ₂ O ₃ , не более	CaO + MgO, не более		
Керамики: тонкой строительной	8	Не менее	0,3	1,5	-	2
	7	40	0,2	1,5		0,5
Фарфоровой глазури	12	Не более 8	0,15	0,15	0,05	2,5
Керамических связок для абразивов	12	Не более 8	0,18	1,2	-	3

В производстве абразивов полевошпатовое сырье применяется для лучшего скрепления абразивных зерен. Использование калиевого полевого шпата резко повышает производительность шлифовальных кругов. В качестве связки при изготовлении абразивов служат также перлиты и обсидианы. При этом суммарная массовая доля K₂O + Na₂O должна составлять более 7,5 %, калиевый модуль – более 1, SiO₂ – 70–75 %, Al₂O₃ – 12–16 %, Fe₂O₃ – менее 1 %, CaO – менее 1,5 %. Крошка пегматитов служит для облицовки плит и получения декоративных штукатурок и бетонов.

Добыча полевошпатового сырья в мире превышает 2,5 млн т/г. Основные скопления месторождений полевошпатового сырья в России расположены на Кольском полуострове, в Мамско-Чуйской провинции и Западной Сибири. Основные добывающие страны: Норвегия, Канада, Швеция, Финляндия и ФРГ. Цена полевого шпата в зависимости от сорта составляет 110–123 дол./т. Возможными заменителями полевошпатового сырья являются минералы: волластонит, серицит, тальк, лейцит и горные породы: каолинизированные и грейзенизированные граниты, гидротермально измененные кислые эффузивы.

Месторождения полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья достаточно разнообразны. Наиболее чистое и ценное полевошпатовое сырье заключено в гранитных пегматитах, однако в связи с расширяющимися потребностями в сырье и относительной ограниченности распространения пегматитов главное промышленное значение в мире приобрели магматические месторождения гранитоидов, нефелиновых и щелочных сиенитов, вулканитов и гидротермальные месторождения грейзенизированных гранитов («корнвалийский камень»). Известны месторождения кор выветривания (каолинизированные кислые породы) и осадочные месторождения (пески и песчаники).

Месторождения пегматитов в основном представлены гранитными пегматитами при резко подчиненной роли пегматитов щелочных пород. В России месторождения гранитных пегматитов располагаются в Карелии (Хетоламбинское, Луппико и Большое, Куйваниеми и др.), на Кольском полуострове (Отрадное, Риколатва и др.), на Урале (Тысячное, Алабашское и др.), в Сибири (Баргинское и др.), в Забайкалье (Мамско-Чуйский слюдоносный район) и на Дальнем Востоке. Размеры пегматитовых жил достигают сотен метров при мощности до 10 м.

Типичным примером месторождений пегматитов служит хорошо изученное Хетоламбинское (Хетоламбино), находящееся в Чупино-Лоухском полевошпатово-мусковитоносном районе Карелии. Промышленные пегматиты располагаются в жильных зонах в пределах хетоламбинской свиты среди биотитовых, амфибол-биотитовых и амфиболовых гнейсов. Главная жильная зона при длине до 6 км и ширине до 1,7 км содержит свыше 300 пегматитовых жил. По простиранию размеры пегматитовых жил достигают 500 м, по мощности – до 10 м. В составе жил преобладают олигоклаз, микроклин, кварц, мусковит. В подчиненном количестве встречается биотит. В центральных частях жил блоки плагиоклаза, микроклина и кварца имеют размеры до 4-5 м. В периферийных частях жил размеры зерен резко уменьшаются и текстуры становятся мелкокристаллическими. Зональное строение с изменением текстур от блоковых до мелкокристаллических проявляется в большинстве жил. В центре зональных жил располагаются кварцевые ядра, заключенные в оболочку полевых шпатов. Средняя массовая доля полевых шпатов составляет 38 %, попутно добывается мусковит. Значительные резервы полевошпатового сырья накоплены в отходах обогащения редкометалльных пегматитов.

Магматические месторождения являются основными объектами добычи кварц-полевошпатового сырья в мире. Среди месторождений интрузивных пород преимущественно обрабатываются массивы гранитоидов – аляскитовые граниты (Спрусс-Пайн, США), аплитов (Мелдон, Великобритания; Камадо, Япония; Пайни, США). Протяженность и мощность обрабатываемых тел измеряются сотнями метров и километрами. Выход

получаемых полевошпатовых концентратов достигает 60 %, кварцевых – 15 %.

В России разведаны крупные месторождения кварц-полевошпатового сырья, представленные гранитами-рапакиви (Кольский полуостров), лейкократовыми гранитами (Урал), редкометалльными гранитами (Сибирь), однако ни одно из них не отрабатывается. Эти породы содержат незначительные примеси темноцветов и магнетита (до 5 %) и обогащены микроклином, плагиоклазом и кварцем. К детально описанным в литературе месторождениям подобного типа относится Каричсайское (Узбекистан, северо-западная часть Актауского массива гранитоидов). Объектом отработки являются лейкократовые граниты, располагающиеся в виде даек и штоков среди биотитовых гранитов и кварцевых диоритов. В составе лейкократовых гранитов преобладают плагиоклаз (до 40 %), микроклин (до 35 %) и кварц (до 40 %). Массовая доля слюд и аксессуарных минералов (гранат, сфен, циркон, апатит) – до 10 %.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите разновидности полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья.
2. Охарактеризуйте основные области применения полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья.
3. Какие вредные примеси в полевошпатовом и кварц-полевошпатовом сырье вам известны?
4. Каковы основные геолого-промышленные типы месторождений полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья?
5. Приведите примеры промышленных месторождений полевошпатового и кварц-полевошпатового сырья.

КАОЛИНЫ

Каолинами называют светлоокрашенные глинистые породы, состоящие преимущественно из минерала каолинита.

Каолинит $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ обычно встречается в виде землистых агрегатов белого цвета, иногда окрашенных примесями в красноватые, коричневые или серые цвета, полупросвечивающих с перламутровым блеском в крупнокристаллических разностях и матовым в землистых. Политипами каолинита являются *диккит* и *накрит* (наблюдается редко) и *метагаллуазит* (распространен умеренно). Метагаллуазит образуется при потере большей части межслоевой воды из галлуазита $Al_4Si_4O_{10} \cdot 8H_2O$. Каолинит образуется в процессах разложения полевых шпатов и других алюмосиликатов при выветривании и гидротермальной деятельности. В

качестве примесей в каолинах присутствуют, кроме полиморфов каолина, галлуазит, монтмориллонит, гидрослюда, опал, кристобалит и др. Для каолинов характерна химическая инертность, огнеупорность, белый цвет обожженного черепка.

Процессы обогащения каолинового сырья направлены на получение каолиновых концентратов, применяемых во многих отраслях промышленности. Различают сухой способ сепарации каолинов в воздушном потоке и мокрый способ осаждения каолина из водной суспензии. Окрашенные каолины химически отбеливают и удаляют пигментные частицы оксидов железа и титана в магнитном поле.

Промышленностью используется каолиновое сырье преимущественно в обогащенном виде. Необогащенный каолин (каолин-сырец) применяется для производства огнеупоров и строительной керамики. Каолин-сырец Кыштымского месторождения для производства огнеупоров должен иметь огнеупорность не менее 1 670 °С, суммарную массовую долю $Al_2O_3 + TiO_2$ не менее 20–25 % при массовой доле Fe_2O_3 не более 3,0 %. Каолин Владимирского месторождения для той же цели должен иметь массовую долю Al_2O_3 не менее 28 %, массовую долю Fe_2O_3 не более 2,5 %, огнеупорность не менее 1 710 °С при влажности менее 25 %. Для производства шамотных изделий используется обогащенный каолин с массовой долей Al_2O_3 не менее 35 %, огнеупорностью не менее 1 690 °С, влажностью менее 23 %, массовой долей Fe_2O_3 менее 2,5 %.

Каолин широко применяется в производстве керамики – высокохудожественного, художественного и хозяйственного фарфора и фаянса, электротехнического фарфора, санитарно-строительной и хозяйственной керамики, капсул и огнеупорного припаса. Минимально возможная массовая доля Al_2O_3 для этих целей не должна быть меньше 35 %, массовые доли примесей, %, не более: Fe_2O_3 – 1, TiO_2 – 1,2, суммы $Fe_2O_3 + TiO_2$ – 2, CaO – 0,9, влажность – не более 22 %.

Молотый дегидратированный каолин применяется в качестве наполнителя при производстве изоляционных резиновых проводов и кабелей массовая доля Fe_2O_3 не должна превышать 0,8 %, растворимость в воде – не более 0,28 %. В производстве хлористого алюминия для химической промышленности допускается массовая доля Al_2O_3 не менее 35 %, массовая доля Fe_2O_3 не более 2 %, TiO_2 не более 1 %. Для производства химсредств защиты растений применяется обогащенный каолин с массовой долей Fe_2O_3 не более 1,0 %, влажностью менее 10 %, рН от 6,5 до 8,0, маслосемкостью менее 40 г/100 г, насыпной плотностью до уплотнения не менее 300 кг/м³, после уплотнения не более 500 кг/м³. При производстве резины, пластмасс, искусственных кож и тканей в качестве наполнителя используется обогащенный каолин с массовой долей Fe_2O_3 меньше 1,2 %, SO_3 меньше 0,3 % при влажности каолина сухого обогащения менее 0,7 %.

Каолин обогащенный, а также химически отбеленный, применяемый в производстве бумаги, картона и обоев, подразделяется на два вида: для покрытия и для наполнения. В качестве покрытия каолин используется для производства мелованной бумаги и мелованного картона, в качестве наполнителя – для получения печатной и писчей белой и цветной бумаги и обоев, нормируется белизна – более 73 %. Обогащенные каолины (при условии их высокой белизны), отличающиеся невысокой относительной степенью совершенства кристаллической структуры каолинита, являются ценным материалом для изготовления тонкой керамики и электрокерамики, тогда как каолины, частицы каолинита которых обладают четко выраженными элементами псевдогексагональной кристаллографической огранки и высокой относительной степенью структурного совершенства, с большим успехом применяются в качестве наполнителей. Особенности кристалломорфологии и структуры галлуазита определяют их ценные каталитические свойства. Для производства электротехнического силумина и ультрамарина массовая доля Al_2O_3 должна быть не менее 35 %, Fe_2O_3 – не более 0,8 %.

Обогащенный каолин, предназначенный для парфюмерной промышленности, должен иметь влажность не более 1 % и белизну не менее 70 %. В каолине для производства лаков и красок водопоглощение не должно быть более 0,5 %, рН – от 7,0 до 8,3, маслосмкость – от 35 до 50 г/100 г, растворимость в воде – не более 1 %. В производстве релина массовая доля $Al_2O_3 + TiO_2$ в каолине сухого обогащения Просьяновского месторождения должна превышать 36 %, а влажность – менее 1 %. В каолине сухого обогащения Еленинского месторождения для производства полимерных стройматериалов не допускается массовая доля Fe_2O_3 более 2,6 % при влажности не более 0,3 %. Каолин Турбовского месторождения для производства антисептических препаратов, резиновых изделий, литейного производства, изделий строительной и других отраслей не должен иметь массовую долю Fe_2O_3 более 2,6 %. Каолин сухого обогащения Просьяновского месторождения для производства стекла должен иметь массовую долю, %: Al_2O_3 – не менее 35, Fe_2O_3 – не более 0,8, CaO – не более 0,8 при влажности не более 1 %.

Богатыми каолиновыми рудами считаются каолины с массовой долей минералов группы каолина более 40 %, рядовые и бедные руды, соответственно, 40 и 20.

Мировые разведанные запасы каолина — более 12 млрд т. Наиболее значительная их часть сосредоточена в США, Великобритании и Китае.

Годовое производство товарного каолина в мире составляет 23 млн т. Первое место по добыче занимают США, где годовая добыча сырца около 7 млн т. В России в 1996 г. добыто 650 тыс.т каолина. Основные страны-экспортеры: Великобритания, США, Бразилия. Импортёры – Канада и Япония. Ежегодный импорт в Россию составляет около 0,7 млн т из Украины

и Казахстана. Стоимость обогащенного каолина в США колеблется от 63 до 280 дол./т.

По запасам элювиальные месторождения каолинов подразделяют, млн т: на очень крупные (свыше 50), крупные (20–50), средние (5–20) и мелкие (менее 5).

По генетическим особенностям каолины делятся на первичные и вторичные. *Месторождения первичных каолинов* представлены остаточными и гидротермально-метасоматическими месторождениями. *Месторождения вторичных каолинов* (осадочных) образуются в результате перемыва и переотложения каолиновой коры выветривания. Известны случаи наложения генетических процессов вторичного каолинообразования на первичные гидротермально-метасоматические каолины.

Типичным примером месторождений первичных каолинов является Просяновское в Покровском районе Днепропетровской области Украины. Общая площадь месторождения 225 км². Каолины коры выветривания в виде отдельных залежей располагаются на выветрелых кристаллических породах архея и нижнего протерозоя, представленных плагиогранитами, биотит-плагиоклазовыми гнейсами, микроклиновыми и биотитовыми гранитами, реже амфиболитами. Среди магматических и метаморфических пород встречаются жилы пегматитов, аплитов, кварца и дайки базальтов и порфириров. Перекрывающими породами являются песчано-глинистые отложения сарматского и четвертичного возраста. В разрезе каолиновых залежей наблюдается зональность в смене верхней части, сложенной нормальными каолинами, их щелочными разновидностями. Ниже расположена зона гидрослюд, дресвы и выветрелых коренных пород. Нормальные каолины характеризуются каолинитовым составом (90–95 % каолина) с примесями кварца, гидрослюд и др. Зона щелочных каолинов отличается наличием не полностью замещенных полевых шпатов и гидрослюд (массовая доля каолина 60–70 %) и является источником полевошпатового сырья. Наиболее высокое качество имеют каолины, возникшие за счет выветривания гранитов, аплитов и пегматитов. Цвет такого каолина в основном снежно-белый.

Чалганское месторождение является примером осадочного месторождения каолинов. Оно расположено в Шамановском районе Амурской области. Продуктивные каолинсодержащие пески приурочены к песчаной толще неогена (мощностью до 30 м). Состав песков каолинит-полевошпат-кварцевый, причем каолинит составляет треть массы песков. Каолин дисперсный и тонкодисперсный, огнеупорность до 1 780 °С. Месторождение имеет осадочный генезис. На первом этапе формировались аркозовые пески, затем происходила их каолинизация и перемыв.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите ценные качества каолинов.
2. Охарактеризуйте области применения каолинов.
3. Какие вредные примеси в каолиновом сырье вам известны?
4. Назовите геолого-промышленные типы месторождений каолинового сырья.
5. Приведите примеры промышленных месторождений каолинового сырья.

ЦЕОЛИТОВОЕ СЫРЬЕ

К цеолитовому сырью относят породы, содержащие минералы группы цеолитов – каркасных водных алюмосиликатов щелочных и щелочноземельных металлов с открытым крупноячеистым каркасом, состоящим из $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_2$ -тетраэдров. Кремнекислородные тетраэдры формируют четырех-, пяти-, шестичленные и более кольца, соединенные в цепи-слои. В ячейках каркаса размещаются катионы, компенсирующие отрицательный заряд каркаса. Характерной чертой цеолитов является легкость, с которой происходит обмен катионами, а также способность терять часть или всю воду без изменения кристаллической структуры. Каркас цеолитов такой прочный, что кристаллы сохраняют свою форму в процессе катионного обмена. Каналы в каркасе достаточно крупные, чтобы ионы свободно проходили через него. Удаление молекул воды протекает непрерывно и без разрушения структуры цеолита в отличие от большинства гидратированных неорганических соединений. В то же время, по мере удаления воды оставшаяся вода удерживается сильнее, а перемещение атомов каркаса, обладающего некоторой гибкостью, приводит к уменьшению длины одной или более сторон элементарной ячейки. Пустотность цеолитов составляет около 50 % их общего объема, создавая высокую емкость ионного обмена и способность к модификации за счет катионного обмена и регенерации.

С целью увеличения пористости цеолиты подвергаются модификации с помощью термической обработки и обработки кислотами. Гигроскопическая влага начинает удаляться из цеолитов при нагревании их до $105\text{ }^\circ\text{C}$, кристаллическая вода – при $180\text{ }^\circ\text{C}$, цеолитная влага – при температурах свыше $350\text{ }^\circ\text{C}$. Наиболее эффективна кислотная модификация цеолитов за счет растворения примесей, блокирующих каналы, при этом резко увеличивается размер полостей. Модификация цеолитов кальцием увеличивает исходную сорбционную емкость в несколько раз. В процессах адсорбции и ионного обмена цеолитами могут избирательно поглощаться ионы или молекулы, каталитическая активность которых при этом резко возрастает. Адсорбированные молекулы могут быть затем удалены, а обменные катионы замещены другими, в результате чего цеолиты

регенерируются и снова могут работать в разных режимах. Модификация их кислотами может расширять ячейки цеолитовой сетки.

Обезвоживание цеолитов резко увеличивает их сорбционные свойства, причем вода может быть легко возвращена. Уникальная способность цеолитов к обратимой дегидратации, способность к катионному обмену, открытые каркасные структуры, могущие играть роль молекулярных сит, определяют коммерческую ценность как синтетического, так и природного цеолитового сырья, однако стоимость синтетических цеолитов, например в США, в 4–10 раз выше природных.

Группа природных цеолитов включает около 40 минералов с общей формулой $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y]Z \cdot nH_2O$, где M – катион/ы/ с валентностью n , z – число молекул воды, а отношение y/x обычно находится в пределах от 1 до 5. В настоящее время практическое значение имеют:

клиноптилолит $(Na,K)_4 Ca[(AlO_2)_6(SiO_2)_{30}]24H_2O$;

морденит $Na_8[(AlO_2)_8(SiO_2)_{40}]24H_2O$;

шабазит (хабазит) $Ca_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_8]13H_2O$;

эрионит $(Mg,Ca,Na_2,K_2)_{45}(AlO_2)_9(SiO_2)_{27}27H_2O$.

