

# **ГЕОЛОГИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

**Учебное пособие для студентов вузов**

*Под общей редакцией Э. А. Высоцкого*

Минск  
«ТетраСистемс»  
2006

УДК 553.3/4(075.8)  
ББК 26.34я73  
Г36

*Рекомендовано к изданию кафедрой динамической геологии географического факультета Белорусского государственного университета*

**А в т о р ы:** д-р геолого-минерал. наук, проф. *Э. А. Высоцкий*;  
д-р геогр. наук, проф. *В. Н. Губин*; канд. геолого-минерал. наук,  
доц., лауреат Госпремии БССР *Г. И. Илькевич*; канд. геолого-  
минерал. наук *Л. В. Штефан*

**Г36** **Геология** металлических полезных ископаемых :  
учеб. пособие для студентов вузов / Э. А. Высоцкий  
[и др.] ; под общ. ред. Э. А. Высоцкого. — Мн. : Тетра-  
Системс, 2006. — 336 с. : ил.  
ISBN 985-470-400-9.

В учебном пособии рассмотрены основные промышленные типы месторождений черных, цветных, благородных, редких, радиоактивных металлов и рассеянных элементов. Для каждого металла приводятся сведения по геохимии, минералогии, ресурсам, эпохам рудообразования и генетическим типам промышленных месторождений. Описаны наиболее представительные месторождения.

Для студентов геологических специальностей вузов, а также специалистов, занимающихся изучением рудных месторождений и минеральных ресурсов мира.

УДК 553.3/4(075.8)  
ББК 26.34я73

*Учебное издание*

**Высоцкий** Эдуард Александрович, **Губин** Валерий Николаевич,  
**Илькевич** Георгий Иванович, **Штефан** Лариса Васильевна

**ГЕОЛОГИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Учебное пособие

Ответственный за выпуск *С.В. Процко*

Подписано в печать 03.02.2006. Формат 84×108 1/32. Бумага для офсетной печати. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,64. Уч.-изд. л. 14,8. Тираж 1000 экз. Заказ 346.

Научно-техническое общество с ограниченной ответственностью «ТетраСистемс». ЛИ № 02330/0056815 от 02.03.2004.

220116, г. Минск-116, а/я 139 (тел. 219-74-01; e-mail: tetra@litera.by; http://www.ts.by).

Республиканское унитарное предприятие «Издательство «Белорусский Дом печати»». 220013, г. Минск, пр. Независимости, 79.

ISBN 985-470-400-9 © Оформление. НТООО «ТетраСистемс», 2006

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Последние десятилетия характеризуются гигантским ростом потребления минерального сырья во всех индустриальных странах мира. В сферу промышленного использования непрерывно вовлекаются новые месторождения полезных ископаемых, в том числе расположенные в относительно неблагоприятных климатических условиях, а также залегающие на значительных глубинах. Внедрение новейших методов и технологий (космогеологических, геофизических, ГИС-технологий и др.) в геологоразведочный процесс способствовало открытию многих месторождений в труднодоступных регионах суши и в пределах морских акваторий.

Главная цель данной дисциплины — дать студентам представление о геолого-промышленных типах месторождений металлических полезных ископаемых, закономерностях их размещения, связи рудных месторождений с определенными геологическими формациями и ознакомить будущих геологов с геологическим строением наиболее типичных месторождений.

В соответствии с программой курса принят пометальный обзор рудных месторождений. При группировке промышленных типов авторы придерживались единой генетической классификации рудных месторождений. Выделялись эндогенная, экзогенная и метаморфогенная серии, а в каждой из них соответствующие группы (например, в эндогенной серии магматическая, пегматитовая, полевошпатовых метасоматитов, грейзеновая, карбонатитовая, скарновая, плутоногенная гидротермальная, вулканогенная гидротермальная, колчеданная и стратиформная группы). Такое деление крайне важно, поскольку все месторождения формировались в связи с процессами, обусловившими развитие земной коры в целом.

В соответствии со сложившейся в бывшем СССР и СНГ традицией описание начинается с месторождений черных металлов (железо, марганец, хром, титан, ванадий), за-

тем цветных (медь, кобальт, никель, алюминий, свинец, цинк, олово, вольфрам, молибден, висмут и др.), благородных (золото, серебро, платина и платиноиды), радиоактивных (уран, торий), редких металлов (литий, цезий, рубидий, бериллий и др.) и завершается месторождениями рассеянных элементов.

Характеристика месторождений каждого металла или их естественных групп произведено по единой схеме. Вначале сообщаются краткие сведения по геохимии, минералогии, применению в промышленности, далее приводится информация о металлогении, эпохах рудообразования, ресурсах и запасах, описываются промышленные типы месторождений и рассматриваются характерные их примеры. Приведены сведения о качестве сырья, запасах и объемах добычи. Охарактеризована также современная минерально-сырьевая база металлических полезных ископаемых мира. Данные о ресурсах и запасах имеют существенное значение для правильного представления о промышленной ценности конкретных месторождений.

В основу книги положены материалы, собранные авторами и применяемые при чтении курса лекций «Месторождения металлических полезных ископаемых» для студентов-геологов Белорусского государственного университета. Использована также литература, ставшая классической (В. И. Смирнов, П. М. Татарин, А. И. Гинзбург, Ф. И. Вольфсон, А. В. Дружинин, В. М. Григорьев, Г. Шнейдерхён и др.), на которой обучались многие поколения советских геологов. В подборе материала большую помощь оказали Е. А. Никитин, Н. В. Аксаментова, Н. С. Петрова, И. В. Найденов, за что авторы выражают им глубокую благодарность.

В книге содержится информация, способная заинтересовать не только студентов-геологов, но и специалистов, занимающихся изучением рудных месторождений и минеральных ресурсов мира. Критические замечания будут приняты авторами и учтены в процессе дальнейшего усовершенствования учебного пособия.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

### Краткие исторические сведения

Первые упоминания о железе встречаются в египетских папирусах, сделанных примерно 4000 лет до н. э. По-видимому, оно было известно лишь в метеоритах. Изделия из железа появились во втором тысячелетии до н. э. в Египте, Ассирии и несколько позже в Индии и Китае. Широкое использование человеком железа для изготовления оружия, орудий труда и других предметов определило смену бронзового века железным (примерно IX–VIII вв. до н. э.). С развитием металлургии мелкие печи, в которых плавилась бурая железняк на древесном угле, сменились домами, выплавляющими чугун из разнообразных железных руд на каменноугольном коксе. Особенно большое развитие черная металлургия получила в XX веке, когда для изготовления специальных сталей начали широко использовать легирующие добавки (Co, Cr, Ni, Mo, W), а затем редкие металлы (Nb, Ta, Zr, Se, Te), редкие земли (Ce, La и др.).

Железо, чугун и сталь различаются между собой по содержанию углерода: железо содержит его 0,04–0,2 %, сталь 0,2–1,5 %, чугун 2,5–4 % и более. Содержание S и P в рудах не должно превышать 0,3 %, As 0,07 %, Sn 0,08 %, Zn и Pb 0,01 %, Cu 0,2 %, SiO<sub>2</sub> 15 %, MgO 12,5 %. Полезными примесями в рудах железа являются Mn, Ti, Ni, Cr, Mo и V.

### Геохимия

Железо является одним из наиболее широко распространенных элементов в земной коре. Его кларк равен 4,65 %. Повышенные концентрации (до двух кларков) наблюдаются в ультраосновных, основных и средних, а также метаморфических породах. В этих породах оно связано с пи-

роксенами, оливином, амфиболом или биотитом. Известно четыре изотопа железа —  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  и  $^{58}\text{Fe}$ . Оно обладает двумя устойчивыми валентностями; соединения  $\text{Fe}^{2+}$  связаны преимущественно с эндогенными процессами, а  $\text{Fe}^{3+}$  — с экзогенными. Коэффициент концентрации железа, представляющий отношения среднего содержания металла в промышленных рудах к его кларку, невысокий и равен 10. Имея много общего в строении атомов, в химических и геохимических свойствах, железо вместе с Ti, V, Mn, Cr, Ni, и Co образует одно геохимическое семейство. В гипогенных условиях оно обычно ассоциирует с Ti и V в основных и с Cr, Ni, Co в ультраосновных изверженных породах. В зоне гипергенеза типична ассоциация железа с Al, Mn, реже с Cr, Ni, Co и V. Самородное железо в природе встречается редко. Железо является в основном литофильным и халькофильным элементом, но проявляет также сидерофильные тенденции. Трехвалентное железо устойчиво лишь при низком pH раствора. При повышении pH резко возрастает гидролиз солей с образованием нерастворимого осадка  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . В случае наличия в растворе электролитов (солей Ca, Mg, щелочных металлов)  $\text{Fe}^{3+}$  быстро осаждается. Коллоиды  $\text{SiO}_2$  и гумусовых веществ предохраняют  $\text{Fe}^{3+}$  от коагуляции. Двухвалентное железо менее чувствительно к электролитам, но устойчиво также только в кислой или нейтральной среде.

## Минералогия

Известно около 300 минералов, содержащих железо. Среди них много породообразующих. Промышленное значение имеет относительно небольшая группа минералов. *Магнетит*  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (содержание Fe 72,4 %). Минерал группы ферришпинелей. Образует изоморфный ряд с магнезиоферритом  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  и непрерывные ряды с другими шпинелидами. Кристаллизуется в кубической сингонии, кристаллы октаэдрические, реже ромбододекаэдрические и кубические. Характерны агрегаты зернистые, друзы, радиально-лучистые, почковидные, оолитовые, сажистые и др. Сильно магнитен. Цвет черный, иногда с синеватой побелостью. Черта черная. Блеск полуметаллический до металлического. Твердость 5,5–5,6, плотность 4,8–5,3 г/см<sup>3</sup>.

Магнетит с примесью  $TiO_2$  называется *титаномагнетитом*, а с примесью  $V_2O_5$  — *кульсонитом*. *Гематит*  $Fe_2O_3$  (Fe 70 %) кристаллизуется в тригональной сингонии. Кристаллы пластинчатые, ромбоэдрические, редко призматические и скаленоэдрические. Агрегаты листоватые (*железная слюдка*, *железная роза*), чешуйчатые и жирные на ощупь (*железная сметана*), плотные, скрытокристаллические (*красный железняк*), натёчные, почковидные (*красная стеклянная голова*, *крававик*), землистые, оолитовые и др. Цвет черный, стально-серый. Черта вишнево-красная, блеск полуметаллический, алмазный. Твердость 5–6, плотность 5,26 г/см<sup>3</sup>. *Мартит*  $Fe_2O_3$  (Fe 70 %) — псевдоморфозы гематита по магнетиту. Образуется на месторождениях латеритного выветривания и в железных шляпах. *Бурый железняк*: природные гидроксиды железа — *гётит* ( $FeO \cdot OH$ ) и *гидрогётит* ( $FeO \cdot OH \cdot nH_2O$ ) в смеси с гидроксидами кремнезема и глинистым веществом (Fe 48–63 %). *Сидерит*  $FeCO_3$  (Fe 48,3 %). Существуют изоморфные ряды  $FeCO_3 - MgCO_3$  и  $FeCO_3 - MnCO_3$ . Разновидности марганецсодержащих минералов — *манганосидерит*, *олигонит*, магнийсодержащих минералов — *сидероплезит*, кальцийсодержащих — *сидеродот* и кобальтсодержащих — *кобальтолигонит* и *кобальтсферосидерит*. Силикаты железа — *шамозит* и *тюрингит* (Fe 27–38 %).

Сернистые и мышьяковистые соединения железа (*пирит*, *арсенопирит* и др.), несмотря на высокое содержание Fe, не могут являться минералами, представляющими промышленный интерес в качестве руд железа, так как S и As являются вредными компонентами в составе железных руд.

## Применение в промышленности

Железные руды являются природным сырьем для получения чугуна в доменных печах, железа — внедоменным способом и стали — в бессемеровских конверторах или мартеновских печах. В нефтяной промышленности применяется магнетит в качестве утяжелителя глинистых растворов при бурении глубоких скважин.

Железные руды, пригодные для металлургии, должны иметь определенный минеральный и химический состав,

а также физические свойства. Минимальное содержание железа в сырых рудах, пригодных для эксплуатации, допускается в количестве 25–30 %. Титаномагнетитовые руды могут разрабатываться при среднем содержании железа 15–17 % в связи с попутным извлечением из них титана и ванадия.

Минимальное содержание железа в рудах, используемых для плавки в домнах, изменяется в определенных пределах и зависит от минерального типа руд. Для магнетитовых и гематитовых руд содержание железа должно быть не менее 46–50 %; для бурожелезняковых – 37–45 %; для сидеритовых – 30–36 %. Руды с более низким содержанием железа подвергаются обогащению путем рудоразборки, промывки, магнитный и электромагнитной сепарации и других процессов. Из физических свойств железной руды основное значение имеют следующие: плотность, твердость, кусковатость, пористость, газопроницаемость, а также структура и текстура.

## Ресурсы и запасы

Ресурсы железных руд известны более чем в 130 странах. По данным ГНПП «Аэрогеология» Министерства природных ресурсов РФ по состоянию на начало 1997 г. они оценивались в 1456 млрд. т. В недрах Америки сосредоточено 33,3 %, Европы – 29,6 %, Азии – 15,8 %, Австралии и Океании – 12 % и Африки – 9,3 %. Наибольшими ресурсами железных руд обладают Россия – 256 млрд. т (включая прогнозные ресурсы категорий  $P_1$ ,  $P_2$ , и  $P_3$ ), Бразилия – 200 млрд. т, Австралия – 165 млрд. т и США – 150 млрд. т.

Общие запасы железных руд известны в 107 странах. Они составляют 381,3 млрд. т, в том числе подтвержденные – 214,3 млрд. т. По количеству общих и подтвержденных запасов лидирует Россия: 26,4 % и 26,7 % мировых, соответственно (табл. 1).

По разведанным (подтвержденным) запасам месторождения железных руд разделяют на весьма крупные (более 1 млрд. т), крупные (300 млн.–1 млрд. т), средние (50–300 млн. т) и мелкие (менее 50 млн. т).

Таблица 1

## Запасы железных руд (млн. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание железа, %
Россия	100909	57140	26,7	36
<b>ЕВРОПА</b>	52042	37918	17,7	...
Великобритания	3137	1920	0,9	26
Германия	2908	920	0,4	28
Норвегия	1740	550	0,3	33
Украина	30742	26435	12,4	35
Швеция	4600	3000	1,4	53
<b>АЗИЯ</b>	54309	30360	14,2	...
Индия	12000	5400	2,5	61
Иран	3600	1950	0,9	56
Казахстан	16610	8803	4,1	39
Китай	9000	9000	4,2	33
Турция	1380	650	0,3	46
Филиппины	990	590	0,3	50
<b>АФРИКА</b>	52499	22043	10,3	...
Алжир	5370	1535	0,7	49
Ангола	2075	1000	0,5	47
Габон	1950	1410	0,7	64
Гана	1950	924	0,4	40
Гвинея	4460	2100	1,0	57
Кот-д'Ивуар	3310	1400	0,7	44
Либерия	1600	900	0,4	67
Ливия	2000	1800	0,8	50
Мадагаскар	1350	1025	0,5	55
Сенегал	1300	893	0,4	58
ЮАР	9300	4000	1,9	62
<b>АМЕРИКА</b>	88056	48079	22,5	...
Бразилия	17000	11000	5,1	58
Венесуэла	4500	2000	0,9	60
Канада	26000	12000	5,6	40
Куба	3000	2600	1,2	42
Перу	3120	1428	0,7	54
США	25000	16000	7,5	24
<b>АВСТРАЛИЯ</b>	32200	18000	8,4	64

## **Добыча и производство**

Добыча железных руд на рубеже XX–XXI вв. осуществлялась более чем в 40 странах. Основное количество железорудного сырья добывалось на месторождениях магнетит-гематитовых руд в железистых кварцитах и сланцах. Преобладающее большинство месторождений этого типа разрабатывается открытым способом. Второе место по объемам разработки занимают месторождения осадочных гидрогётит-шамозит-сидеритовых руд.

Мировое производство товарных железных руд составляет около 1 млрд. т. На 12 стран-производителей приходится 92,1 % суммарного производства железных руд: Китай – 24,2 %, Бразилия – 17,5 %, Австралия – 14,3 %, Россия – 7 %, Индия – 6,5 %, США – 6,1 %, Украина – 4,6 %, Канада – 3,6 %, ЮАР – 3 %, Венесуэла – 2 %, Швеция – 2 %, Казахстан – 1,3 %.

В Китае разрабатывается около 100 крупных месторождений, запасы которых превышают 100 млн. т (содержание железа в рудах в среднем 33 %). Действуют 17 горнодобывающих компаний. В Австралии почти вся горнодобывающая промышленность страны сосредоточена в железорудной провинции Пилбара (Западная Австралия). На этот регион приходится 97 % всех добытых в стране руд. Самым крупным производителем железорудного сырья является компания «*Rio Tinto's Hamersley Iron*».

В России наиболее крупные месторождения сосредоточены в Центральном-Черноземном регионе. Эксплуатация железорудных месторождений здесь ведется тремя горнообогатительными комбинатами (Лебединским, Михайловским и Стойленским). Месторождения железных руд разрабатываются также в Северном (Ковдорское, Костомукшское и Оленегорское месторождения), Уральском, Западном-Сибирском и Восточно-Сибирском регионах.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Железорудные месторождения образовывались во все эпохи: начиная с позднего архея и раннего протерозоя до миоцена и плиоцена включительно. На геосинклинальном этапе основная концентрация железа происходит на ран-

ней стадии и тесно связана с базальтовым магматизмом, когда формируются магматические и скарновые месторождения железных руд. Средняя и поздняя стадии геосинклинального цикла для железа мало продуктивны.

Экзогенные железорудные месторождения начали формироваться в раннем протерозое, когда существовали специфические условия переноса железа, поступавшего с континентов в водные бассейны. Железо, по-видимому, переносилось в виде бикарбонатов в глубинные области океана, где осаждалось в виде гидроксидов и частично карбонатов совместно с кремнистыми образованиями. Последующий метаморфизм таких образований мог привести к формированию железистых кварцитов, с которыми связаны огромные запасы железорудного сырья. Осадочные месторождения железа, возникшие в более поздние эпохи, формировались в основном в зоне шельфа за счет соединений железа, поступавших с суши, предварительно испытавших интенсивное латеритное выветривание. Перенос железа осуществлялся в виде коллоидных растворов, предохраненных гумусовыми кислотами от коагуляции. В зависимости от изменения окислительно-восстановительного потенциала в области накопления осадков возникали бурожелезняковые либо силикатные железные руды.

*Докембрийская эпоха* была исключительно благоприятной для формирования крупных и уникальных месторождений железорудного сырья. К ним относятся месторождения железистых кварцитов и образованным по ним богатых мартит-гематитовых руд Кривого Рога (Украина), КМА (Россия), Западной Австралии (месторождение Хамерсли), района Лабрадора (Канада), озера Верхнего (США, Канада), штатов Бихар и Орисса (Индия), Минас-Жерайс (Бразилия) и др.

*Раннепалеозойская эпоха* по сравнению с докембрийской характеризуется менее значительным оруденением, связанным с каледонским тектогенезом. Месторождения железных руд встречаются во многих странах мира, но удельный вес их в мировых запасах и добыче относительно невелик. Наиболее крупные месторождения этого возраста известны в Северной Америке – Уобана (провинция Ньюфаундленд в Канаде) и месторождения Бирмингемского района штата Алабама в США.

В *позднепалеозойскую эпоху* образовался ряд месторождений в СНГ. Большая часть их представлена контактово-метасоматическими магнетитовыми рудами, генетически связанными с гранитоидами. К ним относятся месторождения Тагило-Кушвинской группы на Урале (Высокогорское, Гороблагодатское и др.); в Кузнецком Алатау (Тейская группа), Горном Алтае (Инское, Белорецкое и другие месторождения). В Казахстане месторождения этого возраста известны в Кустанайском рудном районе (Качарское, Сарбайское, Соколовское и др.), а также в Центральном Казахстане (Атасуйская группа, в которой наиболее крупным является месторождение Западный Караджал). Многочисленные, но относительно небольшие месторождения имеются в Западной Европе — в Австрии, Бельгии, Франции. Издавна разрабатываются сидеритовые месторождения Австрии в Восточных Альпах, в районе развития девонских отложений, представленных граувакками, известняками, филлитами, кварцитами и песчаниками. Из них наиболее крупным является месторождение Эрцберг. Месторождения этого возраста выявлены также в Алжире, Ливии и других странах Северной Африки.

В *мезозойскую эпоху* были образованы многочисленные осадочные морские и континентальные (речные и озерные) железорудные месторождения на молодых эпигерцинских платформах и плитах. Накопление железных руд происходило в больших масштабах. Одной из крупнейших в мире является Западно-Европейская провинция, где образовались оолитовые железные руды, состоящие из лимонита и гематита и в меньшей степени из сидерита и шамозита. Большая часть этой провинции находится на территории Франции. Крупные месторождения железных руд юрского возраста сосредоточены в Великобритании — в Линкшире (месторождение Фродингем), Йоркшире (месторождение Кливленд), Оксфоршире (месторождение Банбери) и др. В Германии наиболее значительные месторождения расположены в районе Зальцгиттера. Здесь рудоносен базальный конгломерат нижнего мела мощностью 5–100 м. С ним связаны оолитовые бурые железняки. Содержание железа в рудах 25–33 %,  $\text{SiO}_2$  17–30 %,  $\text{CaO}$  4–9 %, P менее 0,9 %.

В Северной Африке в мезозойскую эпоху сформировалась многочисленная группа железорудных месторождений

(тип Бильбао). Они отличаются небольшими запасами (от 1 до 20–30 млн. т), реже до 100 млн. т, но характеризуются высоким качеством руд (среднее содержание железа около 52 %). К этой группе принадлежат месторождения замещения в известняках юры и мела: в Алжире месторождения Уэнза, Бу-Кхарда, Бени-Суэйф; в Марокко — Уиксон; в Тунисе — Джерисса, Дуария и др. В Азии мезозойские месторождения железных руд известны в Китае и Малайзии. В Китае они представлены несколькими типами. В провинции Хубэй разведана группа месторождений Дае. Рудные залежи расположены на контакте известняков триаса с интрузиями диорита и сиенита. Они представлены в основном гематитом, местами магнетитом, реже лимонитом. Содержание железа 57,6–60,5 %, P 0,03–0,1 %, S 0,06–0,32 %, SiO<sub>2</sub> 5,9–9,4 %.

На территории России Н. М. Страхов выделил Северо-Евразийскую металлогеническую провинцию, в пределах которой расположены: Липецкий и Тульский бассейны сидерит-гидрогетитовых руд; месторождения сидерит-гидрогетитовых руд Горьковской и Кировской областей; месторождения инфильтрационного типа Алапаевской группы восточного склона Урала; Хоперский железорудный район; Аятский бассейн морских руд (K<sub>2</sub>) в Восточном Зауралье; Западно-Сибирский бассейн морских оолитовых руд в среднем течении р. Обь. Многочисленные месторождения железных руд известны в пределах Сибирской платформы в области развития траппов пермо-триаса, тяготеющих к краевым частям Тунгусской синеклизы.

*Кайнозойская эпоха* характеризовалась исключительно широким проявлением процессов формирования железных руд, которые привели к образованию: 1) многочисленных месторождений латеритного типа в Америке, Азии, Океании и Африке; 2) осадочных (морских и континентальных) месторождений на территории СНГ, Западной Европы, Северной Америки и Африки; 3) скарновых месторождений в Румынии, Индонезии, Мексике и других странах. Для этой эпохи характерны крупные ресурсы железа, заключенные в месторождениях латеритных руд, которые часто содержат промышленные концентрации Ni и Co. На территории СНГ крупнейшим по запасам руд является Керченский бассейн, включающий Северное Причерноморье, восточную часть степного Крыма, Керчен-

ский и Таманский полуострова. Месторождения осадочных руд третичного возраста известны в ряде стран Западной Европы — Дании, Германии (Кессенберг, Грюнтен), Бельгии (Герольд), Швейцарии (Делемон).

## Генетические типы промышленных месторождений

Железорудные месторождения промышленного значения весьма разнообразны. Среди них выделяются: 1) магматические, 2) карбонатитовые, 3) скарновые, 4) вулканогенные гидротермальные, 5) вулканогенно-осадочные, 6) кор выветривания, 7) осадочные, 8) метаморфогенные. Основные запасы железных руд в земной коре связаны с метаморфогенными и осадочными месторождениями.

*Магматические месторождения.* В группе собственно магматических месторождений железных руд выделяются два класса, связанные: 1) с кислыми изверженными породами и 2) с основными и ультраосновными породами. Типичным представителем первого класса является месторождение *Кирунавара*, расположенное в Северной Швеции (рис. 1). Разработка его началась в XIX веке после внедрения в производство томасовского способа плавки стали, когда стало возможным промышленное использова-

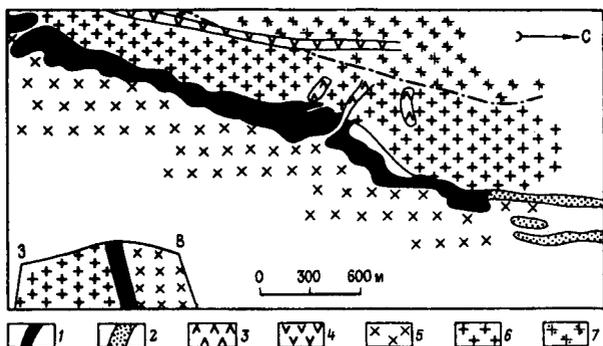


Рис. 1. Схематический план и поперечный разрез вкрест простирания месторождения магнетита Кирунавара (по Н. Быховеру): 1 — руда; 2 — руда под наносами; 3 — дайки аплита; 4 — дайки кварцевого порфира; 5 — кварцевые порфиры; 6 — сиенит-порфиры; 7 — сиениты

ние фосфористых руд. Месторождение представлено плитообразным рудным телом субмеридионального простирания с падением на восток под углом 50–60°, залегающим по контакту сиенит-порфиров в лежащем боку и кварцевых порфиров в висячем. Протяженность этого тела достигает 4,75 км, средняя мощность 100 м. Оно сложено магнетитом в тесной ассоциации с апатитом. Жильные минералы представлены авгитом, роговой обманкой, биотитом и турмалином. Руды массивные, плотные, реже с флюидальной и брекчиевидной текстурой. Рудное тело пересечено дайками аплитов, сиенит-порфиров и гранитов. Содержание Fe составляет 55–70 %, P – 3,5–6 % и более. В апатитах присутствуют редкие земли и иттрий в пределах 0,15–0,65 %. Запасы магнетитовых руд месторождения Кирунавара оцениваются в 1,8 млрд. т. Месторождение интенсивно разрабатывается. Руда поступает на металлургические предприятия Швеции, Германии и Великобритании. Удельный вес месторождений данного типа превышает 5 % и в основном приходится на Швецию.