Меньшую роль играют:

гейландит $Ca_4(AlO_2)_8(SiO_2)_{28}24H_2O$;

филлипсит $(Ca,K_2,Na_2)_5(AlO_2)_{10}(SiO_2)_{22}20H_2O$;

анальцит $Na_{16}(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{32}16H_2O$;

ферьерит $Na_{1,5}Mg_2(AlO_2)_{5,5}(SiO_2)_{30,5}18H_2O$.

К цеолитам с неясным промышленным значением относятся:

ломонтит $Ca_4(AlO_2)_8(SiO_2)_{16}16H_2O$;

натролит $Na_{16}(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{24}16H_2O$.

Размер «окон», нм, наибольший у клиноптилолита – 0,41x0,62, морденита – 0,67x0,17, шабазита – 0,37x0,42 и эрионита – 0,36x0,52. По молекулярно-ситовым свойствам альтернативных природным цеолитам полезных ископаемых не выявлено, кроме того, по сравнению с другими природными сорбентами они более эффективно работают в области низкого парциального давления сорбата.

Природное цеолитовое сырье представляет собой разнообразные горные породы с микрокристаллами цеолитов при содержании их 40–50 % и более. После дробления таких пород может быть получен товарный продукт, который часто используется без обогащения и дополнительной обработки. Обычными примесями в цеолитовом сырье являются монтмориллонит, кристобалит, биотит, полевые шпаты, обломки эффузивных и осадочных пород, вулканического стекла. По минеральному виду цеолитов выделяют клиноптилолит-, морденит-, шабазитсодержащие породы и промежуточные разновидности. Наиболее широко распространенным сырьем являются клиноптилолитсодержащие породы.

Наибольшую адсорбционную емкость имеет шабазит. Клиноптилолиты и морденит уступают по этому показателю в 1,3–1,5 раза,

однако по сумме обменных катионов клиноптилолит имеет лучшие характеристики. Известно, что по термостойкости гейландиты делятся на три группы: гейландиты 1, структура которых не выдерживает нагрева до 500 °С; гейландиты 2 (считаются промежуточными по термостойкости) и гейландиты 3 (клиноптилолиты), выдерживающие нагрев до 700–800 °С с сохранением высокой доли кристаллической структуры. Термостойкость обусловлена химическим составом гейландитов, а именно соотношением: Al/Si и $(N^{+} + K^{+})/Ca^{+2}$. Для гейландитов 1 $Al/Si < 4$ и $(Na^{+} + K^{+})/Ca^{2+} < 1$; если знак обратный, то образцы относятся к клиноптилолитам; к гейландитам 2 относят образцы с промежуточным составом. Щелочная разновидность клиноптилолита более устойчива по отношению к кислотам и температуре, чем щелочноземельная, но последняя несколько предпочтительней по аммонiu.

В промышленности цеолитсодержащие породы применяются для осушки газов, очистки жидких продуктов (маслофреоновых смесей, сероорганических соединений, нефтепродуктов и др.), для получения кислорода и азота из воздуха, очистки воздуха от CO_2 . К природному цеолитовому сырью для использования его в процессах нефтепереработки и нефтехимии предъявляются следующие требования: массовая доля клиноптилолита не менее 70 %, фракция 3-6 мм, динамическая емкость не менее 80 мг/см³, потери при прокаливании не более 15 %, насыпная масса не более 1 200 кг/м³, виброизнос не более 1 %. Для осушки газов и воздуха в качестве адсорбента применяется цеолитовое сырье с массовой долей клиноптилолита не менее 60 %, с размерами гранул 4–6 мм, насыпной плотностью не более (760±20) кг/ м³, механической прочностью на раздавливание 0,65 кгс/мм² и динамической емкостью по парам воды 8–10 мас. %. Для осушки и очистки газов и жидкостей и создания защитного слоя в адсорбентах применяются природные цеолиты с массовой долей клиноптилолита не менее 70 %, с насыпной плотностью не более 1 200 кг/м³, потерями при прокаливании не более 15 %.

Катионообменные свойства цеолитов позволяют использовать их в качестве пермутитов, для очистки соков, вин и пищевых жиров, в медицине в качестве энтеросорбентов и радиопротекторов. В области экологии для извлечения серы из отходов газов промышленных предприятий, наполнителей фильтров для питьевого и промышленного водоснабжения, радиоактивных изотопов из отходов атомного производства, для дезактивации почв и вод, очистки городских и промышленных стоков от аммонийного азота и тяжелых металлов, в том числе из подземных и рудничных вод.

Примером может служить дробленый туф месторождения Тедзами-Дзегви (Грузия), используемый как фильтрующий материал для очистки природных и сточных вод от взвешенных частиц и ионных примесей, а также для извлечения ионов. Массовая доля клиноптилолита в зернах туфа не должна быть менее 60 %, насыпная масса – не более 1 100 кг/м³,

стираемость – не более 2,5 %, измельчаемость – не более 4 %, прирост сухого остатка – не более 20 мг/см³, прирост окисляемости – не более 10 мг/см³, прирост кремнекислоты – не более 10 мг/см³. Обменная емкость по NH₄⁺ не менее 2 мг-экв/г.

Для удаления аммонийного азота, смягчения воды и уменьшения концентрации органических веществ из городских сточных вод на очистных сооружениях канализации используется сырье с массовой долей клиноптилолита не менее 60 %, термоустойчивостью не менее 350 °С, обменной емкостью не менее 0,3 мг-экв /г, прочностью на сжатие не менее 300 кгс/см², с размерами фракции 1-2 мм. Такая же массовая доля клиноптилолита в сырье (щебень и песок дробленые из цеолитов) требуется для применения в качестве грузочного материала водопроводных фильтров и доочистки сточных вод. В качестве тампонажных смесей цеолитовое сырье (порошок с зернами неправильной формы) используется при массовой доле клиноптилолита не менее 60 %, массовой доле гигроскопической влаги не более 8 %, остатком на сетке № 008 не более 15 % .

Цеолиты применяются как модифицирующие добавки и наполнители резины, клеев, пластмасс, взрывчатых веществ, линолеума, лаков, красок и бумаги, для замены триполифосфатов в производстве моющих средств, как добавки при производстве цемента, пористых заполнителей легких бетонов и панелей, как флотационный реагент при обогащении полиметаллических руд, в производстве огнетушащих порошков, силикатного кирпича, жидкого стекла. Их используют в качестве катализаторов в нефтехимии (крекинг нефти и др.), при дегидрировании пропана, демитилировании толуола, дегазации спиртов, окислении этилена. Для создания глубокого вакуума используется способность цеолитов к сорбции газов.

В сельском хозяйстве цеолиты применяют в качестве мелиорантов, добавок к минеральным и органическим удобрениям. Для применения в растениеводстве (порошки цеолитов и азот-цеолитовых удобрений) массовая доля клиноптилолита не должна быть менее 50 %, в отдельных случаях требования к показателям качества относятся к статистической влагоемкости, массовой доле гелеобразующих веществ и др. Основными показателями качества цеолитов в случае применения их для получения кормов в животноводстве и птицеводстве (порошки и мука) служат: массовая доля цеолитов (клиноптилолита) – 50 % и более; влажность – 10 % и менее; массовая доля фтора – не более 0,15 %; мышьяка – не более 0,01 %; свинца – не более 0,002 %; ртути – не более 0,0007 %; кадмия – не более 0,05 %. Массовая доля металломагнитных примесей в сырье не должна превышать 130 мг/кг. Цеолитсодержащие породы применяются как дезодоранты для улучшения гигиенических условий в животноводческих помещениях и в составе ветеринарных препаратов, они препятствуют слеживаемости минеральных удобрений и выносу из них дождевыми и талыми водами ценных

компонентов, улучшают структуру почв и способствуют сохранению в них влаги.

Цеолиты с повышенным содержанием алюминия рассматриваются как нетрадиционное потенциальное сырье для его получения. Отсевы дробления природных цеолитов служат для производства сухих отделочных минералополимерных смесей, при этом массовая доля клиноптилолита может быть не менее 20 %.

Мировые запасы цеолитового сырья составляют десятки миллиардов тонн. Из них основная часть приходится на США, Японию и страны СНГ (по 10–20 млрд т); от 1 до 10 млрд т выявлено в Италии, Югославии, Болгарии. Данных о мировом потреблении цеолитового сырья не имеется. На конец восьмидесятых годов мировое потребление цеолитового сырья приблизительно оценивают в 1–3 млн т/г.

В Российской Федерации суммарные запасы по категориям $A+B+C_1$ составляют 568 млн т, C_2 – 767 млн т. Добыча цеолитов в России находится на уровне 12–15 тыс. т/г.

По величине запасов, млн т, выделяют месторождения: крупные – сотни, средние – десятки, мелкие – единицы. Месторождения цеолитов, имеющие практическую ценность, образуются в результате диагенетических или гидротермальных процессов и связаны в первом случае с осадочными и вулканогенно-осадочными формациями, а во втором – с вулканогенными формациями. Наиболее крупными являются вулканогенно-гидротермальные стратиформные месторождения, рудные тела которых представлены пластами и линзами туфов разного состава. Цеолиты сформировались в них путем замещения вулканического стекла кислых, основных и щелочных вулканитов разного состава, образуя пласто- и линзообразные залежи площадью в десятки и сотни квадратных километров (Хонгуруу, Шевыртуйское в России, месторождения штата Калифорния в США и др.)

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите основные промышленные минералы цеолитов.
2. Охарактеризуйте ценные качества цеолитового сырья и области применения цеолитов.
3. Назовите геолого-промышленные типы месторождений цеолитового сырья.
4. Приведите примеры промышленных месторождений цеолитового сырья.

СЫРЬЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА

ГЛИНИСТОЕ СЫРЬЕ

В состав глинистого сырья входит группа горных пород, состоящая из разных минералов, размер частиц которых не превышает 0,01 мм в диаметре. Среди глинистых пород выделяют глины, аргиллиты и глинистые сланцы.

Глины – землистые пластичные тонкозернистые осадочные горные породы, способные образовывать с водой вязкое тесто, сложенные преимущественно глинистыми минералами и имеющие размеры частиц менее 0,01 мм.

Аргиллиты – камнеподобные осадочные горные породы, сложенные глинистыми минералами также пелитовой размерности.

Глинистые сланцы – метаморфические сланцеватые породы, состоящие из глин.

Во всех глинистых породах кроме частиц пелитовой размерности с диаметром менее 0,01 мм (глинистая фракция) встречаются частицы алевритовой размерности (0,01–0,1 мм) и песчаные частицы от 0,1 до 0,2 мм в диаметре.

Суглинки – рыхлые глинистые породы, содержащие, однако, более половины частиц размером свыше 0,01 мм.

Супеси – рыхлые песчанистые породы, содержащие 10–30 % частиц глины.

Лессы – рыхлые эоловые породы светло-желтой окраски, состоящие из мельчайших зерен (до 30 % пелитовой фракции) глин и песчаной пыли с размерами зерен 0,01–0,05 мм.

Главными минералами глин являются: группа смектитов – монтмориллонита (нонtronит, сапонит, бейделлит); группа иллита – вермикулита (гидрослюда, или глинистые слюды – гидромусковит, гидробиотит, браммалит). Химический состав основных представителей групп:

монтмориллонит $(\text{Na}, \text{Ca})_{0,33} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$;

иллит $(\text{K}, \text{H}_3\text{O}) (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} [(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}]$;

палыгорскит $\text{Si}_8 \text{Mg}_5 \text{O}_{20} (\text{OH})_2 (\text{OH}_2)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$;

вермикулит $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3 (\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10} (\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Глинистые минералы имеют много общих физических свойств: они не встречаются в виде макроскопических кристаллов, липнут к языку, принадлежат к группам монтмориллонита, иллита или вермикулита. Структуры минералов группы монтмориллонита сходны со структурами пиррофиллита, но содержат обменные катионы и непостоянные количества молекул воды между слоями, что приводит к разбуханию этих минералов в

воде. Иллиты практически являются тонкозернистым мусковитом, переслаивающимся с монтмориллонитом, а вермикулит – аналогом монтмориллонита с тальковой структурой. Как сырье вермикулит был рассмотрен выше. Иногда в группу глинистых пород включают каолиниты, однако, минералы группы каолинита имеют составы $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ и построены из Si_4O_{10} -слоев, чередующихся со слоями гиббситового типа. В связи с особенностями состава и структуры каолинитам не присущи перечисленные выше свойства глинистых минералов и глин в целом.

По преобладающему минеральному составу различают глины монтмориллонитовые (бентониты), гидрослюдистые (в том числе глауконитовые), палыгорскитовые, каолинитовые и смешанного состава. *Палыгорскитовые глины* характеризуются гидрофильностью, но не разбухают в воде. Для них обычны пептизация и размокание. Лучше диспергируются монтмориллонит-палыгорскитовые разности глин, при этом одинаково хорошо как в пресной, так и в соленой воде независимо от концентрации солей и степени обработки их химическими реагентами. Почти половина мировых запасов палыгорскитовых глин приходится на Испанию. Крупными запасами обладают США, Индия, Сенегал. В странах СНГ запасы палыгорскитовых глин имеются, млн т: на Украине – 11,4, в Узбекистане – 7,9, Азербайджане – 13,6. Запасы глин Подмосковского бассейна составляют 58 млн т. Годовая добыча палыгорскитовых глин в США – 1 млн т.

Бентониты — это группа различных по происхождению глинистых пород существенно смектитового состава (смектиты – глинистые минералы, представляющие собой слоистые силикаты: монтмориллонит, бейделлит, сапонит и др.). Они обычно плотные, жирные на ощупь (мылкие), с оскольчатой или полураковистым изломом, серого цвета с различными оттенками. Во влажном состоянии бентониты очень пластичные, вязкие, липкие, имеют высокую связующую способность, легко режутся ножом. С водой образуют пластичное тесто, гели и суспензии вплоть до коллоидных растворов. При погружении в воду бентониты или набухают, увеличиваясь в объеме до 14 раз, при сохранении на некоторое время первоначальной формы, или рассыпаются без увеличения объема. В сухом состоянии бентониты имеют камнеподобный облик, значительную прочность, с трудом режутся ножом, но бывают рыхлыми, легко распадающимися на мелкие куски и чешуйки.

Общим свойством всех разновидностей бентонитов является высокая гидрофильность. По отношению к воде их разделяют на набухающие и ненабухающие, что обусловлено составом обменных катионов (находящихся в межслоевых промежутках смектитов). У набухающих бентонитов обменные катионы представлены в основном натрием, у ненабухающих – кальцием и магнием. Поэтому первые называют щелочными, а вторые – щелочноземельными. Все смектиты обладают ярко выраженной способностью к внутрикристаллическому набуханию, благодаря чему

бентониты характеризуются высокими связующими, ионообменными и сорбционными свойствами, а их суспензии – тиксотропией. В природе среди щелочных встречаются бентониты преимущественно монтмориллонитового, реже кальцит-монтмориллонитового и кристобалит-цеолит-монтмориллонитового минерального типов. Бентониты сапонитового, ферримонтмориллонитового, палыгорскит-монтмориллонитового, гидрослюдисто-бейделлитового и нонтронитового типов обычно щелочноземельные.

Мировые запасы бентонитов превышают 4 млрд т. Наибольшими запасами обладают, млн т: Китай (2 400), США (800), Турция (400). В России сосредоточено 124 млн т бентонитов.

Глинистое сырье разделяют и в соответствии с его свойствами.

Огнеупорность глин зависит от их состава и определяется температурой плавления. Согласно ГОСТ 9169-75 глины разделяются по огнеупорности на три группы:

огнеупорные – температура плавления более 1 580 °С;

тугоплавкие – температура плавления от 1 580 до 1 350 °С;

легкоплавкие – температура плавления менее 1 350 °С.

Состав огнеупорных глин определяется преобладанием галлуазита, каолинита и гидрослюд (массовая доля Al_2O_3 может достигать 39,5 %). Вредными примесями в огнеупорных глинах являются кальцит, гипс, сидерит, а также соединения марганца и железа. В тугоплавких глинах снижена доля Al_2O_3 (до 32 %), больше примесей неглинистых минералов, выше доля оксидов железа. Легкоплавкие глины обычно полиминеральны, со значительным количеством минералов-примесей, среди которых присутствуют кварц, карбонаты и др. Массовая доля глинозема в легкоплавких глинах до 18 %.

Пластичность – это способность глин формоваться при добавлении небольшого количества воды. Число пластичности $\Pi = W_1 - W_2$, где W_1 – влажность пробы, соответствующая нижней границе текучести глины; W_2 – влажность пробы, соответствующая границе раскатывания глины. По числу пластичности глины разделяются на высокопластичные (Π более 25), среднепластичные (Π от 15 до 25), умереннопластичные (Π от 7 до 15), малопластичные (Π от 3 до 7) и непластичные – глинистые сланцы и аргиллиты. Число пластичности суглинков от 7 до 17, супесей – менее 7.

Связующая способность – это свойство глин связывать частицы другого непластичного (тощего) материала и образовывать при высыхании твердую массу (керамические изделия, строительные работы).

Спекаемость глин – их способность частично расплавляться ниже температуры плавления и после охлаждения давать камнеподобное тело – черепок. Температура спекания – это температура, при которой водопоглощение обжигаемого черепка уменьшается до 5 %. Температура спекания зависит от химического состава глин и минеральных примесей.

Интервалом спекания называется температурный интервал от начала спекания до начала вспучивания. Оптимальный интервал спекания для глинистого сырья составляет 100–150 °С.

Вспучивание – способность некоторых глинистых пород увеличивать объем при обжиге. Хорошо вспучиваются монтмориллонитовые глины и глинистые сланцы, содержащие органику.

Усушка (усадка) – свойство глинистого сырья уменьшать объем при высушивании. Различают воздушную и огневую (результат обжига) усадку. Обычно измеряют линейную усадку образца.

Адсорбционная способность – способность глинистого сырья адсорбировать на поверхности глинистых минералов ионы и молекулы различных веществ. Адсорбционная способность зависит от степени дисперсности и состава глин. Наибольшей адсорбционной способностью обладают монтмориллонитовые глины, кроме того, эти глины являются прекрасными эмульгаторами и катализаторами. Такие глины носят название бентониты.

Маслоемкость – свойство глин или другого любого пигмента поглощать масло. Маслоемкость определяется количеством масла, необходимого для доведения 100 г пигмента до пастообразного состояния (маслоемкость первого рода) или до готовой краски (маслоемкость второго рода).

Кроющая способность (укрывистость) и окраска – свойство делать невидимым прежний цвет окрашиваемой поверхности. В зависимости от цвета глин, применяемых в качестве ингредиента красок, глинистые пигменты называются охрой, мумией, умброй, болюсом и др. Количественно это свойство красок выражается в граммах на квадратный метр готовой краски или сухого пигмента.

Способность образовывать устойчивые суспензии с избытком воды. Устойчивые суспензии препятствуют оседанию попавших в них крупных частиц, что очень важно при использовании глинистых растворов при бурении скважин, создании паст и др.

Относительная химическая инертность позволяет использовать глины в качестве наполнителей в производстве бумаги, резины для придания ей жесткости и кислотоупорности и др.

Глинистые породы имеют чрезвычайно обширные области применения в промышленности. Каждый потребитель глинистого сырья предъявляет свои требования к его качеству: кирпичное производство – легкоплавкость и спекаемость, керамическое производство и фарфорофаянсовое – однородность, химическое – чистоту и спекаемость и др. Огнеупорные глины используются для производства огнеупорных изделий в металлургии и в литейном производстве в машиностроении. Основным показателем для их применения является температура плавления – не менее 1580°С. Огнеупорные глины состоят из смеси каолиновых и гидрослюдистых составляющих.

Для применения глин в литейном производстве, в качестве минеральных связующих в составе формовочных и стержневых смесей, необходимая массовая доля Al_2O_3 должна составлять не менее 23 %, массовая доля Fe_2O_3 – не более 1,5 %, коллоидальность – не менее 8 %, потеря массы при прокаливании – не менее 18 %, а концентрация обменных катионов – не менее 7 %. Кроме того, определяется предел прочности при сжатии в сухом и влажном состоянии, который не может быть ниже, соответственно, 1,5 и 0,2 Па. Минимальная массовая доля Al_2O_3 в огнеупорных глинах не менее 13 %.

Большая часть огнеупорных глин расходуется на производство огнеупорных изделий – шамотных кирпичей, сталеразливочного припаса и др. Шамотные изделия содержат в качестве тощего материала шамот – молотую обожженную огнеупорную глину или необожженные порошки сухарных глин. Для получения полукислых изделий добавляют кварц. Алюмосиликатные изделия огнеупорные подразделяются на полукислые (массовая доля Al_2O_3 менее 28 %), шамотные (28-45 % Al_2O_3) и высокоглиноземистые (более 45 % Al_2O_3). Масштабы применения высокоглиноземистых и шамотных огнеупоров намного превосходят применение полукислых. В целом для изготовления огнеупорных изделий и мертелей требуются огнеупорные глины с массовой долей Al_2O_3 не менее 13 % и низкой массовой долей красящих оксидов – менее 5,5 % Fe_2O_3 .

В производстве керамики группы глинистого сырья в зависимости от массовой доли Al_2O_3 , %, в прокаленном состоянии разделяются: на высокоглиноземистые – свыше 45, высокоосновные – 38–45, основные – 28–38, полукислые – 28–14, кислые – менее 14. Для производства керамики: плиток для полов, канализационных труб, лицевых камней – массовая доля Al_2O_3 в огнеупорных глинах не должна быть менее 26 %, для производства керамических и фасадных плиток – не менее 30 % Al_2O_3 , для строительного фаянса – не менее 32 %. В производстве фарфора, фаянса, радиокерамики, стеклоприпаса, санитарно-строительных изделий, облицовочных плиток нормируются массовые доли следующих компонентов, %: $Al_2O_3 + TiO_2$ – не менее 33; Fe_2O_3 – не более 1,1; $Fe_2O_3 + TiO_2$ – не более 2,5; CaO – не более 1; MgO – не более 1; SO_3 – не более 0,25; $K_2O + Na_2O$ – не более 3,0.

Для художественных и хозяйственных фарфоровых и фаянсовых изделий и электротехнического фарфора требуются огнеупорные глины с низкой массовой долей красящих оксидов – менее 2,5 % суммы $Fe_2O_3 + TiO_2$. Тугоплавкие глины в основном применяются при производстве керамики: для дренажных труб и стеновых камней массовая доля Al_2O_3 должна составлять не менее 12 %, для внутренней и фасадной облицовки полов, кислотоупорных изделий и канализационных труб – не менее 17 % Al_2O_3 , для облицовочных и фасадных плиток и стройкерамики – не менее 22 % Al_2O_3 . В качестве гончарной глины используются тугоплавкие глины с массовой долей Al_2O_3 от 14 до 38 %.

При разведке, испытаниях и утверждении запасов глин, суглинков, аргиллитов, алевролитов, сланцев и других для производства керамических кирпичей и камней даются показатели качества глинистого сырья. Общая минералого-петрографическая характеристика глинистой породы должна включать следующие данные:

условие образования месторождения (генетическая группа);
текстурно-структурные особенности;
минеральный состав;
химический состав.

По химическому составу массовая доля SiO_2 не должна составлять более 80 % при массовой доле кварца не более 60 %. В сумме соединений серы (в пересчете на SO_3) массовая доля сульфидной серы не должна быть более 0,8 %. При наличии массовой доли SO_3 более 0,5 %, в том числе сульфидной серы более 0,3 %, в процессе испытаний должны определяться способы устранения высолов и выцветов на обожженных изделиях путем перевода растворимых солей в нерастворимые. Сумма оксидов железа не должна быть более 14 %, сумма оксидов натрия и калия – не более 7 %.

Массовая доля в глинистой породе тонкодисперсной фракции менее 1 мкм должна быть более 15 %, фракции менее 10 мкм – более 30 %, массовая доля фракции 0,01–0,05 определяется, но не регламентируется. Размер карбонатных включений свыше 3 мм в сырье не допускается. Карбонатные включения, которые по сумме массовых долей $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ разделяются на высокоактивные (более 70 %), среднеактивные (50–70 %) и малоактивные (менее 50 %), не должны присутствовать в глинистом сырье в массовых долях, %, соответственно, более 0,05, 0,1 и 0,5 для размеров включений от 2 до 3 мм.

Для производства керамзитового гравия могут использоваться глинистые сланцы, содержащие следующие оксиды, %: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = 11,68–23,67$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 9,5–6,0$; $\text{SiO}_2 = 51,9–60,28$; $\text{CaO} = 0,58–4,0$; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 2,2–3,2$; $\text{SO}_3 = 0,27–1,29$; органика = 0,82–0,98 при влажности менее 2 %. Такой химический состав позволяет иметь температуру вспучивания 1 100–1 200 °С с интервалом вспучивания 30 °С и коэффициентом вспучивания более 2,5. С близкими к приведенным показателями для производства керамзита могут применяться глины, аргиллиты и глинистые сланцы с массовой долей органики не менее 3 % при температуре вспучивания 1 250 °С. Для производства аглопоритовых щебня и песка используются глины, алевролиты, песчано-глинистые сланцы, суглинки, супеси, аргиллиты, лессы, имеющие массовые доли, %: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – не менее 20; $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ – не более 8; SiO_2 – не более 85; $\text{CaO} + \text{MgO}$ – не более 12; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ – не более 12; SO_3 – не более 1,5. Такое же сырье может применяться для производства аглопорита с несколько другими показателями, %: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = 5–16$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 3–7$; $\text{SiO}_2 = 60–85$; CaO – менее 10; MgO – менее 3; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 1,5–6$; SO_3 – менее 13; число пластичности – от 10 до 30.

Бентонитовые глины успешно применяются при производстве керамзитового песка и гравия. Для этой цели бентонитовые глины должны иметь массовые доли, %: Al_2O_3 – 14–20; $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ – 4,5–6,0; SiO_2 – 53–68; CaO – 1,0–3,0; MgO – менее 4; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ – 1,5–5,0; SO_3 – менее 1,5; органика 0,3–2,0. Интервал вспучивания составляет 90–140 °С, число пластичности – от 25 до 30, коэффициент вспучивания – от 2 до 3. Бентонитовые глины используются также для связки материалов в формовочных смесях при производстве чугуновых и стальных отливок. Массовая доля Al_2O_3 должна при этом составлять 12–15 %, Fe_2O_3 – менее 6 %, SiO_2 – 54–65 %, $\text{CaO} + \text{MgO}$ – 3–7 %, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ – 1,5–3,0 %, SO_3 – не более 0,2 %. Бентонитовая глина для производства тонкой и строительной керамики должна иметь показатели качества, соответственно: Fe_2O_3 – не более 1,75 и 2,25 %; SO_3 – не более 0,50 и 0,75 %; бентонитовое число (набухаемость) – более 80 и 75 мл; показатель адсорбции не менее 200 и 150 мг/г; предел прочности на изгиб – не менее 20 кг/см²; влажность – не более 20 %.

Для производства железорудных окатышей бентонитовое число должно быть не менее 8 мл, а влажность не более 25 %. Наибольшее бентонитовое число (более 80 мл) необходимо для применения бентонитовой глины в производстве комбикормов, при этом влажность сырья не должна быть более 8 %, массовая доля металломагнитных примесей – менее 100 мг/кг, массовая доля песка – менее 6 %, глина не должна иметь запаха, а ее рН должен быть равен 8. Очистка простых полиэфиров, растительных масел и жиров бентонитовыми глинами возможна при светло-сером цвете сырья, массовой доле свободной кислоты в пересчете на H_2SO_4 менее 0,3 %, ацетатной пробе менее 0,28 мг-экв/г, насыпной массе менее 800 кг/м³. Для очистки смазочных масел возможно применение светло-желтой, белой и серовато-белой бентонитовой глины с влажностью не более 28 %.

В производстве изоляторов свечей зажигания используется обогащенная бентонитовая глина (бентаколл), представляющая собой серый порошок, образующий гель с массовой долей не менее 80 см³, с рН менее 7 и влажностью 5–15 %. Для применения бентонитовых глин в производстве стержневых смесей и противопоригарных покрытий минимальная массовая доля монтмориллонита должна быть не менее 30 %, концентрация обменных катионов – более 30 мг-экв/100 г сухой глины, массовая доля карбонатов в пересчете на CaCO_3 – не более 10 %, массовая доля сульфидной серы – не более 0,3 %, Fe_2O_3 – не более 12 %, коллоидальность – не ниже 10 % и водопоглощение – более 1,5 %.

Бентонитовые, палыгорскитовые и гидрослюдистые глины применяются в производстве глинопорошков для буровых растворов. Основными показателями качества бентонитовых глин для этой цели являются выход глинистого раствора (не менее 4,5 %) и массовая доля песчаной фракции (не более 10 мас. %). Для отдельных марок глинопорошка учитываются сумма обменных катионов, мг-экв/100 г, Ca, Mg, Na, K и их

отношения. Для палыгорскитовых глин показатели качества аналогичны. Производство связующего для камней пустотелых на обжиговой связке требует умеренно-пластичных глин – с числом пластичности не менее 7.

По масштабам, млн т, месторождения глин подразделяются: на крупные – более 20, средние – 5–20 (для бентонитов 10–20), мелкие – менее 5 (для бентонитов менее 10) и очень мелкие – менее 1.

Девяносто девять процентов запасов огнеупорных и пятьдесят процентов бентонитовых глин бывшего СССР принадлежали к осадочному геолого-промышленному типу месторождений так же, как и все палыгорскитовые глины. К другим известным геолого-промышленным типам месторождений глин относят месторождения выветривания, аргиллизации (гидротермально-метасоматические) и метаморфические месторождения глинистых пород.

Осадочные месторождения глин подразделяют на морские и континентальные. Наибольшее промышленное значение из *морских осадочных месторождений* имеют месторождения открытой части шельфа, где мощность залежей глин достигает 100 м, площадь – сотни квадратных километров, а качество глин характеризуется однородностью зернового состава при преобладании минералов гидрослюд и бейделлита, реже монтмориллонита. Глины в основном относятся к легкоплавким (Ельדיгинское и др.). Месторождения тугоплавких и огнеупорных глин связаны с прибрежно-морскими отложениями и отложениями опресненных лагун. Примерами подобных месторождений в России являются Соль-Илецкое и другие, в США – крупные месторождения эоценовых глин в Калифорнии. Мощности огнеупорных и тугоплавких глин в отдельных случаях достигают первые десятки метров, линзы и пласты глин выдержаны и по простиранию прослеживаются до первых километров. Глины тонкодисперсные однородные с обильными растительными остатками имеют сложный состав с преобладанием гидрослюды, каолинита и галлуазита.

К хемогенно-осадочному морскому типу относят месторождения палыгорскитовых глин: Черкасское на Украине, Борщевское месторождение в Калужской области, миоценовые месторождения штатов Джорджия и Флорида и др. В огнеупорном и легкоплавком глинистом сырье морского осадочного генезиса как минералы-примеси присутствуют железистые и магниезиальные карбонаты, сульфиды и гидроксиды железа. Вулканогенно-осадочные морские месторождения бентонитов – источник наиболее ценного сырья, образующегося за счет гальмиролиза пеплового материала, занесенного в морской водоем воздушным путем либо возникшего в результате подводных извержений. Мощность пластов бентонитов достигает 5–10 м, протяженность по простиранию – до первых десятков километров. Минералами-примесями в бентонитовых глинах, состоящих в основном из монтмориллонита, являются карбонаты, гипс, плагиоклазы, вулканическое стекло, кварц и др. Представители бентонитовых месторождений этого типа –

Огланлинское (Туркмения), Гумбрийское (Грузия), месторождения штата Вайоминг (США) и др.

Континентальные месторождения глин достаточно широко развиты. Озерные и озерно-болотные месторождения огнеупорных, тугоплавких и легкоплавких глин имеют наибольшее практическое значение. Глины этих месторождений достаточно однородного химического и минералогического состава, содержат небольшое количество песчаных частиц и занимают площади в несколько квадратных километров при мощности до нескольких десятков метров. К ним относятся Боровичско-Любытинская группа



Рис. 19. Геологический разрез Часовоярского месторождения огнеупорных глин (по В.Ф. Дыбкову, А.Е. Карякину, В.Д. Никитину, П.М. Татаринovu): 1 – суглинок; 2 – песок; 3 – огнеупорная глина; 4 – отложения мезозоя и палеозоя

месторождений Новгородской области, Часовоярско-Дружковская группа месторождений на Украине (рис. 19) и др.

Меньшие масштабы и значение имеют склоновые, аллювиальные, моренные и озерно-ледниковые месторождения легкоплавких глин. Материал этих месторождений плохо отсортирован, для него характерно присутствие песчано-гравийной составляющей. Состав глин преимущественно гидрослюдисто-каолинит-хлоритовый.

Месторождения выветривания огнеупорных глин (элювиальный тип) связаны с корами выветривания маложелезистых бескварцевых алюмосиликатных пород, в основном метаморфических и осадочных. Качество сырья обычно низкое и невыдержанное. Минеральный состав глин преимущественно каолинит-монтмориллонит-гидрослюдистый. Глины в большинстве тугоплавкие, реже огнеупорные. Известны месторождения Тельмановской и Целиноградской групп (Казахстан), Чулымо-Енисейской впадины и др.

Месторождения аргиллизации (гидротермально-метасоматические). При аргиллизации вулканических пород образуются огнеупорные породы преимущественно каолинит-галлуазитового состава (Туманянское месторождение). Для бентонитовых глин месторождения подобного типа имеют большое значение – крупные и средние месторождения щелочных и щелочноземельных бентонитов. Бентониты образуются за счет воздействия щелочных гидротермальных растворов на субинтрузивные и вулканогенно-осадочные породы среднего и основного состава (порфириты, андезиты-

базальтовые порфиры, туфы, пеплы, лавы трахибазальтов и др.). Формы рудных тел от пластообразных до штокообразных, мощности могут достигать 130 м, при протяженности первые километры. Массовые доли монтмориллонита составляют местами до 90 %. В качестве минералов-примесей в сырье характерны цеолиты, адуляр, халцедон и др. В качестве примеров месторождений в литературе приводятся Саригюхское (Армения), Асканское (Грузия), месторождения штата Калифорния (США) и др.

Метаморфизованные месторождения глинистых пород образуются за счет диагенетических процессов (вплоть до катагенеза) преобразования глин. К разновидностям глинистого сырья такого геолого-промышленного типа относятся камнеподобные непластичные глинистые породы – аргиллиты и глинистые сланцы. Эти легкоплавкие породы состоят в основном из минералов группы гидрослюды и монтмориллонита, обычными примесями являются хлорит, серицит и кварц. Глинистые породы широко используются как добавки при производстве цемента, при получении утеплителей и др.

Контрольные вопросы и задания

1. Каковы разновидности глинистого сырья?
2. Перечислите ценные качества глинистого сырья.
3. Назовите области применения глинистого сырья.
4. Какие вредные примеси в глинистом сырье вам известны?
5. Охарактеризуйте геолого-промышленные типы месторождений глинистого сырья.
6. Приведите примеры промышленных месторождений глинистого сырья.