Магматические месторождения, связанные с основными и ультраосновными породами, представляют собой зоны концентрированной вкрапленности с шлировыми и жилولينзовидными обособлениями титаномагнетита. Основным рудным минералом месторождений этого класса является титаномагнетит со структурой распада твердого раствора, представляющего собой магнетит, содержащий тонкопластинчатые вроски ильменита. В подчиненном количестве отмечаются зерна магнетита, ильменита и шпинели. Руды характеризуются промышленными концентрациями Fe, V, иногда Ti и низким содержанием S и P. Месторождения этого класса широко известны на Урале (Качканарское, Кусинское и др.), в Горном Алтае (Харловское), в США (Тегавус), ЮАР и других странах.

*Карбонатитовые месторождения.* С карбонатитовыми массивами нередко связаны железорудные месторождения. Они приурочены, как правило, к щелочно-ультраосновным интрузивам центрального типа. Характерны перовскит-титаномагнетитовые и апатит-магнетитовые руды. Такие месторождения известны в России на Балтийском щите (Ковдор, Африканда), Сибирской платформе (Гулинский массив), на Африканской платформе (Сукулу в Уганде, Дорова в Зимбабве, Люлекоп в ЮАР и др.).

Типичным примером может служить *Ковдорское месторождение*. Оно расположено в Кировском районе Мурманской области и приурочено к одноименному массиву ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов площадью 40 км<sup>2</sup>. Массив представляет многофазный интрузив центрального типа, сложенный последовательно внедрившимися оливинитами, мельтейгитами, ийолитами, нефелиновыми сиенитами, а также сложным комплексом силикатных метасоматитов и карбонатитов. Магнетитовые руды и магнетитосодержащие породы слагают вытянутое в субмеридиональном направлении рудное тело длиной 0,3 км и шириной 0,1–0,8 км. Месторождение разведано до глубины 600–700 м. Преобладают руды с небольшим содержанием кальцита: апатит-форстерит-магнетитовые, форстерит-магнетитовые и флогопит-apatит-форстерит-магнетитовые. Во всех разновидностях руд наблюдается тонкая вкрапленность пирохлора и бадделеита. Содержание основных компонентов в рудах составляет (%): Fe 20–55 (в среднем 29), MgO 15–17, CaO 11–12, P 2,9, S 1,2, MnO и TiO<sub>2</sub> – десятые доли процента. Месторождение разрабатывается АО «Ковдор».

*Скарновые (контактово-метасоматические) месторождения* связаны с умеренно кислыми интрузивами (гранодиоритами, кварцевыми диоритами), контактирующими обычно с карбонатными толщами. Они широко распространены на Урале (Высокогорское, Гороблагодатское и др.), в Казахстане в Кустанайской области (Соколовское, Сарбайское, Качарское и др.), Горной Шории и Хакасии (Тейское, Тельбес, Таштагол, Абаканское и др.), США (Айрон-Спрингс, Адирондак), Марокко (Риф), Румынии (Банат) и других странах.

Месторождения представлены пластообразными залежами, линзами, гнездами сплошных руд и вкрапленностью магнетитов в скарнах. Состав скарнов разнообразен: встречаются гранатовые, гранат-эпидотовые, пироксен-гранатовые, актинолитовые и эпидот-хлоритовые. Содержание железа в рудах варьирует от 20 до 70 %. Нередко присутствует сера (до 3 %), связанная с вкрапленностью в рудах пирита и халькопирита.

Типичный представитель этой группы – *Соколовское месторождение*. Оно расположено в 40 км от г. Кустаная в Тургайском прогибе и приурочено к зоне гранат-пирок-

сен-скаполитовых скарнов, развивавшихся вдоль зоны разлома по контакту палеозойских известняков с диоритами и порфиритами. В скарновой зоне, вытянутой в субмеридиональном направлении на 7,3 км, залегает магнетитовое рудное тело, падающее на запад под углом 70–80°. Наиболее высокие концентрации магнетита наблюдаются в южной части рудного тела. Здесь на верхних горизонтах мощность рудного тела достигает 250–270 м. На остальной площади месторождения мощность его не превышает 100–110 м. Оруденение развито в пачке известняковых туффигов (мощность 120–140 м), залегающих под толщей порфиритов. Субширотные и диагональные разломы делят месторождение на ряд отрезков протяженностью 800–1400 м. Руды магнетитовые, массивные, реже вкрапленные. На верхних горизонтах месторождения до глубины 70–75 м магнетиты мартитизируются. Содержание Fe в богатых рудах составляет 57–58 %, S 1,35–2,57 %, P 0,07–0,09 %. Среди вкрапленных руд, требующих обогащения, различают два сорта: с содержанием Fe 30–50 и 20–30 %. Руды характеризуются высокими концентрациями Ca и Mg, что улучшает технологический процесс их плавки. Месторождение разрабатывается «Соколовско-Сарбайской ассоциацией». Добытая руда поступает на Соколовско-Сарбайский ГОК. К скарновому типу относится *месторождение железных руд горы Магнитной*, находящейся на восточном склоне южной части Уральского хребта. Оно приурочено к приконтактовой зоне сложной гранитной интрузии, прорвавшей осадочно-эффузивную толщу пород нижнего карбона, состоящую из известняков, порфиритов и их туффов (рис. 2).

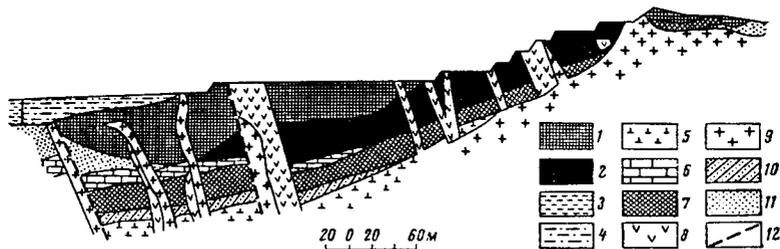


Рис. 2. Разрез по борту карьера горы Магнитной (по Г. Брауну и др.): 1 – руды окисленные; 2 – руды первичные; 3 – делювий безрудный; 4 – делювий рудный; 5 – порфириты; 6 – известняки и мрамор; 7 – скарны; 8 – диориты; 9 – граниты, микрограниты, кератофиры; 10 – атакиты; 11 – наносы; 12 – линия сбросов

Месторождения образовано двумя пластообразными залежами — Западной и Восточной.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* парагенетически тесно связаны с траппами. Они широко распространены на Сибирской платформе, где образуют ряд железорудных районов: Ангаро-Катский, Ангаро-Илимский, Среднеангарский, Канско-Тасеевский, Тунгусский, Бахтинский и Илимпейский. Месторождения залегают в палеозойских отложениях платформенного чехла. Область их распространения контролируется развитием интрузивных траппов, ниже которых в разрезе залегают галогенные отложения. С ними связывают образование хлоридов железа, которые мигрировали в вышележащие комплексы пород. Пути интенсивной миграции этих растворов являлись тектонические разрывы, а также, возможно и трубки взрывов. В результате их воздействия происходили метасоматические изменения пород и оруденение. Рудные тела жиллообразной, линзообразной и часто неправильной формы. Наиболее богатые рудные зоны сложены как телами сплошных, так и брекчиево-вкрапленных и вкрапленных руд. Содержание железа в рудах варьирует от 25 до 60 %. Рудообразующий магнетит всегда содержит изоморфную примесь магнезия и относится к разновидности магнезиального магнетита.

Наиболее крупным и типичным представителем этой группы является *Коршуновское месторождение*. Оно находится в районе г. Железногорска Иркутской области вблизи железнодорожной магистрали Тайшет—Лена. Месторождение локализовано в отложениях платформенного чехла, представленных аргиллитами, известняками, мергелями, алевролитами и песчаниками кембро-ордовика (рис. 3). Места пересечения осадочных пород крутопадающими тектоническими нарушениями выполнены туфобрекчиями и обломками вмещающих пород, подвергшимися метасоматическим изменениям. Форма рудных тел — штоко-, линзо- и столбообразная. Основное рудное тело вытянуто с юго-запада на северо-восток на 2,5 км при ширине 0,4—0,6 км. На глубину рудное тело суживается и прослежено до 1100 м. Доминируют брекчиевые и вкрапленные руды, которые связаны постепенными взаимопереходами. Главный рудный минерал магнезиальный магнетит, содержащий до 6 % MgO. Второстепенный рудный минерал гематит. Разведанные запасы месторождения превышают 400 млн. т;

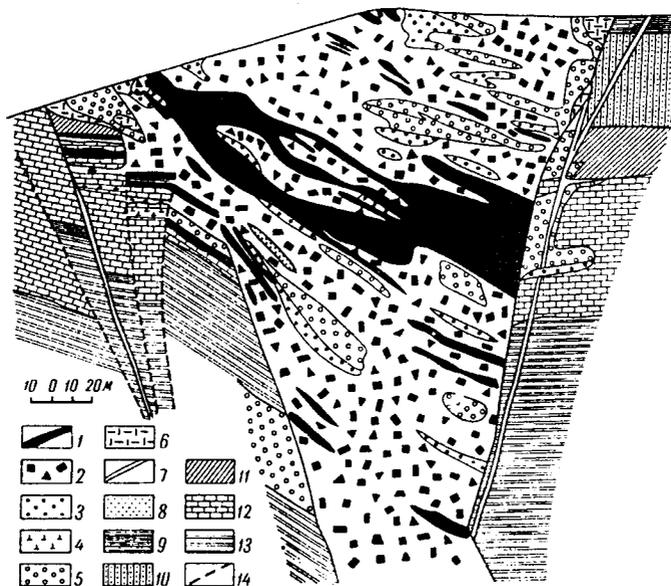


Рис. 3. Геологический разрез через центральную часть участка Рудная гора Второго Коршуновского месторождения (по Г. Брауну и др.): 1 – руды магнетитовые, массивные, метасоматические, почти сплошные; 2 – руды магнетитовые; вкрапленные и брекчиевидные; 3 – скары слабооруденелые; 4 – породы серпентин-талък-кальцитовые; 5 – породы кальцит-пироксен-гранатовые, пироксен-хлорит-гранатовые и кальцит-гранат-хлоритовые; 6 – туфогенные песчаники, брекчии и конгломераты; 7 – траппы; 8 – породы кежемской свиты; 9 – породы братской свиты; 10 – породы мамырской свиты; 11 – породы переходной зоны; 12 – породы устькутской свиты; 13 – породы верхоленской свиты; 14 – тектонические нарушения

среднее содержание Fe 34,4 %, S 0,02 % и P 0,2 %. Эксплуатация месторождения ведется Коршуновским ГОК.

*Вулканогенно-осадочные месторождения* встречаются относительно редко. К ним относится Западный Караджал в Казахстане, Терсинская группа в Кузнецком Алатау, в Алжире Гара Джебилет и Мишери Абделаиз, в Германии месторождения Лан и Дилль. Они пространственно связаны, как правило, с синклинальными зонами эвгеосинклинальных формаций. Рудные пласты обычно деформированы вместе с вмещающими их толщами. Руды сложены гематитом, магнетитом и сидеритом. В них встречаются сульфиды – пирит, халькопирит, арсенопирит, сфалерит,

галенит, а среди нерудных (жильных) минералов — серицит, хлорит, кварц, опал, халцедон, доломит, анкерит, апатит и др. Промышленное значение месторождений этой группы невелико.

Типичным представителем этой группы является *месторождение Западный Караджал*. Оно находится в Карагандинской области Казахстана примерно в 110 км к юго-западу от ст. Жана Арка. В разведке этого месторождения принимали участие выпускники 1957—1958 гг. геолого-географического факультета Белорусского государственного университета (В. П. Ерошин, Д. М. Ерошина). В районе месторождения развиты свита эффузивных и туфогенных пород нижнего—среднего девона (мощность до 1,5 км) и такой же мощности свиты осадочных пород верхнего девона — нижнего карбона. Породы, слагающие эти свиты, сильно дислоцированы, смяты в складки, разбиты разломами и прорваны дайками диоритов и диоритовых порфиров. До глубины 600 м породы залегают под углом 45—50°, формируя сложную по строению синклиналь. Рудная залежь образует пластообразное тело, прослеживающееся по простиранию на 6,5 км и по падению на 0,8 км. Мощность этого тела 20—40 м. В нижней части рудной залежи развиты гематитовые руды, в средней — преимущественно магнетитовые, а верхней — бедные гематитовые и марганцевые руды. Второстепенные минералы — сидерит, барит, пирит, галенит, сфалерит. Разведанные запасы месторождения превышают 300 млн. т руды, со средним содержанием Fe 55,6 %, SiO<sub>2</sub> 12,4 %, S 0,6 % и P 0,03 %.