ПЕСКИ СТРОИТЕЛЬНЫЕ, ГРАВИЙ И ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫЕ СМЕСИ

К *пескам* как к строительному сырью, качество которого при поисках и разведке месторождений оценивается по ГОСТ 24100-80, относятся нецементированные горные породы с размерами частиц 0,05–5 мм; к *гравию* 5–7 мм; к *валунам* – более 70 мм. По модулю крупности пески разделяются на крупнозернистые (более 2,5 мм), среднезернистые (2,5–2 мм), мелкозернистые (2–1,5 мм) и очень мелкие (1,5–1 мм). В природе обычно встречаются смеси грубо- и мелкообломочных пород. Если гравия более 10 % общей массы, то смесь называется *гравийно-песчаной*, или *песчано-гравийной*, менее 10 % – *песчаной породой*. Порода, содержащая более 10 % гравия и 5 % валунов – *валунно-гравийно-песчаная*. При разработке таких отложений добытый материал разделяют на песчаную (пески-отсевы), гравийную и валунную составляющие. Гравий сортируется по фракциям: 5–10, 10–20, 20–40 и 40–70 мм. Валунны перерабатываются на щебень таких же фракций и дробленый

песок, иногда валуны используются без дробления как бутовый камень, редко как стеновой материал.

В зависимости от размера, мм, выделяют следующие неокатанные разности: песок – 0,1–1; гравий (хрящ) – 1–10; галька (щебень или щебенка) – 10–100; валуны (отлом) – 100–1 000; глыбы окатанные – 1 000–10 000; утес или очень большая глыба – более 10 000 мм.

Применение песчаных материалов в промышленности прежде всего зависит от состава песков. Наиболее ценными являются, как указывалось выше, мономинеральные кварцевые и кварц-полевошпатовые пески. Полиминеральные пески применяются обычно в качестве строительных материалов. Пески для строительных работ по видам разделяются на природные, природные обогащенные, из отсеков дробления, из отсеков дробления обогащенные. При геологразведочных работах согласно ГОСТ 24100-80 для предприятия-изготовителя песка устанавливаются следующие его характеристики:

минералого-петрографический состав, с указанием пород и минералов, относимых к вредным примесям;

показатель потенциальной реакционной способности (при наличии в песке реакционно-способных минералов в порах);

массовую долю органических примесей;

описание форм и характера поверхности зерен песка;

среднюю плотность зерен песка.

После отсева песка на сите с отверстиями 5 мм для выделения зерен гравия и щебня определяют крупность песка по модулю крупности и остатку на сите № 063. Модуль крупности $M_k = (A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,16}) / 100$ поставляемого песка обычно менее 3,5 (A – полный остаток на сите). Природные необогащенные пески по модулю крупности подразделяются на пески: повышенной крупности, крупные, средние, мелкие, очень мелкие. Очень мелкий песок с модулем крупности от 1 до 1,5 поставляют по заказу потребителя только для штукатурных растворов или с добавкой более крупных фракций в качестве заполнителей бетона в тех районах, где нет песка с модулем крупности более 1,5. Наличие зерен более 5 мм не должно превышать, мас. %: в природном песке 10; в песке из отсеков дробления 15; в обогащенном природном песке и обогащенном песке из отсеков дробления 5. Для приготовления строительных растворов (кроме штукатурных растворов для отделочного слоя) применяют средний и мелкий пески природные и обогащенные с модулем крупности не превышающем 2. Массовая доля зерен размером более 5 мм для строительных растворов не должна превышать 0,5 %.

Для отделочного слоя используется очень мелкий песок. Массовая доля песка с размерами более 1,25 мм не должна превышать 0,5 %, даже по согласованию с заказчиком – не более 7 мас. %. Изверженные и метаморфические горные породы, используемые для производства песков из

отсево́в дробления, должны иметь предел прочности при сжатии не менее 60 МПа, а осадочные породы – не менее 40 или 20 МПа (по согласованию с потребителем). Для декоративных растворов могут применяться мытые кварцевые пески и крошка дробленых пород (гранитная, мраморная, керамическая, угольная, пластмассовая). Для цветных штукатурок – указанные виды крошки размером 2–5 мм.

Для теплоизоляционных легких бетонов и строительных растворов применяются щебень и песок из пористых горных пород (пемза, шлаки, туфы, крупнопористые базальты, андезито-базальты и андезиты, пористые известняки и ракушняки, опоки, спонголиты и другие кремнеземистые породы). К природным заполнителям в этом случае относится песок с объемной насыпной плотностью не более 1 400 кг/м³. Зерновой состав песков для теплоизоляционных бетонов не нормируется.

Щебень и песок декоративные предназначаются для наружной и внутренней декоративной отделки поверхностей бетонных и железобетонных элементов зданий и сооружений и для производства декоративных плит на основе природного камня путем его дробления. Прочность песка декоративного из природного камня определяется по прочности исходной горной породы: не менее 80 МПа (марка 800) – для изверженных пород, 40 МПа (марка 400) – для метаморфических пород, 30 МПа (марка 300) – для осадочных пород. Массовая доля пылеватых частиц размером менее 0,5 мм не должна превышать для марки 800 – 3 %, для марки 400 – 4 %, для марки 300 – 5 %. Массовая доля пород прочностью менее 20 МПа, применяемых для получения песка, не должна превышать 10 мас. %, а для низкопрочных пород – 15 мас. %. Исходная горная порода по морозостойкости не должна быть ниже 25 циклов.

Песчано-гравийный и гравийный балласт – природная гравийно-песчаная смесь, используемая в качестве балластного слоя железнодорожных путей дорог общего пользования и дорог предприятий и организаций. В песчаной части балласта (фракции размером менее 5 мм) массовая доля кварцевых зерен и зерен прочных изверженных и метаморфических горных пород должна составлять не менее 50 % массы зерен размером от 0,16 до 5 мм. Массовая доля слабых пород в гравийной части балласта не должна превышать 10 % массы зерен размером более 5 мм. В оценке сырья для производства песка, гравия и щебня из гравия для строительных работ к слабым разновидностям относятся породы с пределом прочности при одноосном сжатии в насыщенном водой состоянии менее 20 МПа. Вредными примесями являются сульфиды, сульфаты, оксиды и гидроксиды железа, аморфные и скрытокристаллические минералы кремнезема, вулканическое стекло, слюды, гидрослюды, цеолиты, соли, сера, хлориты, асбест, апатит, нефелин, фосфорит, графит, уголь, горючие сланцы. Производится качественная оценка состояния поверхности: угловатая, окатанная для песка, гладкая, шероховатая для гравия. Оценивается форма зерен гравия по процентному

содержанию пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, такую форму имеют зерна, толщина или ширина которых меньше длины в три раза и более. При испытании заполнителей бетона едким натром окраска бетона не должна быть равной окраске эталона или темнее ее. Если окраска темнее, пригодность наполнителя определяется испытаниями в бетоне.

Гравий для строительных работ должен иметь среднюю объемную плотность, включая поры, свыше 2 г/см^3 . Его получают рассевом природных песчано-гравийных смесей. Гравий должен применяться как заполнитель для бетонов монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций, как гравийный балласт для железнодорожного пути и других видов строительных работ. Он должен пройти испытания на прочность по дробимости при сжатии (раздавливании) в цилиндре (не менее 40 МПа) и по истраемости в полочном барабане (массовая доля потерь не более 50 %). При этом содержание пыли в сырье не должно превышать 2 %, в том числе глины в комках не более 0,25 %. Гравий не должен содержать зерна слабых пород более 15 мас. %. К пылевидным и глинистым частицам относят частицы размером менее 0,05 мм, кроме того выделяют комки глины с крупностью частиц более 1,25 мм. Размеры гравия до 70 мм, максимальные размеры 120–150 мм.

Мировая добыча песка составляет более 8 млрд т. В том числе в США более 900 млн т.

По масштабам, млн т, месторождения строительного песка подразделяются: на крупные – более 15; средние – 10–15; мелкие – менее 10. Месторождения песчано-гравийных смесей, млн т, классифицируются: на крупные – более 30; средние – 10–30; мелкие – менее 10.

Среди генетических типов песков и песчано-гравийных смесей выделяют: элювиальные, делювиальные, пролювиальные, аллювиальные, эоловые, морские, озерные и группу ледниковых месторождений. Наиболее значительными геолого-промышленными типами месторождений песка и песчано-гравийных смесей, по мнению большинства исследователей, являются ледниковые, аллювиальные, морские и озерные месторождения.

Ледниковые месторождения связаны с отложениями морен. Типичным примером является Сычевское месторождение в Волоколамском районе Московской области. Месторождение приурочено к межморенным образованиям, занимающим площадь 27 км^2 при средней мощности 20,2 м. Состав месторождения песчано-гравийно-валунный. После промывки сырье месторождения пригодно для использования в качестве заполнителя бетона. Ледниковые месторождения песчано-гравийных смесей широко распространены на Восточно-Европейской равнине, в Белоруссии и Прибалтике. Здесь главными объектами эксплуатации являются зандровые отложения – конусы выноса внутриледниковых потоков. Такие месторождения характеризуются выдержанной мощностью полезной толщи и по масштабам относятся к средним и крупным.

Аллювиальные месторождения песка и песчано-гравийных смесей наиболее широко развиты и в наибольшей мере используются промышленностью. Среди месторождений этого типа выделяют современные и древние аллювиальные отложения. Русловые месторождения песков и песчано-гравийных смесей лишены пород вскрыши, дельтовые отложения чаще представлены песками, хорошо отсортированными и промытыми. Обладают большими площадями распространения и мощностями. Косы, отмели и острова также служат объектами отработки. Древние речные террасы отличаются наличием чехлов делювиальных отложений перекрывающих месторождений.

Морские и озерные месторождения также имеют большое практическое значение. Для них характерны большие масштабы, относительное постоянство гранулометрического и химического состава. Классическим примером морского месторождения считается Егановское в Московской области. Пески месторождения относятся к верхневолжскому ярусу верхней юры. Средняя мощность песков составляет 10,7 м. Пески перекрываются аллювиальными суглинками и ледниковыми отложениями, подстилаются глауконит-кварцевыми песками и глинами. Пески используются для производства динаса, формовочных материалов и стекла.

Контрольные вопросы и задания

1. Каковы обязательные характеристики песков и песчано-гравийных смесей при геологоразведочных работах?
2. Что такое модуль крупности песков?
3. Назовите размеры песков, гравия и валунов для строительных работ.
4. Перечислите основные характеристики качества песков и песчано-гравийных смесей для строительных работ.
5. Какие вредные примеси в песках и песчано-гравийных смесях для строительных работ вам известны?
6. Приведите примеры промышленных месторождений глинистого сырья.

МАГМАТИЧЕСКИЕ И МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Разнообразные магматические и метаморфические горные породы в настоящее время применяются в качестве естественных строительных материалов, конкретные области их промышленного использования определяются их физическими и технологическими свойствами, главными из которых являются прочность, долговечность и декоративность. По характеру использования они подразделяются на следующие основные группы:

строительные камни, облицовочные и декоративно-облицовочные камни, породы для каменного литья.

К *строительным камням* относят изверженные и метаморфические породы, используемые обычно в естественном виде после соответствующей механической обработки (дробления, распиловки и др.). Продуктами при этом являются бутовый камень, щебень, дробленый песок, пыльный стеновой материал, дорожный камень (бортовые и брусчатые камни и др.), кровельные материалы, материалы и изделия специального назначения – жаростойкие, кислото- и щелочностойкие и др. При термической обработке магматических и метаморфических пород получают легкие строительные материалы – перлитовый песок, щебень, аглопорит и др.

Облицовочные и декоративно-облицовочные камни – это штучные (обтесанные, тонкообработанные) естественные камни, предназначенные для изготовления облицовочных плит и архитектурно-строительных изделий, используемых при сооружении постаментов, памятников, художественной отделке зданий и др. Декоративно-облицовочными камнями называют природные цветные камни, из которых распиливанием получают плитки небольшого размера, используемые для отделки внутренних и внешних частей зданий, где требуется особенно высокая декоративность.

Породы для каменного литья – это в основном магматические породы (базальты, диабазы, тешениты, долериты и др.), применяемые для получения литых каменных изделий путем плавления и последующей термической обработки. Отливки из них характеризуются высокой механической прочностью, плотностью, морозостойкостью, кислотоупорностью, высокими теплоизоляционными свойствами. Улучшение свойств за счет плавки и термической обработки позволяет получать прочные кислотоупорные трубы и желоба, шары для шаровых мельниц, детали для оборудования и аппаратуры, электроизоляторы, износостойчивые лестничные ступени, минеральную вату, минеральную нить и др.

Согласно требованиям ГОСТов породы, пригодные для получения щебня для строительных работ, должны иметь плотность 2 000–2 800 кг/м³. Предел их прочности при сжатии – более 20 МПа (породы с меньшим пределом прочности относятся к слабым), морозостойкость – не менее 15 циклов. Породы не должны содержать кремнекислоту в количестве более 50 % и зерен слабых пород более 35 %. При этом массовая доля серы в пересчете на SO³ не должна превышать 0,5 %. К вредным минеральным примесям относятся аморфные разности кремнезема, серы, сульфатов и сульфидов, слоистые силикаты, оксиды и гидроксиды железа, апатиты, нефелины, галоиды, цеолиты, асбест, графит и органика (суммарное их количество не более 15 %). Камень бутовый для метаморфических пород должен иметь предел прочности при сжатии не ниже 40 МПа, изверженных пород – не ниже 60 МПа. Размер кусков бутового камня допускается в пределах 70–1 000 мм. Щебень и песок из пористых пород (пемз, туфов, шлаков, крупнопористых

базальтов, андезито-базальтов и андезитов) используется в качестве заполнителей бетонов, строительных растворов и для теплоизоляции. Насыпная объемная масса его не должна превышать 1 200 кг/м³. Обязательно проводится радиационно-гигиеническая оценка пород.

Всегда предварительно магматические и метаморфические породы изучаются как сырье для производства облицовочных плит. Тектонические нарушения и трещиноватость пород отрицательно влияют на выход блоков. Блоки из природного камня для производства облицовочных изделий должны иметь размеры, мм, по длине не менее 3 500, по ширине 200–2 000 и по высоте 200–2 000, для камней и блоков стеновых размеры, соответственно, более 195, 190 и 288. Необходимым условием является декоративность пород. Отходы производства блоков и стеновых камней используются для получения декоративного щебня и песка для наружной и внутренней отделки бетонных и железобетонных элементов зданий и сооружений, а также для производства декоративных плит.

Среди декоративно-облицовочных камней выделяют две группы. В первую группу входят камни, используемые в качестве облицовочных (гранит, сиенит, лабродорит и др.). Во вторую – камни, используемые в качестве поделочных, но пригодные по физико-механическим свойствам для отделки главным образом интерьеров зданий. Размер декоративно-облицовочных плиток небольшой, потребность в них меньше, чем в плитах облицовочного камня, и это позволяет считать пригодными для разработки те месторождения, которые не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к месторождениям облицовочного камня. Породами пригодными для внутренней и внешней облицовки считаются: гранит амазонитовый, лабродорит, кварцит цветной, хибинит. Породы пригодные главным образом для внутренней облицовки: порфиры, порфириты, пегматит графический, джеспилит.

Оценка декоративности камня является весьма сложной, особенно количественная оценка его художественно-эстетических свойств. Декоративность камня обычно рассматривается как некоторая сложная совокупность художественно-эстетических свойств его поверхности, которая может варьировать в зависимости от вида обработки. Основными объективными параметрами оценки являются цвет, текстура и фактура.

Цвет камня характеризуется цветовым фоном, насыщенностью и светлотой. *Цветовой фон* определяется доминирующей длиной волны спектрального цвета. Измерение этого показателя производится с помощью спектрофотометров или калориметров.

Насыщенность цвета – степень разбавления спектрального цвета белым. По степени насыщенности камнехроматические цвета делятся на категории:

1. Интенсивно-насыщенный цвет (насыщенность 0,8–1,0) – красные, зеленые и др.

2. Средненасыщенный цвет (насыщенность 0,4–0,8) – красно-серые, фиолетово-серые и др.

3. Слабонасыщенный цвет (насыщенность 0,1–0,4) – зеленовато-серый, бледно-розовый, бледно-голубой, серо-голубой.

4. Ненасыщенный цвет (насыщенность 0,1) – камни ахроматических цветов с еле уловимым «холодным» или «темным» тоном.

Светлота характеризуется степенью интенсивности отражения света поверхностью камня. Оценка светлоты образцов (в процентах к светлоте эталона) производится с помощью блескометров типа ВФ-2 и др. Светлота используется обычно с 7-ступенчатой шкалой (табл. 4)

Таблица 6

Ступенчатая шкала светлоты

Номер ступеней светлоты	Наименование ступеней	Светлота, %
1	Черные	3,5–5,7
2	Черно-серые	5,7–9,0
3	Темно-серые	9,0–14,0
4	Средне-серые	14,0–22,0
5	Светло-серые	22,0–35,0
6	Бело-серые	35,0–56,0
7	Белые	56,0–89,0

Диапазон первых ступеней светлоты меньше диапазона последних, т.е. изменение светлоты темных тонов увеличивается зрительным анализатором легче, чем светлых. Среди природных камней ахроматического ряда наиболее декоративными считаются черные и белые. Белый рисунок на черном фоне и черный рисунок на белом фоне повышают декоративность за счет контрастности. Легкие цветовые оттенки с очень малой насыщенностью можно определять терминами «теплые» (желтоватые, кремовые) или «холодные» (голубоватые). Такие оттенки повышают декоративность белых камней – «холодные» оттенки серых камней придают им «воздушность», однако желтые оттенки в камнях серого цвета снижают их декоративность.

Помимо трех рассмотренных параметров дополнительно учитываются другие важные признаки: цветовое предпочтение (уникальность), игра основного цвета, сочетание цветов, текстура и структура камня, его фактура (полированная, лощеная пиленая и др.), полируемость.

В качестве кровельных материалов могут использоваться кровельные сланцы, т.е. сланцы, состоящие на 40–60 % из слюдястых минералов (серицит, гидрослюды, хлорит), легко раскалывающиеся по плоскостям сланцеватости на ровные и тонкие (2–8 мм) плитки. Лучшие из них – наиболее богатые серицитом сланцы с минимальным количеством глинистого вещества, карбонатов и сульфидов.