*Месторождения кор выветривания*. Они чаще всего представлены: 1) латеритами и 2) железными шляпами. *Месторождения железистых латеритов* образуются при выветривании массивов основных и ультраосновных пород в условиях влажного тропического климата. В этих обстановках происходит разложение силикатов, содержащих двухвалентное железо с образованием лимонитовых руд обогащенных Ni, Co, Cr, и Mn, т. е. возникают природно-легированные руды. Крупнейшие месторождения, связанные с корой латеритного выветривания, находятся на Кубе. Латеритный покров мощностью от 5 до 30 м развит на площади 150 км<sup>2</sup> и прослеживается с перерывами на несколько десятков километров. Руды сложены землистым элювием, содержащим гидроксиды железа, гематит, остатки сер-

пентинита с примесью зерен хромшпинелидов, силикатов никеля. Руды содержат (%): Fe 40–50, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5–1,8 (до 4), Ni 0,7–0,8 (до 2,5), Mn 0,5–3, P сотые доли, S до 0,2, SiO<sub>2</sub> 18–30 и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10–12. Возраст месторождений третичный, общие запасы их 15 млрд. т. Наиболее крупными являются месторождения Моа и Майари.

*Месторождения железных шляп* образуются при окислении сульфидных или сидеритовых руд. Руды чаще всего сложены гидроксидами железа. Они имеют пористое, ячеистое, кавернозное или колломорфное строение. В рудах железных шляп сохраняются некоторые ценные элементы — Au, Ag, Pb, Ni и др.

*Осадочные месторождения.* Распространены весьма широко и имеют важное экономическое значение, занимая второе место среди других генетических типов железных руд. По условиям образования они разделяются на морские и континентальные.

*Осадочные морские месторождения* образуются в результате переноса железа речными подземными водами в виде тонких и грубых взвесей, коллоидных растворов и коагуляций их при встрече с солеными водами морских бассейнов. Рудоотложение часто происходит при трансгрессии моря, что способствует формированию руд с оолитовыми структурами. Среди них выделяются оксидные руды, состоящие из гидроксидов железа, силикатные руды, представленные главным образом железистыми хлоритами, и карбонатные — существенно сидеритовые руды. Морские осадочные месторождения встречаются среди отложений различного возраста — от протерозойских (Нижнеангарское месторождение) до третичных включительно (Керченский железорудный бассейн, месторождения в Нигере и Бенине и др.). В рудах морских осадочных месторождений содержание железа колеблется в пределах 20–50 %, чаще составляет 30–40 %.

Среди осадочных морских железорудных месторождений различают *геосинклинальные* и *платформенные*. Первые представлены сидеритовыми пластовыми месторождениями в морских терригенно-карбонатных отложениях (Бакальская группа месторождений Западного склона Южного Урала) и морскими гематитовыми месторождениями в терригенно-карбонатных отложениях (Нижнеангарское, Клинтон в США). Платформенные морские ме-

сторождения сложены сидерит-лептохлорит-гидрогематитовыми рудами (Аятский, Керченский, Западно-Сибирский, Лотарингский бассейны).

Характерным представителем осадочных морских бассейнов платформенного типа является *Керченский железорудный бассейн*. Бассейн был открыт еще в 1830-х годах. Руды стали осваиваться в 1955–1970-х годах. Он охватывает восточную и северную окраины Керченского полуострова и прослеживается на Таманский полуостров. Площадь его составляет 150 км<sup>2</sup>. Территория бассейна сложена верхнетретичными отложениями, смятыми в пологие складки с осями, вытянутыми в широтном и северо-восточном направлениях. Выделяются два типа месторождений осадочных железных руд. Первый тип приурочен к крупным тектоническим брахисинклинальным структурам – мульдам, второй – связан с ложнотектоническими структурами – компенсационными прогибами в зоне развития грязевого вулканизма.

Верхнетретичные отложения, слагающие мульды, включают ряд пластов глин, переслаивающихся с песками, а в нижней части с известняками. Рудный пласт подстилается известняками понтического яруса (нижний плиоцен). В центральных частях мульд он залегает горизонтально, а на крыльях наклонен под углом 10–15°. Мощность пласта колеблется от 2–3 м на крыльях до 25–30 м в осевых частях мульд. Рудный пласт сложен в основном оолитовыми рудами. Размер оолитов варьирует от долей миллиметра до 5–10 мм. Они сцементированы керченитом, вивианитом, баритом, псиломеланом, пирролюзитом, карбонатами железа и марганца. Главными типами руд являются «табачные» и «коричневые». Первые формировались в окислительно-восстановительной зоне, вторые за счет первых в окислительной зоне. Второстепенными являются марганцево-железистые «икряные» руды, отличающиеся от «коричневых» повышенным содержанием марганца. Наиболее высококачественные «коричневые» руды, главными минералами которых являются гидрогётит и ферримонтмориллонит, а второстепенными – псиломелан, пирролюзит, гипс, арагонит, кальцит, пирит, керченит, кварц, полевой шпат и глауконит. В «коричневых» рудах содержится (%): Fe 37,7; MnO 3; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1,20; P 1,0; S 0,06; As 0,13.

*Осадочные континентальные месторождения* представлены преимущественно бурожелезняковыми рудами озерного и болотного генезиса. Такие руды широко распространены на Восточно-Европейской платформе и известны в Тульской и Липецкой областях. Они характеризуются низким содержанием железа (до 30–40 %). Наиболее крупное месторождение этого типа — *Лисаковское* было открыто в 1960-х годах в Кустанайской области (Казахстан). Рудные залежи здесь вытянуты на десятки километров вдоль палеорусел рек. Содержание Fe в рудах 30–35 % и P около 0,5 %.

*Метаморфогенные месторождения* имеют исключительно важное экономическое значение. На их долю приходится основная масса мировых запасов и около 60 % мировой добычи железных руд. По запасам это, как правило, уникальные и крупные месторождения. Они известны на Канадском, Бразильском, Индийском, Южно-Африканском, Балтийском и Украинском щитах, а также на Китайской и Австралийской платформах, Курско-Воронежском массиве и в других провинциях, сложенными докембрийскими образованиями.

К этой серии относятся: 1) залежи железистых кварцитов и 2) богатых железных руд в древних метаморфических формациях. Железистые кварциты присущи только докембрийским складчатым областям. Они представляют собой сравнительно бедные руды с содержанием железа 20–40 % (чаще 32–37 %) и характеризуются крайне низкими концентрациями P и S. Все крупнейшие месторождения железистых кварцитов с запасами руды в миллиарды и десятки миллиардов тонн относятся к нижнепротерозойским эвгеосинклинальным образованиям, претерпевшим метаморфизм фации зеленых сланцев. Главными минералами железистых кварцитов этой формации являются кварц, магнетит, гематит, куммингтонит, биотит, хлорит, реже сидерит, пироксены и щелочные амфиболы. Более глубоко измененные месторождения амфиболитовой фации метаморфизма представлены менее крупными (сотни миллионов тонн) месторождениями.

С толщами железистых кварцитов связаны залежи богатых железных руд. Они представляют собой продукт природного обогащения железистых кварцитов, образующихся в результате выщелачивания кварца и разложения си-

ликатов при процессах древнего выветривания или метаморфизма. Существуют два основных морфологических типа залежей богатых руд — плащеобразные и линейные. Первые залегают на головах крутопадающих пластов железистых кварцитов, вторые — представляют собой уходящие на глубину, протяженные по простиранию и значительной мощности клинообразные рудные тела богатых железных руд среди железистых кварцитов. Минеральный состав богатых руд: мартит и мартитизированный магнетит, гематит, гётит, гидрогётит, глинистые минералы, вторичные карбонаты и пирит. Руды имеют высокое содержание Fe (54–69 %).

Крупнейшими железорудными бассейнами этого типа являются в СНГ: Курская магнитная аномалия (Лебединское, Михайловское, Коробковское, Салтыковское и др. месторождения), Криворожский железорудный бассейн, в дальнем зарубежье — железорудный пояс Лабродора (Канада), группа месторождений в районе озера Верхнего (США), в штате Минас Жерайс (Бразилия), в штатах Бихар и Орисса (Индия), бассейн Хамерсли (Западная Австралия) и т. д.

Типичный представитель этой группы — *Криворожский (Криворожско-Кременчугский) железорудный бассейн*. Расположен на правом берегу Днепра в пределах Украины. Продуктивной является криворожская серия железистых пород протерозойского возраста, простирающаяся в виде узкой полосы север-северо-восточного простирания на 100 км. Ширина ее в районе Кривого Рога достигают 5–6 км. Криворожская серия залегает трансгрессивно с резким угловым несогласием на породах архея. В разрезе ее выделяют три отдела: нижний — аркозово-филлитовый (подрудный); средний — рудоносный, представленный железистыми кварцитами и роговиками, и верхний — глинисто-сланцевый (надрудный). Геологическая структура бассейна очень сложная (рис. 4). Криворожская серия образует сложный синклинорий, состоящий из синклинальных и антиклинальных складок с падением крыльев под углами 45–80°. Шарниры синклиналей погружаются под углом до 40° в северном направлении. В бассейне выделяется ряд рудоносных структур (с юга на север): Ингулецкая (Южное рудное поле), Саксаганская (Главное, или Саксаган-

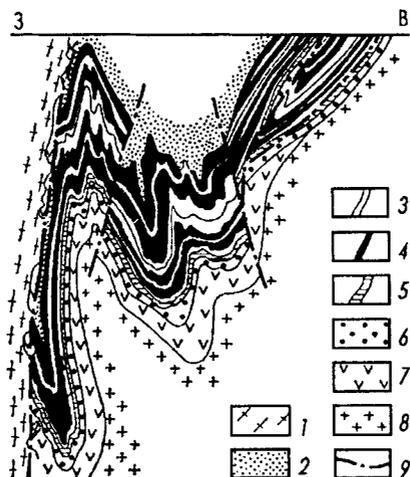


Рис. 4. Геологический разрез Криворожского железорудного бассейна в районе г. Кривого Рога (по Я. Белевцеву):

1 — микроклиновые граниты; 2 — кварциты верхней свиты; 3 — сланцы средней свиты; 4 — железистые кварциты средней свиты; 5 — тальк-карбонатный горизонт; 6 — кварциты нижней свиты; 7 — альбитофиры; 8 — плагиограниты; 9 — тектонические нарушения

ское рудное поле), Первомайская, Анновская, Желтореченская (Северное рудное поле), Попельнонастовская.

Среди железистых кварцитов различают магнетитовые, магнетит-гематитовые, гематитовые типы и оксидные их разновидности. Богатые руды, состоящие в основном из оксидов и гидроксидов железа, слагают пласто-, столбо-, штоко- и линзообразные залежи среди железистых кварцитов. Они характеризуются высоким содержанием железа (54–64 %) и низкими концентрациями вредных примесей (S 0,03–0,15 %, P 0,04–0,26 %). Запасы богатых руд составляют 1,5 млрд. т (среднее содержание Fe 57,6 %), железистых кварцитов — 18 млрд. т (среднее содержание Fe 35,9 %).

Во второй половине XX века важное экономическое значение приобрели открытые, разведанные и освоенные промышленностью месторождения железных руд Западной Австралии. Подавляющая часть этих ресурсов сосредоточена в бассейне Хамерсли (рис. 5). Площадь его около 150 тыс. км<sup>2</sup>. На архейских гранитоидных массивах несогласно залегают нижнепротерозойские породы, подразделяющиеся на три свиты. Средняя свита Хамерсли мощностью до 2,5 км



Рис. 5. Схематическая геологическая карта железорудной провинции Хамерсли (по Т. Трендаллу):

1 – мезо-кайнозойские отложения; протерозойские отложения группы; 2 – уайлу; 3 – хамерсли; 4 – фортескую; 5 – архейские отложения; 6 – гематитовые месторождения: I – Маунт-Том-Прайс, II – Парабурду, III – Уиттенум, IV – Маунт-Уэйлбэк, V – Род-Ридж; 7 – лимонитовые месторождения; VI – Маунт-Энид, VII – Дипдейл

сложена гематитовыми рудами и кварцитами, кремнистыми сланцами, доломитами, алевролитами, долеритами и дацитами. В центральной части бассейна породы залегают полого, у его краев смяты в складки и разбиты разломами. Типы руд: гематитовые массивные, гематитовые конгломераты и лимонитовые пизолитовые. Содержание железа в железистых кварцитах 25–40%, в богатых рудах 64–67%, фосфора и серы – сотые доли процента. В бассейне насчитывается около 100 месторождений. Общие запасы богатых руд составляют 32 млрд. т, запасы железистых кварцитов достигают сотен миллиардов тонн.