Кислотоупорными из магматических пород являются кислые мелкокристаллические трахипариты, андезиты, фельзиты, граниты и некоторые туфы, из метаморфических пород – кварциты. Наилучшей кислотоупорностью обладают кварциты. Эти породы наиболее прочны, лишены пор и поэтому не поглощают жидкости. Их кислотоупорность составляет 99,5 %, кислотоупорность гранита – 96–98 %. Кислотоупорные породы применяются при строительстве разнообразных установок, подвергающихся химическому воздействию. Из них готовят кирпич, цельнотесанные плиты, бруски и фасонные изделия, их используют в качестве наполнителей бетонов и как составную часть цементов.

Каменное литье (петругия) использует магматические горные породы, богатые такими минералами, как основные плагиоклазы, пироксены, оливин с офитовыми и интерсертальными структурами. Вредными примесями при этом является вулканическое стекло. Избыток кремнезема и глинозема повышает вязкость расплава и снижает скорость его кристаллизации. Желательно иметь в породах массовую долю основных плагиоклазов около 50 %, оливин должен преобладать над авгитом, поскольку он снижает температуру плавления и улучшает кристаллизацию расплава. Для каменного литья обычно применяют базальты и диабазы, андезито-базальты, габбро-диабазы, амфиболиты, однако чаще в петругии используются смеси различного по составу минерального сырья для достижения оптимальных результатов.

Сырьем для получения легких строительных материалов путем термической обработки магматических пород служат водосодержащие вулканические стекла и кислые стекловатые породы (липаритовые и дацитовые). Отрицательно на вспучиваемость влияют кристаллические образования, а положительно – замкнутые поры и залеченные трещины, которые помогают получить крупнопористый вспученный материал. Перлитовое сырье применяется для получения вспученного перлита, песка и щебня перлитового вспученного. Сумма $K_2O + Na_2O$ в его составе должна быть более 3 %, массовая доля Al_2O_3 – более 12 %, SiO_2 – более 65 %. Сумма оксидов железа не должна превышать 3 %, а массовая доля CaO не должна быть более 3 %. Кроме перлитов в качестве сырья выступают обсидианы, обсидиан-перлиты, пехштейны, измененные липариты, витрофиры и др. Важнейшим показателем качества сырья является коэффициент вспучивания – отношение объема вспученной породы к ее первоначальному объему.

Магматические месторождения строительного камня широко распространены и на их долю приходится большая часть добываемого сырья. Обычно в их оценке преобладают географические и экономические факторы: необходимо, чтобы месторождения находились в развешивающихся и экономически развитых районах, чтобы породы выходили на поверхность, обеспечивая возможность открытой добычи. Желательно потреблять сырье на месте без значительных транспортных затрат и др. Месторождения

разнообразны по размерам, возрасту и составу, приурочены как к горно-складчатым геосинклинальным областям, так и к платформам и выступам древнего фундамента. По морфологии обычно это неправильные массивы или тела, покровы или потоки.

Месторождения облицовочного камня в пределах Русской платформы чаще приурочены к Балтийскому и Украинскому кристаллическим щитам. Это граниты, гранодиориты, габбро-нориты и лабродориты архейского и протерозойского возраста. На Урале облицовочные камни распространены в основном в зоне Восточно-Уральского поднятия (Сибирское месторождение и др.). Магматические породы здесь представлены гранитами и гранодиоритами архейского и раннепротерозойского возраста. В Западном Саяне известно Изербельское месторождение гранитов и гранодиоритов. На Кавказе выявлены месторождения базальтов и вулканических туфов (Арктическое в Армении и др.). Магматические месторождения для производства легких строительных материалов – это массивы неправильной формы или пластовые залежи перлитов и перлитоподобных пород в областях развития кислого риодацитового молодого вулканизма в России (Камчатка, Северо-Восток, Приморье, Забайкалье и др.).

В зарубежных странах известны месторождения Армении, Грузии, США, Греции и др. Петрургическим сырьем являются палеогеновые базальты и диабазы Приморья, мезозойские траппы района Норильска, палеозойские базальты и диабазы Урала, докембрийские габбро-диабазы Карелии. По морфологии это крупные массивы, дайки, покровы и силлы.

Месторождения метаморфических горных пород, используемых в строительных отраслях, по количеству и масштабам уступают месторождениям магматических пород. Однако факторы их оценки практически одинаковы. Обычно это месторождения разнообразных гнейсов и мигматитов, применяемых для изготовления бутового камня и щебня. В частности, метаморфические породы пригодные для изготовления щебня марок от 600 до 1 000 выявлены в Карелии, в Ленинградской и Архангельской областях вблизи железнодорожных и водных артерий. В меньшей мере это месторождения кристаллических сланцев и амфиболитов (Украинский щит). Для всех метаморфических месторождений характерны пластообразные крутопадающие и пологие залежи среди докембрийских пород выступов древнего фундамента (Украина, Карело-Кольский регион). Примером такого месторождения могут служить гнейсы Оленегорского месторождения на Балтийском щите. Сырьем для получения легких строительных материалов служат метаморфические кварц-альбит-серицитовые сланцы и сланцы-шунгзиты, образующие пластовые и линзообразные залежи в Карелии (Нигозерское, Шуньгское и др.). Для нужд петрургии пригодны мощные горизонты амфиболитов, также залегающих среди докембрийских кристаллических сланцев и гнейсов (приладожские амфиболиты).

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите основные характеристики магматических и метаморфических пород для получения щебня.
2. Назовите размеры блоков из природного камня для облицовочных работ.
3. Какова максимальная насыпная объемная масса для щебня и песка из пористых горных пород?
4. Какие основные характеристики декоративности камня вам известны?
5. Охарактеризуйте каменное сырье для петрургии.

УГОЛЬ И ГОРЮЧИЕ СЛАНЦЫ

Ископаемый уголь – твердая органическая порода осадочного происхождения, образовавшаяся в основном из отмерших растений в результате биохимических, физико-химических и физических изменений. Угли подразделяются на группы:

1. Гумусовые угли (гумолиты) образовавшиеся в основном из отмерших высших растений: целлюлозы, лигнина, протеинов, жиров и смол.
2. Сапропелевые угли (сапропелиты) образовавшаяся в основном из отмерших низших растений (водоросли) и простейших животных в анаэробных условиях. Содержание целлюлозы не выше 20%. Преобладающие вещества – протеины, жиры, воски, смолы.

Гумусовые угли подразделяются на угли бурые, каменные и антрациты. Бурый уголь – уголь низкой стадии метаморфизма с показателями отражения витринита менее 0,6%. На воздухе бурый уголь быстро теряет свободную влагу и растрескивается. При сухой перегонке без доступа воздуха выделяется много летучих веществ (33-60%). Низшая теплота сгорания (Q_{i}^{r})

колеблется от 7 до 17 МДж/кг, высшая (Q_{s}^{daf}) достигает 29. Влажность от 19 до 60%.

Каменный уголь образуется на средней стадии метаморфизма с показателем отражения витринита от 0,4 до 2,59%, высшая теплота сгорания равна и выше 24 МДж/кг. Влажность (W) равна 4,6 – 16%. Выход летучих

равен 8% и более. Свойство спекания – важнейшее свойство при оценки угля для производства кокса.

Антрацит относится к углям высокой степени метаморфизма и имеет влажность обычно до 5%. Показатель отражения витринита – более 2,59%. Антрацит имеет низкий выход летучих – от 1,5 до 9 %.

Общие геологические запасы углей составляют около 14000 млрд.т. Они распределяются в основном (в млрд.т): в РФ 4372, в США 3600, КНР-1500.

Основные слагающие углей – органические компоненты и минеральные включения. Предварительно состав углей определяется макроскопически, а затем детально изучается под микроскопом.

Невооруженным глазом различают 6 типов угля – 2 простых – вуитрен и фюзен и 4 сложных – кларен (блестящий), кларено-дюрен (полублестящий), дюрено-кларен (полуматовый) и дюрен (матовый).

Минеральные включения в углях – глинистые минералы, сульфиды железа, карбонаты, оксиды кремния и др.

Органические компоненты различаемые под микроскопом именуется микрокомпонентами (мацералами). Их вы будете изучать в дисциплине «Новые методы».

В настоящее время принята концепция о двухстадийном формировании витринита. Первая стадия диагенетическая или торфяно-буроугольная - пребывание растительных остатков во влагонасыщенной среде без доступа кислорода. Вторая стадия катагенетическая или каменноугольная и антрацитовая. Основное условие – постепенное повышение температуры.

Физические свойства угля:

1. Гранулометрический состав – верхний предел крупности 300мм (плитный класс) только уголь добытый открытым способом. Угли крупностью кусков свыше **0** к **сортовым**, с нижним пределом равным **0** к **отсевам**.
2. Угли с крупностью кусков менее 6мм называют **мелочью**

Сортовые угли (классы): Плитный 80 – 300мм - П

Крупный 40 – 100мм - К

Орех – 20 – 50мм - О

Мелкий – 10-20мм - М

Семечко – 5 – 33 мм - С

Штыб – 0 – 8 мм – Ш

Совмещенные или отсева, например **ПК** или **ОМСШ**

Механическая прочность – способность кусков сохранять размеры при ударах и истирании. Показатель – остаток массы кусков в % кусков определенной крупности при истирании в барабане.

Термическая стойкость – механическая прочность после нагрева – выход класса более 13мм после нагревания до $950 \pm 25^\circ\text{C}$ и испытания в барабане на дробимость.

Плотность угля: действительная d_f – отношение массы угля к его объему за вычетом пор и трещин и кажущаяся – с включением объема пор и трещин.

Элементный анализ

Определение содержаний в органической массе C, O₂, S.
Расчитывают: общие C_t, H_t, O_t в органической массе C_o, H_o, O_o; в минеральной массе C_м, H_м, O_м.

Технический анализ

Определение основных показателей качества угля для всех видов его использования.

Влажность – в высушенных на воздухе каменных углях и антрацитах или отжатых под прессом из бурых – влагосодержание угля свойственном его химической природе – максимальную влагоемкость - W_{\max}

Суммарная величина внешней влаги и влаги воздушно-сухого топлива составляют **общую влагу - W_t** , **общая влага в расчете на рабочее состояние угля - W_t^r** – один из основных показателей качества - в бурых углях до 40%, в антрацитах 4-6%.

Зольность – отношение (в %) массы золы к единице массы пробы угля. В практике используется в основном величина зольности рассчитанная на сухое - A^d реже на рабочее A^r состояние угля. Уголь сжигается при $T=815 \pm 15^\circ\text{C}$.

Сернистость – массовая доля общей серы S_t^d колеблется 0,1- 11%. По этой величине угли разделяются на низкосернистые – до 1,5%, среднесернистые 1,5- 2.5%, сернистые – 2.5- 4%, высокосернистые более 4%.

Содержание фосфора - P^d обычно не превышает 0.05%.

Выход летучих – при нагревании удаляются газы и пары, их масса в отношении (в %) к единице массы пробы при температуре $850 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 7 мин.- V . Выход летучих в пересчете на сухое беззольное состояние V^{daf} – один из основных показателей качества угля.

Теплота сгорания – количество тепла, выделяемое единицей массы угля при полном сгорании в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода в установленных стандартных условиях. Высшая теплота сгорания пересчитанная на сухое беззольное состояния Q_s^{daf} . Низшая теплота сгорания - Q_i^r выражает количество тепла, которое может быть практически реализовано при сжигании.

Спекаемость – свойство переходить при нагревании без доступа воздуха в пластическое состояние с образованием связанного нелетучего остатка. При нагревании более 300°C часть паро-газовых продуктов удаляется, остальные образуют с твердыми продуктами пластическую или

вязкотекучую массу. При температуре 500 – 550°С эта масса затвердевает, образуя спекшийся твердый остаток – **полукокс**. При 1000°С полукокс переходит в **кокс**

- уменьшается количество летучих веществ. Бурые угли и антрациты спекаемостью не обладают.

Коксуемость – свойство измельченного угля спекаться с образованием кокса с установленной крупностью и прочностью кусков.

Состав и выход летучих продуктов термического разложения – при температуре 350°С выделяются вода и CO_2 . Суммарный их выход - окисленность и химзрелость углей. При 550°С без доступа воздуха (полукоксование) образуются : смола (первичный деготь) - T_{sk} , пирогенетическая (подсмольная) вода W_{sk} - получение аммиака, цианистых соединений, уксусной кислоты и др., газ полукоксования - G_{sk} – смесь различных неконденсируемых газов (CH_4 , H_2 , CO , CO_2), полукокс **сК** – бездымное топливо или добавука в коксовую шихту, коксование – летучие представлены сырым бензолом, каменноугольной смолой, аммиаком, газами.

Технологические параметры

Всего выделяется 17 марок углей. Для бурых углей и антрацитов соответственно **Б** и **А**, для каменных – 15 марок: длиннопламенные – **Д**, длиннопламенные газовые – **ДГ**, газовые – **Г**, газовые жирные отощенные – **ГЖО**, газовые жирные – **ГЖ**, жирные – **Ж**, коксовые жирные – **КЖ**, коксовые – **К**, коксовые отощенные – **КО**, коксовые слабоспекающиеся низкометаморфизованные – **КСН**, коксовые слабоспекающиеся – **КС**, отощенные слабоспекающиеся – **ОС**, тощие спекающиеся – **ТС**, слабоспекающиеся - **СС** и тощие – **Т**.

Угли используются в основном в энергетике и для получения кокса, в меньшей мере – для газификации и полукоксования, для бытовых нужд, кирпичном производстве, обжиге извести и др.

Для энергетических **целей** угли используют железнодорожный, морской, речной транспорт и стационарные котельные установки со слоевым и камерным способами сжигания.

Непосредственное сжигание углей в топках для получения энергии до сих пор является основным способом их использования. Для этой цели могут быть пригодны угли всех типов и марок, если содержание в них золы не слишком высокое. С целью снижения зольности низкосортных углей последние предварительно обогащаются.) Процесс обогащения заключается в отделении и удалении от угля породных прослоек, а также минеральных включений, дающих так называемую внешнюю золу.

Тонкорассеянные минеральные примеси, образующие внутреннюю золу, почти не поддаются удалению, и такие угли считаются; труднообогатимыми. В настоящее время часть высокзолных углей сжигается в виде пыли с вдуванием в топку котлов через форсунки. Такой

вид сжигания обеспечивает более полное сгорание угля при меньшем его расходе в сравнении с кусковым углем. Сжигание низкосортного угля в топках производится также в форме брикетов, т. е. плиток, прессованных из нестойких, быстро рассыпающихся углей (в основном бурых) и угольной мелочи с добавлением в нее в отдельных случаях битумов как связующих веществ.

Для коксования применяются обычно смеси различных марок| составляемые с учетом выхода летучих веществ и спекаемости. При соответствующем подборе способов и режима коксования для получения кокса можно использовать каменные угли всех марок и некоторые виды бурых углей. Помимо необходимой спекаемости углей или смеси различных марок углей, идущих на коксование, установлены также пределы содержания в них золы, серы и фосфора. При использовании углей для коксования максимально снижают содержание в них минеральных включений и в особенности сернистых так как использование в металлургической промышленности кокс с высоким содержанием минеральных и сернистых веществ не эффективно.

Полукоксованием получают смолу, пригодную для переработку на жидкое топливо и химические продукты, а также полукокс с высокой реакционной способностью для производства технологического газа или использования в качестве бездымного топлива. Для полукоксования применяют угли с выходом смолы не более 10% (в пересчете на рабочее топливо и с удовлетворительным содержанием в смоле легких фракций). При незначительном количестве легких (бензиновых и керосиновых) фракций требуется дополнительная глубокая переработка смолы, усложняющая технологический процесс и удорожающая производство.

В существующих печах для полукоксования используют угли со слабой спекаемостью.

При получении полукокса предъявляют требования по выходу смолы; остальные отмеченные показатели также имеют значение для этой категории углей.

Для газификации в существующих газогенераторах используют каменные угли марок Д, Г, ГЖ, ОС, СС, Т, а также полуантрациты (ПА), антрациты (А) и бурые угли марок Бг и Бз. Основным технологическим показателем для этой группы топлив — неспекаемость или слабая спекаемость.

Для производства паровоздушного и парокислородного газов в плотном слое применяют каменные угли с пластическим слоем не более 11 мм — обычно грохоченные с размером кусков от 6 до 100 мм. В потребительских стандартах указываются нормы содержания мелочи (размер кусков — до 6 мм), термическая стойкость, температура плавления золы в полувосстановительной среде и зольность.

Для газификации применяются тощие и бурые угли всех марок, но для бурых углей кроме указанных показателей в потребительских стандартах нормируется содержание рабочей влаги (не более 40%). Угли, идущие для газификации, не должны давать в процессе газообразования больших количеств смол, так как в противном случае потребуется специальная очистка газа от смолистых примесей.

Для гидрогенизации пригодны угли с содержанием углерода от 68 до 85% и водорода не менее 4,5% в пересчете на абсолютно сухое и беззольное топливо. При других значениях содержания в углях углерода и водорода промышленное гидрирование становится малоэффективным, так как угли с содержанием углерода менее 68% потребуют большого непроизводительного расхода водорода на связывание кислорода углей, а гидрирование углей с содержанием в них углерода более 85% при обычных условиях приведет к снижению выхода жидких продуктов.

Для гидрирования имеют значение зольность применяемых углей (не более 6%) и содержание фюзена в них (также не более 5—6%) - Увеличение содержания золы и фюзена в углях более 6%, хотя и не изменит химизма самого процесса, но снизит производительность дорогостоящей аппаратуры высокого давления и увеличит возможность ее коррозии.

Экстракция (получение горного воска) производится из битумов бурых углей. Основными показателями при оценке углей, идущих для этой цели, являются не только общий выход битума, но главным образом процентное содержание воска и качественная его характеристика.

Промышленные типы месторождений

По масштабам (млрд. т) месторождения угля подразделяются на сверхкрупные – больше 1000, очень крупные 100 – 1000, крупные 50 – 100, мелкие 1 – 50.

Все угольные месторождения принадлежат к осадочному генетическому типу. По геотектоническому типу каменноугольные бассейны относятся к орогенным и отчасти к платформенным. Все буроголовые бассейны относятся к платформенным и имеют простое строение (Подмосковный и Канско-Ачинский).

По типам формационной принадлежности бассейны делятся на геосинклинальные (Донецкий), эпигеосинклинальный краевых и внутренних прогибов (Кузнецкий), краевых прогибов платформ (Экибастузский), тектонических впадин центральных частей платформ и консолидированных массивов (Тунгусский).

Академик П. И. Степанов доказал, что максимумы угленакопления соответствуют орогеническим эпохам с наиболее интенсивными фазами складчатости, а минимумы — периодам трансгрессии и ослабленным явлениям складчатости.

Движениями земной поверхности, т. е. непрерывными сменами поднятий и опусканий, и объясняется по существу смена физико-географических режимов на данном участке земной коры. В геологических разрезах это выражается сменой континентальных и морских осадков. В качестве примера можно привести хорошо изученный разрез угленосной толщи Донецкого каменноугольного бассейна, где в отложениях среднего и верхнего карбона обнаружены сотни пластов и пропластков угля. Эти угли (главным образом автохтонного происхождения) свидетельствуют о том, что этот район представлял собой обширные торфяные болота, т. е. образования суши или морского побережья. Кроме того, с пластами угля чередуются многочисленные пласты известняков с морской фауной, т. е. морские осадочные образования. Все это служит доказательством того, что за время накопления угленосной толщи данный участок земной поверхности то становился сушей, то погружался (и довольно значительно) в море.

Угольный бассейн — это обширная площадь (сотни и тысячи квадратных километров) сплошного или прерывистого развития угленосных отложений с подчиненными им пластами угля, образовавшимися в результате единого геолого-исторического процесса.

Под угольным месторождением подразумевается часть бассейна (например, Кемеровское или Прокопьевское месторождение Кузнецкого бассейна; Чурубай-Нуринское месторождение Карагандинского бассейна) или небольшая по площади (десятки, реже сотни квадратных километров) и запасам угля часть земной поверхности, хотя бы и обособленная. Так говорят, например, о месторождениях угля восточного склона Урала. Иногда вместо термина «месторождение» употребляют термин «угленосный район». Это совокупность угольных месторождений, как правило, разобщенных в результате тектонических или эрозионных процессов.

А.К. Матвеев выделяет угленосные провинции, под которыми понимает обширные сплошные или прерывистые площади, попадающие в одну и ту же возрастную фазу благодаря основным сходствам физико-географических условий при образовании углей и вмещающих их толщ, а также сходствам стратиграфических соотношений и закономерно направленного изменения мощности и условий залегания.

При определении размеров и границ угленосных бассейнов наблюдаются три случая:

1) вся площадь, занятая угленосными отложениями, обнажается на дневную поверхность, причем угленосные отложения могут быть закрыты наносами. Такие бассейны называются открытыми (например, Кузнецкий бассейн). Видимые границы и площадь бассейна будут в таком случае его действительными границами и площадью;

2) на дневную поверхность выходит только часть угленосных

отложений, другая же часть скрыта отложениями иного возраста, маскирующими действительные границы и площадь угленосных отложений. Эти бассейны называют полуоткрытыми или полузакрытыми (например, Донецкий и Карагандинский бассейны);

угленосные отложения сплошь закрыты более молодыми отложениями; в этом случае и границы и площадь бассейна могут быть установлены горнобуровыми разведочными работами. Такие бассейны называют закрытыми (например, Челябинский бассейн)

Красноярский край занимает первое место по запасам угля в России.

Канско-Ачинский бассейн – большая часть в Красноярском крае, меньшая в Иркутской и Кемеровской областях. Общая площадь бассейна 50 тыс. км². Енисейским кряжем и отрогами Восточного Саяна территория бассейна разделена на две части: Чулымо-Енисейскую и Канскую. В Чулымо-Енисейской части юрские угленосные отложения выполняют крупные разбittenные предгорные и межгорные впадины в палеозойских породах. Канская часть бассейна приурочена к обособленным крупным прогибам, осложнившим юго-западную окраину Сибирской платформы. В верхних горизонтах итатской свиты в крупных отрицательных структурах – Итатской, Барандатской, Урюпской, Березовской и в верхах бородинской свиты в Бородинской мульде залегает уникальный по мощности (25 – 60 м) пласт Мощный (Итатский, Березовский, Бородинский). Выше и ниже этого пласта залегают менее мощные пласты – Профильный – 3 м, Рыбинский – 7 м и др. В Назаровской мульде содержится до 10 рабочих пластов, из них верхний 1 пласт имеет среднюю мощность 13 м. В Абанской мульде два пласта: Верхний – мощность 23 м и Нижний – 7-10 м. Угли в основном бурые, малозольные и малосернистые с высокой влажностью и плохой брикетированностью. В настоящее время угли разрабатываются на многих месторождениях.

Тунгусский бассейн площадью около 1 млн. км² слабо исследован. Добыча ведется в Норильском районе на севере и Канско-Тасеевском районе на юге. Угли в основном кларено-дюреновые низко- и средnezольные, малосернистые.

Крупный Таймырский бассейн имеет протяженность до 1000 км при ширине 50 – 150 км. В нем выделяется крупное Сарыдосайское месторождение коксующихся углей и ряд других.

ГОРЮЧИЕ СЛАНЦЫ

Горючий сланец – осадочная органо-минеральная порода, содержащая в концентрированной форме (20-70%) преимущественно сапропелевое вещество. Суммарное органическое вещество горючего сланца именуется керогеном. Горючие сланцы являются преимущественно морскими и озерно-лагунными фитопланктонитами сформировавшимися в неглубоких водоемах в аридном климате.

К горючим сланцам не следует относить битуминозные породы, а также углистые сланцы, органическая часть которых представлена остатками высших растений. Наиболее значительные бассейны находятся в США, Бразилии, Эстонии, России. Мировые запасы в пересчете на сланцевую смолу составляют 550 млрд.т. Больше половины ресурсов сланцевой смолы находятся в осадках кайнозоя.

Существуют три основных направления использования горючих сланцев: полукоксование для получения жидкого топлива и химического сырья, газификация для производства энергетического газа и прямое сжигание для выработки электроэнергии. Горючие сланцы служат источником получения более 60 наименований химических продуктов: бензол, толуол, ихтиол, и др.

В составе горючих сланцев, кроме органики содержатся кварц, слюды, полевые шпаты, оксиды. Многообразие их природных типов представлено более чем десятью петрографическими типами с разновидностями.

Генетические обстановки образования горючих сланцев группы: платформенная, орогенная, геосинклинальная; классы древних платформ, молодых платформ, орогенные, прогибов и срединных массивов. Мощность сланценосных отложений достигает 1700м (шельф), мощность рабочих пластов до 30м.

В России горючие сланцы практически не используются.

НЕФТЬ

Нефть – жидкость, обычно коричневого или черного цвета с зеленоватым отливом и консистенцией от жидкой маслянистой до густой смолообразной, легче воды, со специфическим запахом.

Нефть состоит из органических соединений, основную часть которых составляют углеводороды. В составе нефти участвуют главным образом биогенные элементы – С, Н, О, S, N.

Основное применение нефти энергетическое. В России известно около 2 тыс. месторождений нефти. Стратиграфически установлена нефтеносность в отложениях от рифея до неогена.

Основными продуктами выпускаемого нефтеперерабатывающими заводами относятся (%): бензин 10-20, дизельное топливо 15-30, котельное топливо 22-45, битум до 5, масло -10. В нефти и ее производных присутствуют три основные группы углеводородов: парафиновые, нафтеновые и ароматические.

Толщи горных пород, содержащие нефть, представлены в основном морскими осадочными образованиями, угленосными фациями и пестроцветными отложениями.

По литологическому составу среди них наиболее распространены известняки и доломиты, глины (сланцы) с прослоями и линзами песчаников и песков.

Нефтеносные породы делят на коллекторы и покрышки с переходами между ними.

В теории и практике выделяют три основных понятия, связанные с промышленным типом месторождений: ловушка, залежь, месторождение.

По величине извлекаемых запасов нефти (млн.т) залежи подразделяют на : уникальные – более 300, крупные – 30 – 300; средние 10 – 30; мелкие – до 10.

В зависимости от фазового состояния и состава основных углеводородных соединений залежи нефти и газа подразделяются на: нефтяные, нефтегазовые, газовые, газоконденсатные (в газе содержится конденсат), нефтегазоконденсатные.

По количеству смол (%) нефти подразделяются на малосмолистые (менее 5), смолистые (5 – 15) и высокосмолистые (выше 15).

По содержанию серы (%) нефти подразделяются на малосернистые (до 0.5), сернистые (0,51 – 2) и высокосернистые (выше 2). При содержании более 0,5 % сера в нефти имеет промышленное значение.

И. М. Губкин отмечал, что разгадка происхождения нефти имеет не только научно-технический интерес, но и первостепенное практическое значение, так как она позволяет получить надежные указания, в каких местах искать нефть и как наиболее целесообразно организовать ее разведку.

Происхождение нефти — одна из наиболее сложных и до сих пор до конца не решенных проблем естествознания.

В основу существующих гипотез положены представления об органическом и неорганическом происхождении нефти и газа. Основываясь на представлениях об органическом происхождении нефти и газа, советские геологи открыли важнейшие нефтегазоносные провинции и зоны нефтегазонакопления в различных районах нашей страны.

Впервые соображения об органическом происхождении нефти были высказаны М. В. Ломоносовым в 1759 г., а идея возможности неорганического пути ее происхождения была выдвинута более полутора веков назад А. Гумбольдтом.

Среди гипотез неорганического происхождения нефти широкую известность в нашей стране получила гипотеза Д. И. Менделеева, который считал, что вода, проникая по разломам в глубинные недра Земли, вступает во взаимодействие с карбидами металлов. Образовавшиеся таким образом углеводородные пары по тем же разломам поднимаются к верхним

частям земной коры, где они концентрируются, образуя скопления нефти. Вместе с тем лабораторными исследованиями он доказал возможность образования углеводородов при взаимодействии воды с карбидами металлов.

В 1889 г. свою космическую гипотезу в Московском обществе испытателей природы изложил В. Д. Соколов.

Эти гипотезы не получили широкого распространения и в начале XX в. практически были опровергнуты выдающимися работами Н. И. Андрусова, А. Д. Архангельского и И. М. Губкина. Однако, начиная с 50-х гг., идея неорганического происхождения нефти вновь была выдвинута советскими исследователями Н. А. Кудрявцевым, Б. Н. Кропоткиным, В. Б. Порфирьевым и др., а также зарубежными учеными К. Мак-Дерматом, Ф. Хой-лем и др. Однако и эти гипотезы были опровергнуты логикой открытий залежей нефти и газа в осадочных породах.

Факты повсеместной приуроченности скоплений нефти и газа к осадочным образованиям и сходства элементов химического состава нефтей и живого вещества служат убедительным доказательством правильности гипотезы органического происхождения нефти и газа. Благодаря работам Г. Потонье (1905 г.), И. М. Губкина (1932 г.) и П. Траска (1939 г.) широкое признание получило представление о животнo-растительном характере исходного для нефти органического вещества. В работах Н. И. Андрусова и Г. П. Михайловского, опубликованных в начале XX в., и позже в работах В. В. Вебера (1955 г.) и Н. М. Страхова (1954 г.) была изложена теория нефтематеринских свит и показаны возможные пути образования нефти из рассеянного в них органического вещества.

Большая роль в развитии органической гипотезы принадлежит И. М. Губкину, который раскрыл региональный характер нефтега-зоообразования и указал на длительность этих процессов, протекавших в течение всего периода развития земной коры.

Процессам превращения исходного органического вещества в углеводороды посвящены работы многих советских ученых. Особое внимание в них уделяется изучению факторов, способствующих превращению органического вещества в нефть: деятельности микроорганизмов, температуре, давлению, химическим процессам и т. п.

Принципиальная схема процессов преобразования органического вещества в нефть и газ согласно современным представлениям сводится к следующему.

Процесс образования осадков сопровождается отложением органического вещества, которое может быть как в рассеянном состоянии, так и сконцентрированным в какой-либо толще. Отложение исходного органического вещества возможно не только в глинистых осадках, как предполагали ранее, но и в песчаных, алевролитовых и карбонатных породах, причем наиболее благоприятные условия для его накопления создаются в прибрежных частях морских бассейнов, в лагунах, заливах, озерах и болотах.

Процесс преобразования органического вещества в нефть и газ происходит в условиях восстановительной среды.

Восстановительная среда создается в бассейнах, где накапливаются осадки, содержащие органическое вещество, при условии длительного и устойчивого их погружения, благодаря чему достигается полная изоляция осадков от земной поверхности (от кислорода воздуха) непроницаемыми толщами вышележащих пород. Кроме того, длительное погружение и мощные толщи осадков способствуют увеличению давления и температуры, что является одним из неперенных условий для превращения органического вещества в нефть и газ.

Изложенная схема дает представление об условиях, которые могут способствовать преобразованию органического вещества в углеводороды. Многие физико-химические факторы, обуславливающие этот процесс, еще неизвестны. Однако фактические данные о закономерностях распределения выявленных залежей нефти в земной коре свидетельствуют в пользу органического происхождения нефти. Так, 99,9 % известных месторождений нефти и газа связано с осадочными породами, а внутри них — с региональными нефтегазоносными комплексами, характеризующимися определенным набором фаций. В то же время в областях распространения крупных щитов (Балтийского, Африканского, Аравийского), соприкасающихся с продуктивными комплексами, признаки нефтегазонакопленений отсутствуют. Следует указать также, что химические составы нефтей и других каустобиолитов подобны и что в осадочных породах обнаружено огромное количество органического вещества, причем наличие в составе нефтей углерода, водорода, азота, серы и других элементов указывает на происхождение нефти из растительно-животных остатков. К этому следует добавить сходство изотопных составов нефтей и веществ органического мира и т.п.

Условия залегания нефти и природного газа в земной коре связаны с понятием о породах-коллекторах. Коллекторами называются горные породы, которые могут служить вмещителем нефти, газа и воды и в то же время обладать достаточной проницаемостью, чтобы отдавать их в скважины при создании перепада давления. В основу этого определения положены емкостные и фильтрационные свойства, которые присущи некоторым осадочным, изверженным и метаморфическим породам. Выше отмечалось, что подавляющая часть выявленных мировых запасов нефти приурочены к осадочным породам-коллекторам. По составу скелета породы-коллекторы в осадочных отложениях могут быть (по В. Н. Дахнову) кварцевыми (песчаниковыми), кварц-полевошпатовыми (песчано-глинистыми), карбонатными и эвапоритовыми (гипс-ангидритовыми).

Кварцевые коллекторы характеризуются хорошей отсортированностью и окатанностью зерен. Последнее способствует их слабому уплотнению и минимальной анизотропии. Цемент в этих коллекторах

образуется за счет вторичных кристаллов кварца. В поровом пространстве выпадают халцедон, опал, кальцит и доломит. Кроме того, цемент образуется за счет разрушения самих зерен породы. Кварцевые коллекторы отличаются хорошим вытеснением нефти и газа и относительной выдержанностью по площади.

Кварц-полевошпатовые коллекторы (полимиктовые) сложены зернами минералов и продуктами разрушения горных пород. Они содержат кварц, обломки полевых шпатов, слюды, пироксена, известняков, доломитов и других пород; характеризуются плохой окатанностью, способностью сильно уплотняться при диагенезе и высокой анизотропностью. Цементация полимиктовых коллекторов происходит за счет метаморфизма глинистых минералов, образования иллита и хлорита, обволакивающих зерна породы.

Некоторые карбонатные коллекторы также могут быть сложены обломками пород.

Во всех перечисленных выше группах кластических коллекторов пустотное пространство формируется одновременно с процессами осадкообразования за счет межзерновых пор. Следовательно, поры коллекторов в обломочных породах первичные. Они хорошо сообщаются между собой, что делает проницаемой твердую фазу (матрицу) породы. Размеры таких пор иногда существенно уменьшаются вследствие цементации пород при их диагенезе. Конфигурация межзерновых пор кластических пород-коллекторов также различная. Она может быть ромбоидальной при рыхлой укладке хорошо окатанных зерен, тетраэдрической при плотной укладке угловатых зерен.

Пористость количественно оценивает емкостные свойства пород-коллекторов. В общем виде это отношение объема пустот (пор) в образце к его объему, выраженное в процентах. Это же отношение в долях единицы называется коэффициентом пористости.

В соответствии с поровым пространством пористость может быть первичной и вторичной и, следовательно, межзерновой, межзерново-трещинной, трещинно-каверновой, каверновой и др.

Проницаемость пород — это способность породы пропускать через систему сообщающихся пор жидкости и газы или их смеси при наличии перепада давления. Она количественно характеризует фильтрационные свойства коллектора.

Отсутствие сообщаемости между порами делает породу непроницаемой. Некоторые породы могут обладать высокой общей пористостью и не быть коллекторами (например, некоторые глины, мел). Одни и те же породы с первичной или межзерновой пористостью для различных флюидов бывают проницаемы по-разному. Породы, непроницаемые для нефти и воды, могут быть проницаемы для газа вследствие его большой проникающей

способности; породы, непроницаемые для высоковязких нефтей, проницаемы для маловязких. В рассматриваемых породах фильтрация флюидов происходит по порам матрицы, соединяющимся между собой.

Опытными данными установлено, что нефть может двигаться по порам, размер которых больше 1 мкм, а газ может перемещаться по порам значительно меньшего размера.

Нефте- и газонасыщенность коллекторов количественно характеризуют долю объема пор, заполненных соответственно нефтью и газом. Выраженные в долях единицы они называются коэффициентами соответственно нефте- и газонасыщенности.

Покрышками называют плохо проницаемые горные породы, перекрывающие и экранирующие скопления нефти и газа. К таким породам относят глины, аргиллиты, глинистые алевролиты, известняки, соли, гипсы, ангидриты. Наличие покрышек — важнейшее условие сохранности скоплений нефти и газа.

Основные качества, характеризующие надежность покрышки,— ее литологический состав, степень однородности, мощность и характер распространения. Надежность покрышки определяется также характером флюида, образующего залежь, и ее высотой.