Месторождения и рудопроявления Беларуси. Железные руды выявлены в породах кристаллического фундамента и осадочном чехле (болотные руды, сидерит). В кристаллическом фундаменте известны 2 месторождения и 10 рудопроявлений. Наиболее крупным месторождением является *Околовское*, расположенное в Столбцовском районе Минской области. Железистые кварциты связаны со стратифицированными образованиями околовской серии (возраст около 2 млрд. лет). Они находятся в тесной парагенетической ассоциации с вмещающими плагиогнейсами и амфиболитами. Залегание железистой толщи осложнено тектоническими нарушениями субширотного, суб-

меридионального и северо-западного простирания. На месторождении выявлены три горизонта железистых кварцитов мощностью от 20–80 до 125–259 м, имеющих пластообразную форму, моноклинальное залегание с падением на юго-восток под углом 60–80° (рис. 6). В горизонтах выделяется до 5–6 рудных пластов. Развита два основных типа руд: силикатно-магнетитовые кварциты и магнетитовые амфиболиты. Главный рудный минерал – магнетит, изредка встречаются пирит, пирротин, халькопирит, ильменит, а в слабо развитой зоне окисления – мартит, гематит и лимонит. Среднее содержание железа в продуктивных пластах 27 %. Руды хорошо обогащаются. По данным предварительной разведки запасы железных руд по категориям  $C_1 + C_2$  до глубины 700 м составляют 300 млн. т.

*Новоселковское месторождение ильменит-магнетитовых руд* находится в Кореличском районе Гродненской области. Оно контролируется небольшой (1,5×0,5 км) интрузией габбро, испытавшей метаморфизм в условиях амфиболитовой фации. Месторождение разбито тектоническими нарушениями (типа сбросов) северо-западного простирания на три блока с амплитудой смещения около 100 м (рис. 7). При бортовом содержании  $Fe_{общ.}$  15 % в каждом из них выделяется от трех до пяти рудных тел пластообразной, линзообразной формы мощностью от 4 до 128 м, про-

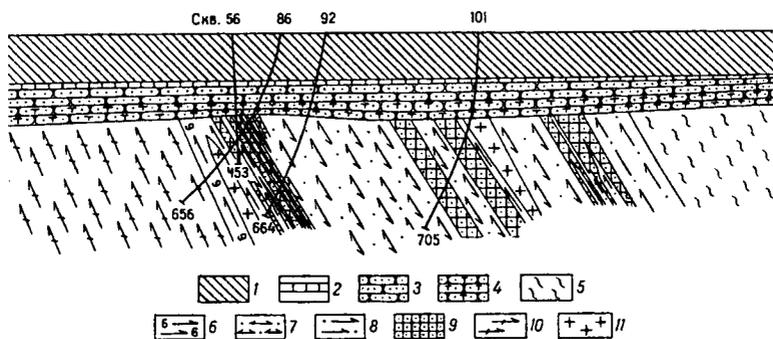


Рис. 6. Геологический разрез Околовского месторождения (по Г. Доминиковскому):

1 – четвертичные отложения; 2 – верхнемеловые отложения; 3–4 – верхний протерозой: 3 – гдовская свита (песчаники), 4 – ратайчицкая свита (туфопесчаники); 5–10 – нижний протерозой: 5 – яченская толща (гранат-биотитовые гнейсы с прослоями амфиболитов), 6–9 – шашковская толща: 6 – биотит-роговообманковые и пироксен-роговообманковые гнейсы, 7 – биотит-куммингтонитовые, куммингтонитовые, гранат-куммингтонитовые, антофиллитовые гнейсы, 8 – биотит-амфиболовые, гранат-амфиболовые гнейсы и амфиболиты, 9 – железистые кварциты; 10 – гуменовщинская серия (амфиболиты и гранатовые амфиболиты); 11 – граниты

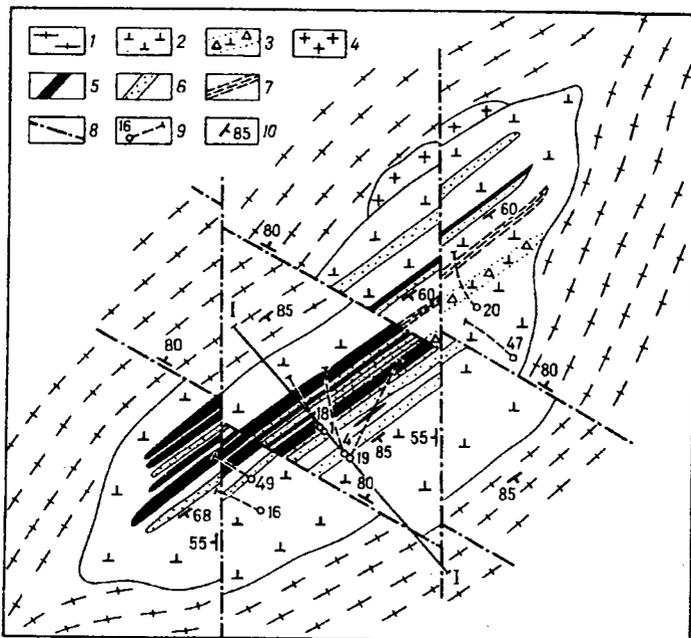


Рис. 7. Схематическая геологическая карта Новоселковского месторождения ильменит-магнетитовых руд (по Г. Доминиковскому):

1 – гнейсы амфибол-биотитовые и биотит-амфиболовые; 2 – габбро и габбро-нориты; 3 – микрогаббро; 4 – биотитовые граниты мелкозернистые; 5 – ильменит-магнетитовые руды сплошные; 6 – ильменит-магнетитовые руды вкрапленные; 7 – зона милонитизации; 8 – разрывные нарушения; 9 – скважина и ее номер; 10 – элементы залегания

тяженностью по простиранию от 110 до 411 м и по падению – от 110 до 640 м. Главными рудными минералами являются магнетит (до 60 %) и ильменит (до 30 %), второстепенными – пирит и пирротин. Среднее содержание основных компонентов в рудах колеблется в пределах (%):  $Fe_{\text{общ.}}$  23,5–35,7;  $TiO_2$  4,2–6,0;  $V_2O_5$  0,15–0,24;  $P_2O_5$  0,48–0,51; S 0,8–1,04.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРГАНЦА

### Краткие исторические сведения

Марганцевые руды были известны еще в глубокой древности, но долго не находили должного применения. Только в конце XVII в. их стали использовать в химической промышленности. Настоящий расцвет марганцеворудной промышленности наступил с развитием черной металлургии, особенно после открытия бессемеровского (1856 г.) и мартеновского (1865 г.) способов производства стали. В СНГ основные объемы разведанных запасов марганца сосредоточены в недрах Украины. Впервые марганцевые руды здесь были обнаружены в 1874 г. Г. О. Феодосьевым по р. Ингулец и в 1883 г. В. А. Домгером по р. Соленая (балка Фомина). Это ознаменовало собой открытие крупнейшего в мире Никопольского бассейна. Изучением геологии, минералогии, геохимии и генезиса марганцевых руд тесно связано с именами А. Г. Бетехтина, Н. М. Страхова, Е. Ф. Шнюкова, Н. А. Соколова, П. М. Каниболоцкого и многих других исследователей.

### Геохимия

Среднее содержание марганца в земной коре составляет 0,1 %, т. е. кларк его в 40 раз меньше кларка железа. Повышенные концентрации этого элемента (до 1,5 кларка) наблюдаются в основных и ультраосновных породах. Из осадочных пород больше всего обогащены марганцем глинистые сланцы. Содержание его в морской воде очень малое ( $4 \cdot 10^{-7}$  %). Марганец состоит из одного изотопа  $^{55}\text{Mn}$ . В периодической системе химических элементов марганец находится рядом с железом и поэтому многие геохимические особенности этих элементов сходны. Он обладает двумя устойчивыми валентностями: соединения  $\text{Mn}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  замещают друг друга в эндогенных процессах, а  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$

в экзогенных процессах. Эндогенные обособления марганца не имеют промышленного значения. Под воздействием угольной кислоты и воды марганецсодержащие минералы разлагаются с образованием растворимого и довольно устойчивого соединения  $Mn(HCO_3)_2$ . Он также переносится в виде коллоидных растворов, оксидных соединений, взвеси тончайшего обломочного материала.

## Минералогия

Общее число марганцевых минералов, встречающихся в природе, превышает 150. Однако широко распространенных и содержащих повышенное количество Mn минералов немного. *Пирролюзит*  $MnO_2$  (содержание Mn 55–63 %). Кристаллизуется в тетрагональной сингонии, габитус кристаллов призматический, игольчатый, изометрический, агрегаты зернистые, скрытокристаллические, волокнистые, радиальнолучистые, почковидные, конкреционные, сажистые и т. п., твердость 6–6,5, плотность 4,7–5,0 г/см<sup>3</sup>. *Манганит*  $Mn_2O_3 \cdot nH_2O$  (Mn 50–62 %). Кристаллизуется в моноклиальной сингонии, габитус кристаллов призматический, агрегаты тонкокристаллические, оолитовые, натечные, зернистые и друзы. Цвет темно-серый до черного. Черта красновато-коричневая до черной, твердость 4, плотность 4,3 г/см<sup>3</sup>. *Браунит*  $Mn_2O_3$  (Mn 60–69 %), *гаусманит*  $Mn_3O_4$  (Mn 65–72 %), *псиломелан*  $MnO \cdot MnO_2 \cdot nH_2O$  (Mn 40–60 %), *родохрозит*  $MnCO_3$  (Mn 40–45 %), *манганокальцит*  $(Ca, Mn) CO_3$  (Mn 7–25 %), *манганосидерит*  $(Mn, Fe) CO_3$  (Mn 23–32 %), *родонит*  $MnSiO_3$  (Mn 32–36 %), *вернадит*  $MnO_2 \cdot nH_2O$  (Mn 40–45 %).

## Применение в промышленности

В настоящее время основным потребителем марганца является металлургическая промышленность и только около 5 % его используется в химической и электротехнической промышленности. В цветной металлургии марганец применяется при получении разнообразных сортов марганецсодержащих бронз, латуней и других сплавов с цветными металлами, обуславливая разнообразие их механических и

антикоррозионных свойств. Марганец для раскисления, десульфуризации и легирования вводят в расплав главным образом в виде ферромарганца.

Для выплавки стандартных марок ферромарганца используются руды и концентраты с содержанием марганца более 40 % при количестве фосфора менее 0,2 % и  $\text{SiO}_2$  менее 9–15 %. Сырые марганцевые руды обычно подвергаются обогащению. Прежде всего, производится дробление и промывка их для освобождения руды от песчано-глинистых частиц. В дальнейшем они подвергаются обогащению гравитационным, магнитным и флотационным способами. Особо сложным является обогащение сажистых и землистых типов марганцевых руд. Оксидные и оксидно-карбонатные руды считаются кондиционными при содержании Mn в необогащенной руде не менее 17 %, выходе мытой руды не менее 25 % и минимальном содержании Mn в мытой руде 25 %. Кондиционные карбонатные руды должны иметь не менее 13 % Mn при условии содержания его в мытой руде 22 % и не более 20 %  $\text{SiO}_2$ .

## Ресурсы и запасы

Ресурсы марганцевых руд выявлены в 56 странах мира и составляют 21,27 млрд. т, в том числе в Африке — 14,33 млрд. т (67,4 % мировых ) и Европе — 3,44 млрд. т (16,2 %). Запасы марганцевых руд известны также в 56 странах. Подтвержденные запасы марганцевых руд составляют 5,4 млрд. т. До 90 % общемировых подтвержденных запасов марганца заключено в стратиформных месторождениях, около 8 % в корах выветривания и 2 % — в месторождениях гидротермального типа. Главными держателями запасов марганца являются 11 стран, владеющих примерно 95 % мировых подтвержденных запасов (5,1 млрд. т). Это Украина, ЮАР, Казахстан, Габон, Грузия, Австралия, Бразилия, Китай, Россия, Болгария, Индия (табл. 2).

К уникальным относятся месторождения с запасами марганцевых руд более 1 миллиарда тонн, к крупным — с запасами в сотни миллионов тонн, и мелким — с запасами в десятки миллионов тонн.

Таблица 2

## Запасы марганцевых руд (млн. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание марганца, %
Россия	152	148	2,7	20
ЕВРОПА	2560	2458	45,5	...
Болгария	180	126	2,3	27
Украина	2287	2284	42,3	25
АЗИЯ	1383	900	16,7	...
Грузия	238	214	4	20
Индия	135	105	1,9	43
Казахстан	554	405	7,5	20
Китай	270	150	2,8	23
АФРИКА	5139	1376	25,5	...
Габон	390	250	4,6	50
ЮАР	4500	1060	19,6	45
АМЕРИКА	889	326	6	...
Бразилия	298	187	3,5	41
АВСТРАЛИЯ	262	188	3,5	41

**Добыча и производство**

Производство товарных марганцевых руд в 1996 г. составило 21,8 млн. т. В семерку главных продуцентов марганцевого сырья входят страны, являющиеся основными держателями запасов: Китай (21,6 % мирового производства), ЮАР (15 %), Украина (14 %), Бразилия (10,1 %), Австралия (9,7 %), Габон (9,2 %), Индия (7,8 %). Китай, не смотря на низкое качество природных руд, с 1993 г. удерживает лидерство по выпуску товарной руды. В производстве марганцевых сплавов используется смесь руд, добытых в Китае, с высококачественным сырьем, ввозимым из Австралии, Габона и ЮАР. В ЮАР эксплуатируются рудники Маматван, Весселс и Нчванинг. Почти вся продукция (98 %) относится к рудам металлургического сорта (40–52 % Mn). На Украине в 1992–1998 гг. наблюдалось падение производства товарных марганцевых руд. Основные причины спада – энергетические трудности и потеря традиционных рынков сбыта в странах СНГ и Восточной Европы. Разрабатываются месторождения Никопольского

бассейна и месторождение Таврическое. Действует 12 рудников, три из которых подземные.

## Металлогения и эпохи рудообразования

В геосинклинальных условиях основная концентрация марганца происходила на ранней стадии, когда в прибрежных бассейнах накапливались осадочные руды. Средняя и поздняя стадии геосинклинального цикла для марганца не продуктивны. На платформенном этапе формировались марганцевые месторождения осадочной группы и выветривания.

Фациальные условия образования осадочных марганцевых руд напоминают обстановки отложения руд железа. В распределении марганцевых руд намечается зональность: первично-оксидные руды отлагаются в прибрежной зоне среди осадков песчано-алевритоглинистого состава; по мере удаления от берега оксидные руды постепенно сменяются карбонатными (родохрозит, манганокальцит, кальциевый родохрозит), ассоциирующими с глинами, кремнистыми глинами и опоками.

Метаморфизованные месторождения возникли в результате многоэтапного регионального метаморфизма. Как известно, они широко распространены в Индии. При низкой ступени метаморфизма оксиды и, возможно карбонаты марганца были превращены в брауниты, а кремнистые породы – в кварциты. При средних ступенях метаморфизма возникали силикаты марганца, частично происходила перекристаллизация браунита.

Марганцевые месторождения формировались в различные эпохи развития земной коры, от докембрийской вплоть до кайнозойской, а железо-марганцевые конкреции накапливаются на дне Мирового океана и в настоящее время. В *докембрийскую металлогеническую эпоху* сформировались мощные геосинклинальные образования, характеризующиеся в ряде случаев высокопродуктивными марганцевыми толщами (гондиты в Индии, марганецсодержащие железистые кварциты в Бразилии и т. д.). Значительные по запасам месторождения марганца докембрийского возраста известны в Гане (месторождение Нсута-Дагвин), а крупные в ЮАР (юго-восточная часть пустыни Кадаhari).

Для *раннепалеозойской эпохи* марганец мало характерен. Сравнительно небольшие промышленные месторождения марганца этого возраста известны в Китае, США и восточных районах России. В Китае наиболее крупным из них является месторождение Шаньвуту, расположенное в провинции Хунань. Марганцевые руды пластообразной формы согласно залегают среди известняков, песчаников и сланцев силурийского возраста. Мощность залежей около 1 м. Основные минералы псиломелан и пиролюзит. Наибольший интерес представляют участки вторично обогащенных руд, в которых среднее содержание марганца варьирует от 43,2 до 46,7% и кремнезема от 8,2 до 11,9%. В России месторождения марганца известны в Кузнецком Алатау, а также на Дальнем Востоке (Малый Хинган).

*Позднепалеозойская эпоха* для марганца имеет сравнительно небольшое практическое значение. Удельный вес месторождений марганцевых руд этого возраста в мировых запасах и добыче невелик. Небольшие по масштабам месторождения известны в Западной Европе, Северной Африке, Юго-Восточной Азии, а также в СНГ. Наиболее крупные по запасам месторождения разведаны в Центральном Казахстане — Джездинское и Ушкатын-III. На месторождении Ушкатын-III выявлено 14 марганцевых и 8 железорудных тел. Запасы подсчитаны в четырех рудных телах. Среднее содержание Mn 26,5 %. Основные рудные минералы в первичных рудах — гаусманит, браунит и гематит, во вторичных — псиломелан, пироморфит и манганит.

В *мезозойскую эпоху* сформировались рудопроявления марганца в связи с поздне меловым (Закавказье, Забайкалье) и юрским (береговые хребты Северной Америки, Новая Зеландия) вулканизмом. Месторождения марганца этого возраста имели также небольшое практическое значение. Ситуация резко изменилась в связи с открытием в конце 1960-х годов крупного месторождения Грут-Айленд в Австралии.

*Кайнозойская эпоха* отличается уникальным накоплением марганцевых руд на южной окраине Восточно-Европейской платформы (Никопольский бассейн, Чиатурское, Мангышлакское и другие месторождения). В эту эпоху сформировалось крупное месторождение Оброчиште в Болгарии, а также Моанда в Габоне. Рудоносными на всех этих месторождениях являются песчано-глинистые отложения,

в которых рудообразующие минералы присутствуют в форме конкреций, оолитов, стяжений и землистых скоплений. Сравнительно небольшие месторождения марганцевых руд третичного возраста образуют Уральский марганцеворудный бассейн, охватывающий восточный склон Уральского хребта. Он простирается в субмеридиональном направлении почти на 150 км. На этих месторождениях рудный горизонт приурочен к основанию третичной толщи и включает 1–2 пласта марганцевых руд мощностью 1–3 м.

### **Генетические типы промышленных месторождений**

Промышленные месторождения марганцевых руд представлены: 1) осадочными, 2) вулканогенно-осадочными, 3) выветривания и 4) метаморфогенными типами.

*Осадочные месторождения* имеют большое экономическое значение. В них сосредоточено около 80 % всех мировых запасов марганцевых руд. Наиболее крупные месторождения сформировались в прибрежно-морских и лагуновых олигоценых бассейнах, сосредоточенных в основном в пределах Паратетиса. Это Никопольский бассейн на Украине, Чиатурское месторождение в Грузии, Мангышлакское в Казахстане, Оброчиште в Болгарии и др.

Наиболее характерным представителем этого типа является *Никольский марганцеворудный бассейн*. Он включает *Никопольское* и *Большетокмакское* 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 5 км (рис. 8). Выдержанный рудный пласт средней мощностью 1,5–2,5 м залегает в основании терригенной олигоценовой толщи на глубине от 10 до 100 м. Он представляет собой песчано-глинистую пачку с включением марганцевых конкреций, линз и стяжений, прослоев рудного вещества. Соотношение рудной и нерудной составляющей изменчиво по вертикали и латерали. Количество марганцевых руд, заключенных в глинисто-алевролитовой массе достигает 50 % по массе, а среднее содержание марганца 15–25 %.

Марганцеворудные отложения залегают с размывом на подстилающих породах верхнего эоцена, представленных

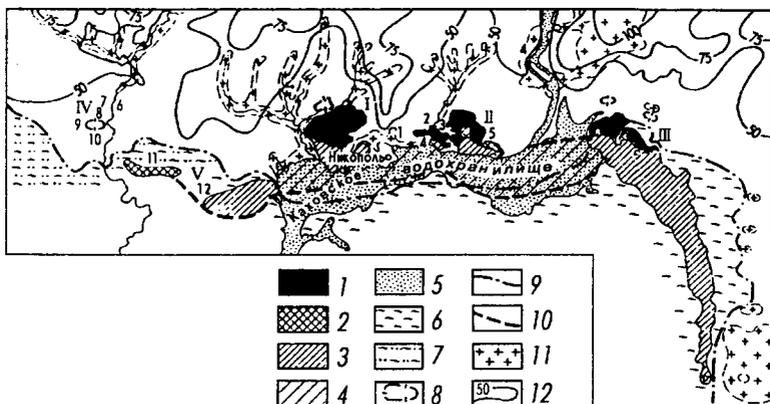


Рис. 8. Схема размещения марганцеворудных площадей в Никопольском бассейне (по В. Грязнову):

1–3 – марганцевые руды: 1 – оксиды; 2 – оксидные и карбонатные; 3 – карбонатные; 4 – площади на которых карбонатные руды уничтожены эрозией; 5 – пойма Днепра; 6 – глины олигоцена; 7 – песчаные глины олигоцена; 8 – «островки» олигоценовых отложений; 9 – границы олигоценовых отложений; 10 – предполагаемая южная граница карбонатных руд; 11 – выходы кристаллических пород; 12 – изогипсы поверхности докембрийских пород. Рудоносные площади: I – Западно-Никопольская, II – Восточно-Никопольская, III – Большетокмакская, IV – Криворожская, V – междуречье Днепр-Ингулец. Арабские цифры на схеме – рудные участки

алевритами, углистыми глинами и песками, или на кристаллических породах фундамента и их корах выветривания. Надрудные отложения – плиоценовые глины, известняки-ракушечники, мергели и четвертичные суглинки общей мощностью от 15 до 80 м.

В пределах этого бассейна выделяются оксидные, смешанные (оксидно-карбонатные) и карбонатные марганцевые руды. Среди разведанных запасов соотношение оксидных, смешанных и карбонатных руд равно 25:5:70. На собственно Никопольском месторождении сосредоточено 72 % общих запасов оксидных руд (пирролюзит, манганит, псиломелан, вернадит) Украины, а на Большетокмакском – доминируют карбонатные марганцевые руды (родохрозит, манганокальцит). Содержание марганца в карбонатных рудах составляет 10–30 % (среднее 21 %), CaO 3–13 %, SiO<sub>2</sub> 10–50 %. Руды труднообогатимые. В оксидных рудах среднее содержание Mn – 28,2 %, Fe – 2–3 %, P –

0,25 %,  $\text{SiO}_2$  — около 30 %. Они легко обогащаются простыми гравитационными способами. Смешанные руды содержат в среднем около 25 % Mn. Преобладают фосфористые руды. Малофосфористые разности, встречающиеся в зонах оксидных и смешанных руд в виде тел со сложными контурами, составляют около 4 % от общих запасов. Разработка отдельных участков в Никопольском бассейне осуществляется открытым и частично подземным способами.

*Железомарганцевые конкреции дна океанов.* Впервые они были обнаружены на дне Тихого океана экспедицией на судне «Челенджер» 120 лет назад. Мощность железомарганцевых корок на базальтах и туфобрекчиях изменяется от нескольких миллиметров до 10–15 см. Размеры конкреций от 1 мм до 1 м в диаметре, чаще всего встречаются конкреции 3–7 см в поперечнике. Морфологические типы конкреций — сферические, лепешковидные, эллипсоидальные, плитчатые, желвакообразные, гроздьевидные. Япония и США, не имеющие крупных месторождений марганца, осуществляют добычу железомарганцевых конкреций со дна Тихого и Атлантического океанов на глубинах до 5 км. В конкрециях содержится (%): Mn 25–30; Fe 10–12; Ni 1–2; Co 0,3–1,5 и Cu 1–1,5.

*Вулканоогенно-осадочные месторождения* приурочены к областям интенсивного проявления подводного вулканизма, характеризующимися накоплением лав и туфов с подчиненным количеством осадочных пород и руд. Для них характерна тесная связь с кремнистыми (яшмы, туфы), карбонатными (известняки, доломиты) и железистыми (магнетит-гематитовыми) породами и рудами. Руды формировались на ранней стадии геосинклинального этапа в эвгеосинклинальных условиях. Поступление Fe, Mn,  $\text{SiO}_2$ , Cu, Zn, Ba, Pb и других компонентов осуществлялось поствулканическими подводными эксгаляциями и гидротермами. Вулканоогенно-осадочные месторождения обычно характеризуются невысоким качеством руд и имеют небольшие масштабы. Рудные тела залегают в виде неправильных, быстро выклинивающихся пластов, линз, чечевиц. Они сложены преимущественно карбонатами марганца и железа. Месторождения этой группы отличаются браунит-гаусманитовым составом первичных руд и псиломелан-вернадитовыми рудами в корах выветривания. Мощность рудных тел обычно 1–10 м, содержание в них основных компонентов (%): Mn 40–55;  $\text{SiO}_2$  менее 10; P 0,03–0,06.

К этому типу принадлежат месторождения Атасуйского и Джездинского районов Центрального Казахстана, а в России месторождения Примагнитогорской группы, Ир-Нилийское в Приохотье, связанные со спилит-кератофиркременистой формацией, а также месторождения Салаирского кряжа, приуроченные к порфирово-кременистой формации.

*Месторождения кор выветривания.* В результате проявления процессов выветривания в зоне гипергенеза происходит интенсивное разложение марганцевых руд и марганецсодержащих пород с переходом двухвалентного марганца в четырехвалентную форму. Таким образом, формируются богатые скопления в виде марганцевых шляп. Месторождения данного генетического типа распространены в основном в Индии, Бразилии, Канаде, Венесуэле, Габоне, ЮАР, Австралии, а также России. При окислении родохрозита, манганокальцита, родонита и манганита образуются рыхлые богатые оксидные руды, состоящие из пиролюзита, псиломелана и вернадита.