По литологическому составу наибольшей надежностью отличаются соленосные толщи. Особенности их формирования обусловили региональный характер их распространения и большую мощность.

Наиболее распространены глинистые покрышки. При этом монтмориллонитовые глины обладают лучшими экранирующими свойствами. Чем однороднее состав глин, тем они менее проницаемы. Присутствие в глинах прослоев песчаника и алевролита увели-

чивает их проницаемость. На снижение экранирующих свойств глин оказывает влияние увеличение их плотности, так как более плотные глины легче растрескиваются.

Экранирующие свойства покрышек зависят от мощности. Для газа, обладающего несравненно большей подвижностью, чем нефть, при прочих равных условиях покрышка должна иметь большую мощность. Особенно это касается газовых залежей с большим этажом газонасыщенности и вследствие этого с аномально высокими давлениями.

Исходя из размеров различают покрышки региональные, зональные и локальные. Региональные покрышки развиты в пределах нефтегазоносных областей и провинций. Они имеют большую мощность и литологически выдержаны. Зональные покрышки распространены в пределах зоны нефтегазонакопления, локальные — в пределах одного или нескольких месторождений.

Природным резервуаром (по И. О. Броду) называется естественное вместилище для нефти, газа и воды, внутри которого они могут

циркулировать и форма которого обусловлена соотношением коллектора с вмещающими его (коллектор) плохо проницаемыми породами. И. О. Брод выделяет три основных типа природных резервуаров: пластовые, массивные и литологически ограниченные со всех сторон.

Пластовый резервуар представляет собой коллектор, имеющий широкое площадное распространение и ограниченный в кровле и подошве плохо проницаемыми породами.

Возможны различные варианты пластовых резервуаров. Они могут быть представлены хорошо выдержанными по площади и мощности однородными коллекторами (рис. 37, а). Нередки случаи, когда пласт-коллектор, регионально выдержанный на больших площадях, выклинивается к сводам отдельных брахианти-клинальных складок (рис. 37, б). Пласт-коллектор может быть представлен и несколькими прослоями, сообщающимися между собой и подверженными резким литолого-фациальным замещениям (рис. 37, в).

Массивный резервуар представляет собой мощную толщу проницаемых пород, образующих единую гидродинамическую систему, перекрытую непроницаемой крышкой (рис. 38). Породы, слагающие массивный резервуар, могут быть образованы осадочными, биогенными и эрозийными процессами. Если массивные резервуары сложены породами одной литологической группы, например известняками, то такие резервуары называются однородными. Неоднородные массивные резервуары могут быть сложены различными породами (известняками, песчаниками и др.), гидродинамически связанными между собой.

К резервуарам, литологически ограниченными со всех сторон, относятся природные резервуары, в которых участки проницаемых пород окружены со всех сторон практически непроницаемыми породами.

Ловушками нефти и газа называются природные резервуары или их части, в которых благодаря различного рода структурным дислокациям, стратиграфическому и литологическому экранированию и литологическому ограничению создаются условия для скопления нефти и газа.

Ловушки, связанные с различного рода структурными дислокациями, называют структурными. Стратиграфически экранированные и литологически ограниченные ловушки относят к неантиклинальным ловушкам.

Наиболее распространены структурные ловушки, связанные с различного рода складками, структурами уплотнения, облекания, с диапирами. В этом случае ловушки приурочены к сводам складок и поднятий. Складки могут быть самыми различными— от пологих куполов до сильно вытянутых брахиантиклиналей с симметричными крыльями. Размеры сводовых ловушек изменяются в широких пределах: от единиц до нескольких тысяч квадратных километров.

Тектонические нарушения типа сбросов, взбросов и надвигов обуславливают образование тектонически экранированных ловушек, в которых пластовый резервуар экранируется поверхностью нарушения.

Образование неантиклинальных ловушек может быть связано с процессами осадконакопления и денудации, причем в процессе формирования ряда седиментационных и денудационных ловушек вполне определенную роль играют тектонические процессы.

Седиментационные ловушки могут быть нескольких типов: в береговых валах, дельтовые и баровые; русловые; рифовые. Кроме того, седиментационные ловушки могут быть связаны с линзами песчаника среди непроницаемых пород. Наряду с указанными к седиментационным относят также ловушки, связанные с зонами выклинивания пластовых резервуаров. В тектоническом плане эти зоны приурочены к моноклиналям, периклинальным окончаниям складок, а также к прогибам между выступами. Роль тектонического фактора в формировании этих ловушек очевидна.

Денудационные ловушки без влияния тектонического фактора могут формироваться в результате перекрытия непроницаемыми породами эрозионных останцев. Однако среди денудационных ловушек широко распространены денудационно-структурные, называемые стратиграфически экранированными. В этих ловушках экранами служат поверхности древних страти-

графических несогласий. Они образуются при срезании размывом отложений в пределах сводов поднятий с последующим несогласным перекрытием пластовых резервуаров.

Залежью нефти и газа называется скопление этих флюидов в коллекторах ловушек, перекрытых крышками. Совокупность залежей нефти и газа в разных горизонтах разрезах на одной и той же площади называется месторождением. Месторождение из одной залежи Г. А. Габриэлянц называет однозалежным, а из нескольких залежей — многозалежным.

Газ, нефть и вода распределяются внутри ловушки под воздействием гравитационного фактора в зависимости от величины их плотности. Обычно газ и нефть занимают верхнюю часть ловушки, а вода подпирает их снизу, заполняя всю остальную часть резервуара. Газ, как более легкий, располагается над нефтью. Если газа меньше, чем нефти, то скопление его в самой верхней части ловушки называется газовой шапкой. В тех случаях, когда нефти в ловушке значительно меньше, чем газа, и она как бы подстилает газ, то такое скопление нефти называют нефтяной оторочкой газовой залежи.

Рассмотрим распределение газа, нефти и воды в ловушке на примере пластовой сводовой залежи.

Граница между нефтью и водой называется водонефтяным контактом (ВНК), между газом и водой в газовых залежах — газовойдным контактом (ГВЮ и между газом и нефтью при наличии газовых шапок или нефтяных оторочек — газонефтяным контактом (ГНК). В пластовых сводовых залежах площадь контакта или газа с водой имеет вид кольца, ширина которого зависит от мощности нефтяного пласта и углов его падения.

В различных классификациях залежей учитываются типы природных резервуаров и ловушек, распределение нефти, газа и воды в залежах и другие факторы.

Обычно выделяют три основные группы залежей:

- 1) пластовые, среди которых различают пластовые сводовые и пластовые экранированные;
- 2) массивные;
- 3) литологически ограниченные со всех сторон.

Доказательством миграции нефти и газа служат многочисленные нефтегазопроявления в разрезе отложений, в трещинах пород, выходы нефти на земную поверхность и т. п.

Различают первичную и вторичную миграции. Первичной миграцией называют перемещение флюидов из нефтепроизводящих толщ в породу-коллектор. Перемещение нефти и газа по коллектору и из одного пласта в другой по различного рода каналам называется вторичной миграцией. Аккумуляция нефти и газа в ловушках и образование залежей связано преимущественно с вторичной миграцией.

Среди геологических факторов, обуславливающих развитие в земной коре процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления, ведущая роль принадлежит тектонике и палеотектонике, палеогеографическим и фациальным обстановкам накопления осадков, термодинамическим условиям развития территории, физическим свойствам горных пород, гидрогеологии и палео-гидрогеологии.

В связи с этим при выделении и классификации крупных нефтегазоносных территорий необходимо учитывать весь комплекс геологических факторов, обратив особое внимание на историю тектонического развития исследуемой территории.

В настоящее время при классификации крупных нефтегазоносных территорий выделяют в качестве основных их подразделений нефтегазоносные провинции, нефтегазоносные области и нефтегазоносные районы.

Нефтегазоносная провинция — это значительная по размерам и осадочному выполнению обособленная территория, приуроченная к крупнейшему или крупному тектоническому элементу (плите, синеклизе, антеклизе, авлакогену, краевому прогибу и т. п.) или к их группе, обладающая сходными чертами геологического строения и развития, единым характерным

стратиграфическим диапазоном нефтегазоносности, определенными геохимическими, литолого-фациальными и гидрогеологическими условиями, а также большими возможностями генерации и аккумуляции углеводородов. Нефтегазоносная провинция, как правило, ограничивается бесперспективными землями, а в ряде случаев отделяется от соседней провинции крупными разломами или зоной резкой смены возраста осадочного чехла.

Для аналогичных территорий, в пределах которых месторождения нефти и газа еще не открыты, но перспективы их обнаружения довольно значительны (прогнозная оценка достаточно велика), следует использовать термин «перспективная нефтегазоносная провинция».

Нефтегазоносная область может быть частью нефтегазоносной провинции или выделяться самостоятельно. Как правило, она приурочена к крупным тектоническим элементам (краевому прогибу, своду, ступени, мегавалу, впадине, зоне поднятий или прогибов и т. п.), обладающим сходными геотектоническим строением и историей развития, региональным распространением основных нефтегазоносных комплексов, получившим прогнозную оценку и имеющим разведанные запасы нефти и газа

Для аналогичных территорий, не имеющих разведанных запасов нефти и газа, но обладающих прогнозной оценкой, свидетельствующей о значительных перспективах открытия месторождений, следует применять термин «перспективная нефтегазоносная область».

Самостоятельные нефтегазоносные области ограничиваются бесперспективными или малоперспективными землями.

Нефтегазоносный район является частью нефтегазоносной области. Это территория, расположенная, как правило, в пределах одного или нескольких средних тектонических элементов (выступа, вала, куполовидного поднятия, депрессии), или их частей, характеризующихся распространением одноименных продуктивных горизонтов, близкими глубинами их залегания, сходными типами месторождений нефти и газа и фазовыми состояниями углеводородов в залежах. В отдельных случаях при достаточно убедительном обосновании можно выделить самостоятельный нефтегазоносный район (вне области).

Нефтегазоносные провинции: Волго-Уральская, Тимано-Печорская, и др.

Примером основных нефтегазоносных провинций России может служить Волго-Уральская нефтегазоносная провинция. Волго-Уральская нефтегазоносная провинция охватывает огромную территорию между Волгой и Уралом и включает Татарскую, Верхнекамскую, Пермско-Башкирскую, Мелекесскую, Южно-Предуральскую, Средневожскую, Нижневожскую нефтегазоносные и Уфимско-Оренбургскую газонефтеносную области. В ее пределах открыто много нефтяных

месторождений, обеспечивших основной прирост добычи нефти в СССР в период 1950—1970 гг. В последние годы значительно расширена сырьевая база газовой промышленности за счет открытия Оренбургского газо-конденсатного месторождения.

Первые промышленные притоки нефти на территории рассматриваемой провинции получены в 1929 г. из пермских отложений на месторождении Чусовские Городки, расположенном в Предуральском прогибе. В последующие годы между Волгой и Уралом были обнаружены промышленные залежи нефти в отложениях средне- и нижнекаменноугольных. В 1944 г. была установлена промышленная нефтеносность девонских отложений на месторождениях Яблоновый Овраг в Куйбышевской области и Туйма-зинском в Башкирии.

Основные черты геологического строения. Волго-Уральская нефтегазоносная провинция находится на восточном склоне Восточно-Европейской древней платформы. Возраст фундамента определяется как архейский, а в ряде районов — как нижнепротерозойский.

Поверхность фундамента имеет сложный, глубоко расчлененный рельеф, образованный системой погребенных впадин и выступов. Структура поверхности фундамента блоковая. Наиболее глубокие погребенные впадины заполнены преимущественно терригенными отложениями бавлинской свиты, имеющей возраст от верхнего протерозоя (рифей) до нижнего девона включительно. Выше залегают породы средне- и верхнедевонские, каменноугольные, пермские и мезозойско-кайнозойские.

Образования среднего девона, а также низов франского яруса верхнего девона повсеместно представлены терригенными отложениями с прослоями карбонатных пород, большая же часть верхнего девона имеет карбонатный состав. Терригенная толща девона состоит из отложений прибрежно-морского и лагунно-озерного происхождения. В каменноугольных отложениях выделяются все три отдела: нижний, средний и верхний. Они сложены преимущественно карбонатными породами. Мощность терригенных отложений нижней части визейского яруса резко колеблется от 50 до 450 м. Нижняя пермь представлена в основном карбонатными породами. В верхней части нижней пермь развиты галогенные и сульфатные породы: гипсы, ангидриты, каменная соль. Мощность их изменяется от нескольких десятков до 500—600 м, максимальной величины она достигает в Предуральском прогибе. Верхнепермские породы значительной мощности выражены крас-ноцветными континентальными осадками. Мезозойские и кайнозойские отложения наиболее распространены в пределах Нижнего Поволжья. Юрские и нижнемеловые породы в основном состоят из глин с прослоями песчаников и алевролитов. В верхнем мелу развиты известняки и мергели.

Волго-Уральская нефтегазоносная провинция включает два разнородных тектонических элемента: Предуральский передовой прогиб и

восточную часть Русской платформы. В Предуральском прогибе с севера на юг выделяются Соликамская и Юрюзано-Сылвенская депрессии (Среднее Предуралье), далее на юг — Вельская, Мелеузская и Оренбургская депрессии (Южное Предуралье). Тектоническое строение Предуральского прогиба характеризуется развитием четких линий дислокаций субмеридионального направления. В соответствии с этим находятся распределение фаций осадочного чехла и глубина погружения ложа.

На обширной территории восточной части Русской платформы располагаются крупные тектонические элементы: Волго-Уральская антеклиза, Рязано-Саратовский прогиб и восточный склон Воронежской антеклизы. Каждый из этих тектонических элементов включает крупные сводовые поднятия и разделяющие их впадины и прогибы.

На территории Волго-Уральской антеклизы, в западной ее части, выделяют Токмовский и Котельнический своды. В центральной части антеклизы находится обширный Татарский свод, осложненный несколькими вершинами. Он отделяется от Токмовского и Котельнического сводов линейным Казанско-Кировским прогибом. На востоке Волго-Уральской антеклизы расположен обширный Пермско-Башкирский свод, отделенный от Татарского Верхнекамской впадиной и Бирской седловиной. Восточный склон Пермско-Башкирского свода погружается в Предуральский прогиб. В южной части антеклизы выделяется крупная широтно вытянутая структура Жигулевско-Оренбургского свода. На севере она ограничена Ставропольской, Мелекесской и Серно-водско-Абдулинской впадинами, отделяющими ее от Токмовского и Татарского сводов, а на юге граничит с Бузулукской впадиной и Прикаспийской синеклизой. В северной части Волго-Уральской антеклизы находится еще ряд крупных положительных структур таких, как Сысольский и Камский своды.

Волго-Уральская антеклиза отделена от другой региональной положительной структуры — Воронежской антеклизы — глубоким Рязано-Саратовским прогибом древнего заложения. Юго-восточную часть восточного склона Воронежской антеклизы обычно называют Приволжской моноклиной.

Важной особенностью строения Волго-Уральской провинции является широкое развитие линейных унаследованных дислокаций, соответствующих разломам фундамента. С зонами линейных дислокаций связано развитие очень пологих, относительно узких, сильно вытянутых валов асимметричного строения или структурных уступов (флексур). Валы, в свою очередь, осложнены локальными положительными структурами — куполами, антиклиналями, брахиантиклиналями. Второй особенностью строения Волго-Уральской провинции является наличие межформационной системы Камско-Кинельских прогибов. Последние формировались в верхнедевонское и турнейское время как глубоководные впадины, на бортах которых развивались фаменские и турнейские рифогенные сооружения. В

нижневизейское время эти впадины были сивелированы мощным накоплением терригенных толщ.

Нефтегазосность — промышленные залежи нефти и газа приурочены к девонским, каменноугольным и пермским отложениям. Основные продуктивные толщи — терригенные отложения девонские и нижнекаменноугольные, следующие по значению — карбонатно-терригенные толщи среднекаменноугольных и нижнепермских отложений. Ряд промышленных скоплений нефти и газа обнаружен в карбонатных породах девона и нижнего карбона.

В отложениях терригенного девона установлено шесть промышленно нефтегазоносных горизонтов, представленных песчаниками и алевролитами и разделенных пачками глин и аргиллитов. Они являются главными объектами разработки в Татарии, Башкирии, Куйбышевской и Оренбургской областях. К терригенному продуктивному комплексу нижнекаменноугольных отложений относятся песчано-глинистые образования нижней части визейского яруса (малиновский и яснополянский надгорizontы). Эта толща имеет региональное распространение в пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Наибольшей мощности она достигает в Камско-Кинельской системе прогибов (до 300—400 м). В терригенных каменноугольных отложениях установлено несколько продуктивных горизонтов. В ряде районов важное промышленное значение имеют карбонатные отложения намюрского и башкирского ярусов.

Продуктивный комплекс верхнего отдела каменноугольной системы и нижнего отдела пермской системы нефтегазоносен в основном в юго-восточной и восточной частях Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. До последнего времени нефтегазосность этих отложений связывали главным образом с погребенными рифовыми массивами сакмаро-артинского возраста, широко развитыми в Предуральском прогибе. После открытия Оренбургского газоконденсатного месторождения возросло значение этого комплекса в платформенной части Волго-Уральской провинции.

Месторождения нефти и газа в основном приурочены к локальным структурам. Локальные структуры, как правило, группируются в валы или валообразные поднятия. Для районов платформенной части провинции характерно развитие в основном пологих структур с углами падения пород от нескольких минут до 5°. Более крутые углы крыльев характерны для структур облекания биогерм фаменского и турнейского возраста, расположенных по бортам Камско-Кинельской системы прогибов, и для структур, расположенных вдоль флексур тектонического происхождения. В пределах Предуральского прогиба месторождения приурочены к рифовым массивам, объединенным в связки или вытянутым

в цепочки (барьерные рифы). Кроме того, месторождения нефти связаны с вытянутыми крутыми складками.