В Индии промышленное значение имеют богатые залежи марганцевых руд, образовавшиеся в корях выветривания (марганцевых шляпах) гондитов и кодуритов протерозойского возраста. В рудах содержание основных компонентов составляет (%): Mn 30–50; SiO<sub>2</sub> до 12; Fe до 14, P до 0,2, иногда до 2. Они распространены на глубинах 10–70 м. Наиболее крупные месторождения выявлены в центральных и южных штатах Индии (Мадхья-Прадеш, Раджастан, Гуджарат, Орисса и др.).

В гипергенных рудах, образовавшихся по марганецсодержащим доломитам, концентрация Mn составляет 30–53 %, SiO<sub>2</sub> и Fe до 3 %, P до 0,1 %. Они, в отличие от руд, возникших по силикатным породам, характеризуются низким содержанием SiO<sub>2</sub> и Fe.

*Метаморфогенные месторождения* образуются главным образом при региональном, реже при контактовом метаморфизме осадочных руд и марганецсодержащих пород. В процессе интенсивного регионального метаморфизма первичные оксиды и карбонаты марганца в дальнейшем целиком переходят в силикаты марганца – родонит, бустамит, марганцовистые гранаты в тесном срастании друг с другом. Примерами месторождений подобного типа могут служить Карсакпайская и Атасуйская группы месторожде-

ний Казахстана, а также некоторые месторождения Индии и Бразилии. Среди метаморфогенных месторождений по степени метаморфизма различают две формации: *браунит-гаусманитовую* и *марганец-силикатную*.

*Месторождения браунит-гаусманитовой формации* образуются в результате относительно слабого прогрессивного метаморфизма первичных руд, сложенных гидроксидами и оксидами марганца. К этой группе относятся многочисленные месторождения Индии, приуроченные к отложениям нижнего и среднего палеозоя. Это пласты и линзы оксидных марганцевых руд, залегающих согласно со слабо метаморфизованными вмещающими породами. Нередко рудные залежи вместе с вмещающими породами дислоцированы. Протяженность рудных тел от нескольких десятков и сотен метров до 2–3 км, мощность их от 1 до 15 м и более. Главные рудные минералы: браунит, голландит, реже биксбит и манганит. Наиболее важное значение имеют месторождения Панч-Махал, Барода, Уква, Кеопджари и Сингбхуме.

*Месторождения марганец-силикатной формации* распространены в Индии и Бразилии. В Индии они связаны исключительно с образованиями архея — гондитами и кодуритами. Гондиты сложены спессартином, кварцем и родонитом, кондуриты состоят из калиевого полевого шпата, марганецсодержащего граната и апатита. Протяженность рудных тел 3–8 км и более, мощность от 3 до 60 м. Содержание марганца в них варьирует от 10 до 21 %, а в зоне выветривания (марганцевых шляпах) увеличивается до 30–50 %. Наиболее крупные месторождения находятся в штатах Андхра-Прадеш (месторождения Кудур, Тарбхар), Мадхья-Прадеш (Рамрара, Стапатар) и Махараштра (Бузург, Донгри и др.). Гондиты и кодуриты в настоящее время не обрабатываются.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРОМА

### Краткие исторические сведения

Хром был открыт в 1797 г. французским химиком Л. Вокеленом в минерале крокоите —  $Pb(CrO_4)$ . В России руды хрома впервые выявлены на Урале в 1799 г. В начале XIX в. они использовались только в качестве огнеупорного материала для футеровки металлургических печей, получения красок и дубителей кож.

### Геохимия

Кларк хрома в земной коре  $8,3 \cdot 10^{-3} \%$ . Среднее содержание его в различных изверженных породах колеблется от 0,2 % в ультраосновных (перидотитах) до 0,02 % в основных (базальтах), составляя в гранитах тысячные доли процента. Хром является типичным литофильным элементом.

Хром вместе с железом, титаном, никелем, ванадием и марганцем входит в одно геохимическое семейство. В природе известны четыре изотопа:  $^{50}Cr$ ,  $^{52}Cr$ ,  $^{53}Cr$  и  $^{54}Cr$ , из которых наиболее распространен  $^{52}Cr$ . Хром обладает двумя валентностями —  $Cr^{3+}$  и  $Cr^{6+}$ . Соединения трехвалентного хрома наиболее устойчивы и широко распространены. Трехвалентный атом хрома, с одной стороны, образует оксиды, а с другой — в связи со сходством его ионов с ионами Al, Mg,  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , формирует комплексные соединения этих металлов, обособляющиеся на высокотемпературной магматической ступени эндогенного процесса при дифференциации базальтовой магмы. В экзогенных условиях хром, как и железо, мигрирует в виде взвесей. Наиболее подвижной формой в природе являются хроматы.

## Минералогия

Известно около 25 минералов, содержащих хром. Промышленными являются хромшпинелиды («хромиты»), имеющие общую формулу  $(\text{Mg,Fe})\text{O} \cdot (\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_3$ . Состав хромитов изменчив (%):  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  18–65;  $\text{MgO}$  до 16;  $\text{FeO}$  до 18;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 30;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 33. Присутствуют также оксиды Ti, Mn, V, Ni, Co и др. Основное промышленное значение имеют *магнохромит*  $(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$  (содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  50–65 %), *хромпикотит*  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$  ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  35–55 %) и *алюмохромит*  $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$  ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  35–50 %). Кроме того, хром входит в состав ряда других минералов – хромовой слюды (фуксита), хромвезувиана, хромдиопсида, хромового граната (уваровита), хромтурмалина, хромового хлорита и др. Эти минералы часто сопровождают руды, но не имеют самостоятельного промышленного значения.

## Применение в промышленности

Главное применение хромиты находят в металлургии (65 % мировой добычи), огнеупорной (18 %) и химической (17 %) промышленности. Добавка феррохрома (65–70 % Cr, 5–7 % C, остальное Fe) или чарж-хрома (54 % Cr, 6–7 % C, остальное Fe) к сталям повышает их вязкость, твердость и антикоррозионные свойства.

Требования различных отраслей промышленности к качеству руд различны. Самые строгие требования предъявляет металлургическая промышленность, для которой пригодны лишь руды с содержанием не менее 37–40 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при соотношении  $\text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{FeO} > 2,5$ . Наиболее ценными являются магнохромитовые руды (отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{FeO} = 3-4$  и более), в то время как даже массивные и богатые хромпикотитовые и особенно алюмохромитовые руды являются менее ценными в связи с повышенным содержанием в них железа ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{FeO} = 1,8-2$ ). Огнеупорная и химическая промышленность используют более низкокачественные руды (содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 32–35%), в которых отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{FeO}$  может быть ниже 2.

## Ресурсы и запасы

Ресурсы хромитовых руд выявлены в 36 странах и составляют 15,5 млрд. т. Основная часть их сосредоточена в ЮАР (78 %). Доля ресурсов России составляет 2 %.

Подтвержденные запасы хромитовых руд разведаны в 29 странах и составляют 3,9 млрд. т. Они распределяются следующим образом: ЮАР 80,5 %, Казахстан 8,3 %, Зимбабве 3,4 %, Россия 0,13 %. В мире разведано около 300 месторождений хромитовых руд. На стратиформные месторождения приходится 87,5 % подтвержденных запасов. Большая часть их приурочена к глубоким горизонтам месторождений. Запасы хромитов преимущественно для подземной добычи разведаны на месторождениях ЮАР, Зимбабве, Турции, России и Казахстана, а для открытой добычи — на месторождениях Финляндии, Бразилии, Индии, Ирака, Пакистана, Филиппин, США и других стран.

К уникальным относятся месторождения хромитовых руд с запасами в сотни миллионов тонн, к крупным — десятки миллионов тонн, к мелким — единицы миллионов тонн.

## Добыча и производство

В настоящее время почти 90 % производства товарной хромитовой руды сосредоточено в шести странах: ЮАР — 44,8 %, Индии — 12,2 %, Казахстане — 9,8 %, Турции — 9,4 %, Зимбабве — 6,2 %, Финляндии — 5,2 %. Доля России составляет около 1 %. Общемировое производство товарной хромитовой руды составляет около 11,2 млн. т. Преимущественно подземным способом добыча хромитов осуществляется в ЮАР, Зимбабве, Турции, Албании, России и Казахстане. К крупнейшим горно-обогатительным предприятиям мощностью до 1 млн. т и более относятся: Донской ГОК Казахстана, рудный комплекс Кампо-Формозу в штате Баия Бразилии, ГОК Кеми в Финляндии и рудники ЮАР — Винтервельд Крундал и Вондеркоп в Западном хромитовом поясе (район г. Рюстенбург).

## Металлогения и эпохи рудообразования

В общем цикле геологического развития месторождения хромитов возникали на стадии геосинклинального этапа, а также на стадии активизации платформ. На ранней стадии геосинклинального этапа образовались магматические месторождения, среди которых наиболее характерны позднемагматические, связанные с массивами гипербазитов (дуниты, гарцбургиты). На стадии активизации платформ формировались массивы расслоенных пород габбро-норитовой формации, для которых типичны раннемагматические хромитовые месторождения.

Хромитоносные ультраосновные породы образуют несколько поясов: 1) субмеридиональный пояс герцинских и каледонских интрузий перидотитов и дунитов на Урале; 2) Средиземноморский пояс меловых и третичный интрузий гипербазитов, протягивающийся от Балкан через Турцию и далее в Индию; 3) пояс основных и ультраосновных пород, параллельный Восточно-Африканской рифтовой системе, прослеживающийся на территории ЮАР (Бушвельдский массив) и Зимбабве (Великая Дайка).

Хромитовые месторождения возникли в различные геологические эпохи, от раннего докембрия до третичного периода. *Докембрийская эпоха* — выдающаяся для образования месторождений хромитовых руд. По данным Н. А. Быхова в эту эпоху сформировалось более 90 % общих запасов хромитов. Наиболее крупные месторождения сосредоточены на территории ЮАР, в основном в Трансваале. Здесь выделяются два хромитоносных пояса — Лиденбургский и Рюстенбургский. Многочисленные месторождения имеются в Зимбабве, где они приурочены к Великой Дайке. Менее крупные месторождения выявлены в Сьерра-Леоне, Малагасийской Республике, США, Бразилии, Финляндии.

*Раннепалеозойская эпоха* была мало продуктивной для образования хромитовых руд. Промышленные месторождения этого возраста неизвестны. Небольшие месторождения, генетически связанные с раннекаледонскими ультраосновными интрузиями, выявлены в районе Тронхейма в Норвегии. Руды содержат в среднем 25–35 % оксида хрома.

*Позднепалеозойская эпоха* — вторая по значимости после докембрийской. В России месторождения хромитов этого

возраста составляют основу сырьевой базы и играют решающую роль в запасах и добыче данного полезного ископаемого. Особый интерес представляют многочисленные месторождения хромитов, связанных с Кемпирсайским ультраосновным массивом Урала. В странах дальнего зарубежья проявления хромитоносности этого возраста встречаются редко и обычно в виде мелких скоплений, мало интересных в практическом отношении. Небольшие месторождения хромитов широко распространены на востоке Австралии, где они связаны с раннегерцинскими гипербазитами.

В *мезозойскую эпоху* промышленные месторождения хромитов сформировались в отдельных странах Америки и Южной Европы. На Кубе они располагаются в поясе позднемерловых серпентинизированных ультраосновных пород, представленных дунитами, пироксенитами и анортозитами. Залежи хромитов штокообразной, линзообразной и жильной формы приурочены преимущественно к дунитам. Химический состав руд изменяется в широких пределах: содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  22–57 %, Fe 9,7–14,4 %. Преобладают низкосортные руды. Многочисленные относительно небольшие месторождения известны в США в штатах Калифорния и Орегон.

В пределах Южной Европы месторождения хромитов выявлены в Греции, Албании, Болгарии и Македонии. В Греции залежи хромитов обычно располагаются в серпентинитах вблизи их контакта с известняками. Преобладают огнеупорные руды, в которых содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляет 37–42 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  12 % и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  19–25 %.

В *кайнозойскую эпоху* промышленные залежи хромитов сформировались только в Азии и Океании. Многочисленные месторождения известны в ряде районов Средиземноморья. В Турции наиболее крупными по запасам и добыче являются месторождения группы Гулеман. Здесь хромитовые руды приурочены к серпентинизированному лополиту. Доминируют массивные руды с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  50–52 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  10–12 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  13–14 % и  $\text{SiO}_2$  2–3 %. Одно из ведущих мест в мире по добыче огнеупорных хромитов принадлежит Филиппинам. Многочисленные месторождения известны почти на всех островах, но наиболее крупные находятся на о. Лусон.

## Генетические типы промышленных месторождений

Промышленные месторождения хрома представлены двумя главными типами: 1) собственно магматическими и 2) россыпями. *Собственно магматические месторождения* подразделяются на раннемагматические и позднемагматические (гистеромагматические).