Большая часть залежей нефти и газа пластового сводового типа. Имеются также залежи массивные. Первые характерны главным образом для терригенной части продуктивного разреза, вторые — для карбонатной. Литрлогическая изменчивость коллекторов обуславливает наличие залежей литолого-структурного типа, встречаются также залежи тектонически экранированные.

Ромашкинское нефтяное месторождение открыто в 1948 г. Оно приурочено к крупной пологой куполовидной структуре на южной вершине Татарского свода. На западе эта структура отделяется узким и крутым прогибом меридионального простирания от Акташско-Новоелховского вала, в пределах которого находится Акташско-Новоелховское нефтяное месторождение.

Основная нефтяная залежь Ромашкинского месторождения приурочена к горизонту пашийского времени на глубине 1700 м. Горизонт представленный переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов, характеризуется сложным строением. На небольшом расстоянии отдельные пласты выклиниваются или значительно увеличиваются по мощности, сливаясь в единый горизонт. Всего в разрезе горизонта выделяют пять нефте-насыщенных пластов (а, б, в, г, д). Суммарная мощность коллекторов горизонта 30—50 м. Дебиты нефти в начальный период разработки достигали 100 т/сут и более. Неповсеместно, лишь на некоторых участках северо-западной части Ромашкинского месторождения над горизонтом залегает нефтяной пласт до кыновского горизонта (франский ярус), сложенный песчаниками и алевролитами. Ниже продуктивного горизонта залегают другие нефтяные горизонты (живетский ярус). Они также представлены песчано-алевролитовыми породами, замещающимися непроницаемыми разностями.

На Ромашкинском месторождении установлена нефтеносность карбонатных коллекторов фаменского и турнейского ярусов, песчаников и алевролитов яснополянского надгоризонта и известняков башкирского и верейского горизонтов. Многие из этих залежей уже введены в разработку. Кроме Ромашкинского месторождения здесь известны Туймазинское и целый ряд других месторождений нефти.

Крупнейшие месторождения мира:

1. Гхавар – запасы нефти 11,1 млрд.т, глубина залегания 1500-4100 м, возраст – юра, пермь, коллектор карбонатный тип ловушки структурный (Саудовская Аравия).
2. Большой Бурган – запасы 10,2 млрд.т, глубина залегания 1080 – 2600м, возраст – мел, юра, коллектор терригенный, ловушка структурная (Кувейт).

3. Самотлор – запасы 4 млрд.т, глубина 1670 – 2580м, возраст мел, юра, коллектор терригенный, тип ловушки структурный (Россия).

БИТУМЫ

Битумное сырье объединяет природные битумы и битумсо-держачие породы. Природные битумы — это вязкие и твердые производные нефти, образовавшиеся в результате ее гиперген-ных изменений. Битумсодержачие породы — пески, песчаники, известняки и доломиты, содержащие в своем составе природные битумы.

Битумсодержачие породы совместно с природными битумами распространены в осадочных бассейнах. Наиболее крупные их залежи приурочены к краевым бассейнам пассивных континентальных окраин. Менее крупные залежи контролируются ан-теклизмами и отдельными сводами, инверсионными грядами и их склонами, соляно-купольными структурами, складчатыми бортами межгорных впадин и передовых прогибов.

Битумные скопления установлены в широком стратиграфическом диапазоне — от докембрия до современных отложений. Однако в отдельных бассейнах они занимают узкие интервалы стратиграфического разреза, коррелируясь с одним (платформенные области) или двумя-тремя (складчатые области) нефте-газоносными комплексами.

Разнообразие форм битумных скоплений определяется характером нефтяных ловушек: сводово-массивные, сводово-пла-стовые, литологически и/или тектонически экранированные и т.п.

Разделяют шесть основных классов битумов: мальты, ас-фальты, асфальтиты, кериты, антраксолиты, озокериты).

Мальты — это густые, вязкие, реже твердые битумы, легкоплавкие, при охлаждении загустевают, становясь хрупкими.

Асфальты — вязкие, иногда твердые, темно-бурого до черного цвета со смоляным блеском и раковистым изломом.

Асфальтиты — твердые, хрупкие, черного цвета битумы с ярким блеском и раковистым изломом, высокоплавкие, при истирании образуют порошок. Их подразделяют на два подкласса — гильсониты и грээмиты.

Кериты — твердые, черного цвета вещества, имеют раковистый и занозистый излом, образуют два подкласса — альбер-титы и импсониты.

Антраксолиты — твердые, хрупкие, углеподобные образования, напоминающие антрацит, черного цвета, с раковистым изломом, высокоплавкие; среди них выделяют тухолиты, характеризующиеся высокими содержаниями урана, тория и редких земель.

Озокериты — пластичные, редко твердые битумы, матовые, цвета от светло-желтого до темно-бурого, легкоплавкие.

Для битумсодержачих пород важнейшей характеристикой является количественное содержание битума, которое выражается обычно в процентах от общей массы пород. Содержание битума в породах изменяется от долей процента до 20% в залежах пластового типа и до нескольких десятков

процентов в залежах жильного типа. Характер битумонасыщенных пород как карбонатных, так и терригенных различный — от сплошного, интенсивного, до слабого, пятнами. Для карбонатных пород свойственна большая степень неравномерности распределения в них битумов.

Физико-механические свойства битумсодержащих пород разнообразны и определяются в основном литологическим составом и особенностями их битумонасыщенности. Значения средней плотности изменяются от 1,9 до 2,7 г/см³ (в среднем 2,0-2,3 г/см³), водопоглощения — от 0,25 до 9% (в среднем 2-3%), пористости — от 0,4 до 20% (карбонатные) — 40% (терригенные) (в среднем 3-10%), предела прочности при сжатии — от единиц до 80 (терригенные породы) и 140 МПа (карбонатные породы) (в среднем 20-50 МПа).

В мировой практике специального учета битумсодержащих пород нет, учитывают только природные битумы, запасы которых (без стран СНГ) оцениваются в 580 млрд т, из них 71% приходится на Канаду и 27% — на Венесуэлу; в небольших количествах битумы имеются в США, Ираке, Турции и других странах.

Мировая добыча битумов без стран СНГ превышает 100 млн т/год.

Природные битумы рассматривают как комплексное органическое полезное ископаемое, являющееся сырьем для энергетики (нетрадиционный источник углеводородов), химической, металлургической и строительной промышленности, а также сельского хозяйства.

Битумсодержащие породы — строительное сырье для получения песка, щебня, минерального порошка и дробленого песка, обогащенных природным битумом. Материалы, получаемые из битумсодержащих пород, используют в качестве компонентов асфальтобетонных, цементобетонных и других смесей, в качестве щебня и песка для устройства покрытий, оснований и подстилающих слоев дорожных одежд.

Наиболее интенсивно разрабатывают кировые породы месторождений Западного Казахстана — Карамурат, Алтайское, Иманкара и Беке. На этих месторождениях предприятия объединения "Прикаспийсккирдорстрой" Минавтодора Казахстана ежегодно добывают до 800 тыс.т пород. В России предприятия объединения "Татавтодор" для целей дорожного строительства ведут добычу сырья на Спиридоновском месторождении битумсодержащих песчаников и на Васильевском месторождении битумсодержащих доломитов. Добыча составляет десятки тысяч тонн пород.

Примером интенсивного использования битумсодержащих пород служит месторождение Атабаска (песчаники с битумом), сырье которого является основным материалом для асфальтобетонных дорог в Канаде. В США до 10% асфальта, используемого при строительстве дорог, добывают из битумсодержащих песков.

подавляющее количество природных битумов относят к некристаллическим природным веществам — минералоидам. Большинство

из них обладают рентгеноаморфностью. Форма их выделений в преобладающем количестве случаев — аморфно-коллоидная, обусловленная формой пространства пор, каверн и трещин горных пород.

Состав минеральной части битумсодержащих пород весьма разнообразен (терригенные породы).

Минеральный состав карбонатных пород, вмещающих битумы, характеризуется преобладанием кальцита или доломита, а также наличием глинистых минералов, аутогенного кремнезема (опала, халцедона и кварца), гипса, ангидрита, целестина, пирита. Встречаются также аутигенные полевые шпаты, глауконит и другие минералы.

Изменения в минеральном составе вмещающих пород происходят под воздействием на них углеводородов и сопровождающих их газа и воды, обогащенных сероводородом. При наличии в породах сульфатов последние под воздействием углеводородов восстанавливаются с образованием элементарной серы. При наличии реакционноспособного железа в этих условиях образуется также пирит. Сера встречается обычно в сульфатно-карбонатных и карбонатных битумсодержащих породах, часто совместно со стяжениями гипса.

По условиям образования, геологическому строению, морфологии, размерам рудных тел и горно-техническим параметрам месторождения битумного сырья подразделяют на два основных промышленных типа — пластовый и поверхностных закирований.

Пластовые месторождения, в которых битумы насыщают породы-коллекторы, разделяются на скопления региональные и локальные. Первые, формируясь при миграции нефти в коллекторах, находящихся в зоне гипергенеза, образуют крупные поля или протяженные линейные зоны. Битумные поля таких скоплений выходят за пределы отдельных структур-ловушек.

С месторождениями регионального подтипа связаны, как правило, наиболее значительные ресурсы природных битумов. Пласты битумсодержащих пород таких месторождений, имеющие нередко мощность до нескольких десятков метров, на больших площадях залегают в поверхностных условиях, в связи с чем в значительной своей части благоприятны для эксплуатации открытым способом.

Пластовые месторождения локального подтипа формируются вследствие разрушения ранее образованных скоплений нефти при их выводе в зону гипергенеза. Такие залежи контролируются структурами, аналогичными нефтеносным. Они перспективны для разработки в целях дорожного строительства в связи с благоприятными условиями эксплуатации.

Значительно меньше залежи поверхностных закирований. Образуются при миграции нефти на поверхность по ослабленным зонам и при истечении нефти из обнаженных головных частей пластов нефтеносных пород,

поверхностные закиривания характеризуются, как правило, высоким содержанием битума, достигающим 20-30%.

По величине запасов (т) месторождения битумного сырья подразделяют на гигантские — десятки и первые сотни миллиардов, крупнейшие — сотни миллионов и миллиардов, крупные — десятки миллионов, средние — миллионы, мелкие — сотни тысяч, очень мелкие — десятки тысяч.

Среди битумсодержащих пород выделяют рыхлые и крепкие (массивные) разности пород. Рыхлыми считают главным образом битумсодержащие пески, а также песчаники и карбонатные породы с прочностью на сжатие менее 30 МПа. К ним относят практически все разновидности кировых пород. Крепкие разности битумсодержащих пород, в основном карбонатные, реже терригенные, характеризуются значениями прочности на сжатие более 30 МПа.

Битумсодержащие породы в зависимости от количества в них битума (по массе) подразделяют на сорта: с малым содержанием битума — менее 4%, средним — 4-14%, повышенным — 14-25% и высоким — более 25%.

Первые два сорта потребляют преимущественно для дорожного строительства, третий и четвертый используют в качестве источника для производства синтетической нефти. Количество битумов определяет технологические свойства битумсодержащих пород. При средней и высокой концентрациях битумов породы используют в ответственных слоях дорожных одежд, т.е. в покрытиях. При содержании битумов в терригенных породах более 6-8% применение их в дорожном строительстве требует внесения дополнительного количества минеральных материалов. Породы с меньшим содержанием битумов используют в подстилающих слоях и основаниях дорожных одежд, а с внесением дополнительного количества вяжущего — и в покрытиях.

Консистенция природных битумов (жидкая, вязкая, твердая) определяет температурный режим переработки сырья и необходимость внесения добавок определенного качества.

Битумы различной консистенции содержат разное количество таких компонентов, как гетероэлементы (O, N, S). Последние насыщают асфальто-смолистую часть битума по мере его преобразования. Данные групп гетероэлементов определяют интенсивность прилипания битума к минеральной части пород. Кроме того, в природных битумах отмечают повышенное содержание асфальтогеновых кислот, достигающее 5% и выше, более чем в 5 раз превышающее их количество в нефтебитумах. Кислоты как наиболее полярные и поверхностно-активные компоненты влияют на силу сцепления битумов со вмещающей породой. Асфальтогеновые кислоты при взаимодействии с карбонатом кальция пород образуют новые водонерастворимые соединения. Приведенные характеристики природных битумов обуславливают их высокие адгезионные свойства по отношению к

минеральной части, значительно превышающие таковые в искусственных битумо-минеральных композициях.

Присутствие в битумах активизирующих соединений делает возможным широкое использование битумсодержащих пород с повышенной глинистостью. Для успешного применения глинистых материалов в дорожном строительстве их обрабатывают вяжущими, в которые часто добавляют поверхностно-активные вещества. Процесс нейтрализации отрицательного воздействия глинистых частиц в битумсодержащих породах осуществляется в естественных условиях. В породе происходит сложное физико-химическое взаимодействие активных тонкодисперсных глинистых частиц и природного битума. Это приводит к адсорбции компонентов природного битума поверхностью глинистых частиц и склеиванию частиц и агрегатов глинистым битумом.

Крепкие разности битумсодержащих пород, в основном карбонатные, реже терригенные, характеризуются значениями прочности на сжатие более 30 МПа.

К основным параметрам, определяющим технологические свойства битумсодержащих пород и возможности их использования в качестве дорожно-строительных материалов, относят их литологическую характеристику, массовую долю битума, его консистенцию, прочность и глинистость породы.

Битумсодержащие породы в зависимости от количества в них битума (по массе) подразделяют на сорта: с малым содержанием битума — менее 4%, средним — 4-14%, повышенным — 14-25% и высоким — более 25%. Первые два сорта потребляют преимущественно для дорожного строительства, третий и четвертый используют в качестве источника для производства синтетической нефти. Для карбонатных пород характерно малое и среднее содержание битумов, для терригенных — от малого до высокого.

Количество битумов определяет технологические свойства битумсодержащих пород. При средней и высокой концентрациях битумов породы используют в ответственных слоях дорожных одежд, т.е. в покрытиях. При содержании битумов в терригенных породах более 6-8% применение их в дорожном строительстве требует внесения дополнительного количества минеральных материалов. Породы с меньшим содержанием битумов используют в подстилающих слоях и основаниях дорожных одежд, а с внесением дополнительного количества вяжущего и в покрытиях.

Консистенция природных битумов (жидкая, вязкая, твердая) определяет температурный режим переработки сырья и необходимость внесения добавок определенного качества.

Битумы различной консистенции содержат разное количество таких компонентов, как гетероэлементы (O, N, S). Кроме того, в природных битумах отмечают повышенное содержание асфальтогеновых кислот, дости-

гающее 5% и выше, более чем в 5 раз превышающее их количество в нефтебитумах. Кислоты как наиболее полярные и поверхностно-активные компоненты влияют на силу сцепления битумов со вмещающей породой. Асфальтогеновые кислоты при взаимодействии с карбонатом кальция пород образуют новые во-донерастворимые соединения. Приведенные характеристики природных битумов обуславливают их высокие адгезионные свойства по отношению к минеральной части, значительно превышающие таковые в искусственных битумо-минеральных композициях

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борзунов В.М. Месторождения нерудных полезных ископаемых, их разведка и промышленная оценка. – М.: Недра, 1969. – 336 с.
2. Борзунов В.М. Поиски и разведка месторождений нерудного металлургического сырья. – М.: Недра, 1980. – 303 с.
3. Борзунов В.М. Поиски и разведка месторождений минерального сырья для химической промышленности / В.М. Борзунов, Л.М. Гроховский. – М.: Недра, 1978. – 264 с.
4. Боярко Г.Ю. Экономика минерального сырья. – Томск: Изд-во «Аудит-Информ», 2000. – 365 с.
5. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые: Учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 284 с.
6. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые: Учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 284 с.
7. Курс неметаллических месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие / В.Ф. Дыбков, А.Е. Карякин, В.Д. Никитин, П.М. Татаринцов. – М.: Недра, 1969. – 472 с.
8. Методические указания по поискам и перспективной оценке месторождений цветных камней (ювелирных, поделочных, декоративно-облицовочных). – М.: Мингео СССР, 1977. – Вып. 12. Декоративно-облицовочные камни. – 90 с.
9. Минеральное сырье. Общие положения: Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. – 69 с.
10. Михеев В.Г. Неметаллические полезные ископаемые: Учеб. пособие. Красноярск: ГАЦМиЗ, 2003. – 160 с.
10. Недра России. Полезные ископаемые / А.А. Смыслов, Н.В. Межеловский, А.Ф. Морозов и др.; Под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смылова; Санкт-Петербург. гор. ин-т., Межрегион. центр по геол. картографии. – СПб.; М., 2001. – 547 с.
11. Неметаллические полезные ископаемые СССР: Справ. пособие / Под ред. В.П. Петрова. – М.: Недра, 1984. – 407 с.
12. Промышленные типы месторождений неметаллических полезных ископаемых: Учебник для вузов / А.Е. Корякин, И.А. Строна, Б.Н. Шаронов и др. – М.: Недра, 1985. – 286 с.
13. Романович И.Ф. Месторождения неметаллических полезных ископаемых: Учеб. пособие для вузов. – М.: Недра, 1986. – 366 с.
14. Сборник руководящих материалов по геолого-экономической оценке месторождений полезных ископаемых: В 2 т. – М.: ГКЗ СССР, 1985. – Т. 2. – 530 с.
15. Справочник месторождений полезных ископаемых строительной индустрии Красноярского края: В 2 т. / В.С. Миронов, А.М. Глушков, М.Л. Шерман и др. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1998. – Т. 1. – 462 с.; Т. 2. – 510 с.

16. Справочник по конъюнктуре мирового и российского рынка основных видов минерального сырья и продуктов их переработки / КНИИГГиМС. – Красноярск, 2001. – 108 с.

17. Строительные материалы: Справочник / А.С. Болдырев, П.П. Золотов, А.Н. Люсов и др.; Под ред. А.С. Болдырева, П.П. Золотова. – М.: Стройиздат, 1989. – 567 с.

18. Шевелев В.В. Мировой рынок минерального сырья: Учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. – 110 с.