*Раннемагматические месторождения* хрома связаны с базальтоидами или гарцбургит-ортопироксенит-норитовой формацией. Они представлены выдержанными по мощности пластообразными залежами у основания стратифицированных интрузивных массивов. Размеры последних колеблются от нескольких десятков до нескольких тысяч квадратных километров. Оруденение характеризуется правильной расслоенностью с постепенными переходами от перидотитов внизу массивов до габброидов и гранитоидов вверху их. Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в рудах сравнительно высокое — 38–50%. Раннемагматические месторождения широко развиты в ЮАР (Бушвельдский массив) и Зимбабве (Великая Дайка).

*Бушвельдский массив* основных и ультраосновных пород имеет форму лополита, вытянутого с востока на запад на 460 км при ширине 250 км (рис. 9). Он внедрился в толщу кварцитов и эффузивов протерозоя (трансваальская система) в протерозойское время. Особенностью внутреннего строения массива является его расслоенность (стратификация). Некоторые горизонты основных и ультраосновных пород даже относительно небольшой мощности (от нескольких сантиметров до первых единиц метров) прослеживаются по простиранию до 100–200 км. В массиве снизу вверх разреза намечается следующая последовательность пород: 1) нориты мощностью 350 м (зона Закалки); 2) нориты, перемежающиеся с перидотитами, мощностью 1500 м (Базальная зона); 3) нориты с прослоями пироксенитов и анортозитов мощностью около 1000 м (Критическая зона); 4) габбро-нориты мощностью 3500 м (Главная зона); 5) габбро-диориты мощностью 2000 м (Верхняя зона).

Хромитовое оруденение приурочено к нижней части Критической зоны. В Трансваале крупные месторождения

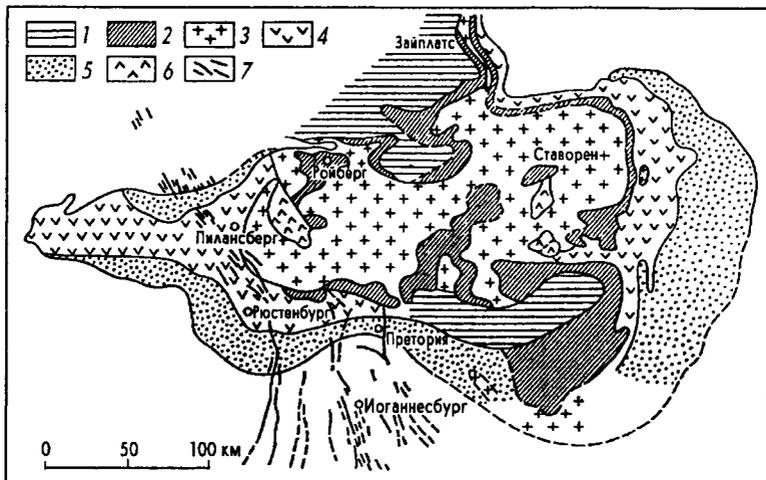
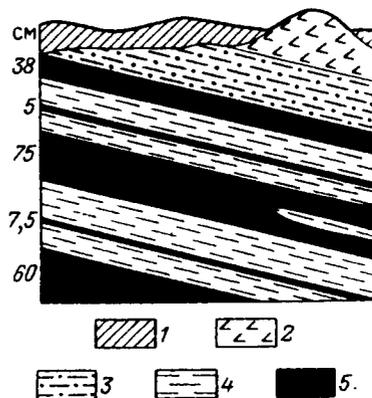


Рис. 9. Геологический план Бушвельдского лополита. Покров системы карру снят (по А. Дю Тойту):

1 – песчаники и глинистые сланцы нижнего палеозоя; 2 – кварциты и фельзиты нижнего палеозоя; 3 – граниты; 4 – нориты докембрия; 5 – диабазы; 6 – сиениты и щелочные сиениты; 7 – дайки щелочных пород

сосредоточены в двух рудных поясах: Рюстенбургском на западе и Лиденбургском на востоке. Протяженность этих поясов соответственно 160 и 112 км. В пределах них выявлено до 25 пологопадающих хромитовых пластов мощностью от 0,2–0,3 до 1,0 м, изредка до 4,0 м. Вмещающие породы обычно обладают полосчатой структурой, и согласно с их полосчатостью располагаются параллельные залежи хромитов самых разных размеров (рис. 10). Развиты залежи вкрапленных и массивных руд. Встречаются хромиты с нодулярной текстурой. Пласты хромитовых руд объединяются в три группы: 1) верхнюю (до глубины 30 м), 2) среднюю (30–75 м) и 3) нижнюю (до 120 м). Хромиты нижней группы пластов содержат 42–50 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , а средней и верхней групп – 32–46 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Подтвержденные запасы хромитовых руд Бушвельдского комплекса составляют 3100 млн. т со средним содержанием триоксида хрома 40 %. В 1995–1998 гг. проведена переоценка подтвержденных запасов хромитовых руд в связи с технологическими достижениями, которые позволили компании «*Chrome Resources (Pty.) Ltd.*» начать использовать низко-

Рис. 10. Верхний хромитовый горизонт в Бушвельдском комплексе. Выработки Притчарда, Круендаль, Трансвааль (по А. Дю Тойту):  
 1 — наносы; 2 — анортозит; 3 — диаллаговое габбро; 4 — бронзитито-диаллаговая порода; 5 — хромит



сортные хромиты пласта *UG 2*, ранее разрабатывавшиеся только на металлы платиновой группы. В Лиденбургском поясе компания «*Concolidated Metallurgical Industries Ltd*». в конце 1995 г. начала добычу руды открытым способом на месторождении Танклиф.

*Позднемагматические месторождения* образовывались в конце собственно магматического процесса и характеризуются приуроченностью к гипербазитам. Рудные тела имеют форму жило- и линзообразных тел с резкими границами и причудливыми очертаниями. Иногда они пересекаются дайками габбро и дунитов. Руды, как правило, массивные. В их составе присутствуют хромгранат, хромхлорит и хромтурмалин. Процесс формирования этих месторождений сопровождался тектоническими деформациями, в результате чего происходило отжатие хромсодержащих расплавов в тектонические трещины, смятие пород и руд. Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  варьирует от 15 до 65 %, чаще составляет 50–55 %, отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{FeO}$  — от 2 до 4.

Месторождения данного подтипа выявлены в России, Армении, Турции, Иране, Индии, Албании, Судане и на Кубе. В России наиболее крупные месторождения сосредоточены в юго-восточной части Кемпирсайского массива на Южном Урале.

*Кемпирсайский массив* расположен в пределах Уралтауского мегантиклинория. Он вытянут в субмеридиональном направлении на 80 км при ширине 10–20 км (рис. 11). В юго-восточной части массив представляет собой лакколлит,

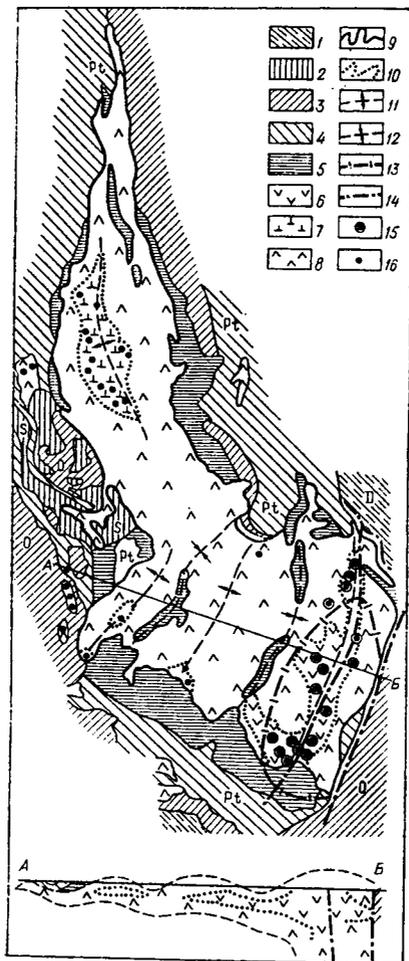


Рис. 11. Схема геологического строения хромитоносного Кемпирсайского массива (по Н. Павлову и И. Григорьевой):

1-4 – вмещающие кремнистые и карбонатные породы: 1 – девонские, 2 – силурийские, 3 – ордовикские, 4 – протерозойские; 5 – габбро-амфиболиты; 6 – серпентинизированные перидотиты и дуниты; 7 – серпентинизированный дунит-перидотитовый шширово-полосчатый комплекс; 8 – серпентинизированные перидотиты; 9 – контур массива ультраосновных пород; 10 – границы комплексов ультраосновных пород; 11 – оси сводовых поднятий; 12 – оси межсводовых опусканий; 13 – контур проекции подводящего канала; 14 – тектонические нарушения; 15 – месторождения высокохромистых руд; 16 – месторождения низкохромистых руд

расширяющийся к югу, где геофизическими работами установлен подводный канал размером  $3-5 \times 10-13$  км. Возраст его, определенный по флогопиту из контактово-минерализованных пород, составляет 380–400 млн. лет.

Массив сложен преимущественно перидотитами (гарцбургитами) и только в юго-восточной части обнажаются дуниты. Известно более 160 хромитовых месторождений и рудопроявлений. Они залегают на разных глубинах от поверхности и тяготеют к сводовым поднятиям интрузива. Выделяют 4 рудных поля, из которых наиболее важным является Главное (Южно-Кемпирсайское). Здесь расположены наиболее крупные промышленные месторождения: Алмаз-Жемчужина, Молодежное, Миллионное, Гигант, Комсомольское, Геофизическое, Спорное и др. Число рудных тел на каждом из этих месторождений варьирует от одного (месторождение Молодежное) до 99 (Миллионное). Протяженность их также колеблется от нескольких десятков метров до 1500 м, а мощность от 1–3 до 180 м.

Хромитовые руды массивные и вкрапленные, реже нодулярные. Контакты их с вмещающими ультраосновными породами, как правило, резкие, нормальные, реже тектонические. Крупные и мощные рудные тела характеризуются грубой полосчатостью, обусловленной чередованием относительно редковкрапленных и густовкрапленных руд. Содержание  $Cr_2O_3$  варьирует от 28–35 % в редковкрапленных до 58–59 % в сплошных хромитовых рудах и в среднем составляет 49,0 %. Первичные руды состоят в основном из оливина и магнохромита. Состав измененных руд более сложный: отмечаются хромактинолит, уваровит, серпентин (лизардит, хризотил), хромовые хлориты, брусит, магнетит, гематит, пирротин, пирит, марказит и др.

*Россыпные месторождения* не играют существенной роли в мировых запасах (5 %) и добыче (1 %) хромитового сырья. Они образуются вследствие выветривания коренных магматических месторождений. К ним относятся элювиально-делювиальные, а также прибрежно-морские россыпи.

*Элювиально-делювиальные образования* (месторождения типа кор латеритного выветривания) представлены рассеянными кристаллами и обломками хромита среди рыхлой лимонитовой массы. Руды легко обогащаются в процессе промывки. Подобные месторождения известны в России (Сарановское на Урале), на Кубе (Камагуэй), в Новой Ка-

ледонии. Наиболее крупные делювиальные россыпи хромита приурочены к Великой Дайке (Зимбабве), где сосредоточены в поперечных долинах.

*Прибрежно-морские россыпи* известны на Тихоокеанском побережье США (штат Орегон), на Адриатическом побережье Албании и т. д. В штате Орегон хромит присутствует в составе так называемых «черных» песков современного пляжа, а также в углублениях морских террас. Протяженность рудных тел 1,5 км, ширина 0,3–0,4 км, мощность 0,3–12 м. Содержание хромита 16–53 %. Источник «черных» песков — серпентинизированные ультраосновные породы Берегового хребта.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИТАНА

### Краткие исторические сведения

Титан был открыт английским химиком У. Грегори в 1791 г. в ильмените, а затем в 1795 г. немецким ученым М. Клапротом в рутиле (тогда титан получил свое название). В 1910 г. был получен чистый металл в процессе восстановления  $TiCl_4$  натрием. Применение металлического титана и его сплавов стало возможным с 1938 г., когда Кролем для получения титана был разработан технологический способ восстановления  $TiCl_4$  магнием и создана аппаратура для его промышленного производства.

Чистый титан — это яркий серовато-серебристый металл, имеющий прочность легированной стали, но вдвое легче ее. В отличие от стали вязок, пластичен, поэтому хорошо поддается механической обработке (прокату, ковке, резанию). Устойчив против коррозии, термостоек (температура плавления 1668 °С, температура кипения — 3260 °С).

### Геохимия

Кларк титана в земной коре 0,45 %. Повышенные концентрации его отмечаются в основных (0,9 %) и средних (0,8 %) интрузивных породах. Известно пять изотопов титана:  $^{46}Ti$ — $^{50}Ti$ , из которых наиболее распространен  $^{48}Ti$ . В природных условиях титан четырехвалентен и встречается только в кислородных соединениях. Относясь к «семейству железа» титан в то же время характеризуется отчетливыми литофильными свойствами. Он проявляет тенденцию к рассеиванию в магнезиально-железистых силикатах, концентрируясь в габбро, горнблендитах и пироксенитах, а также в некоторых щелочных породах. В зоне гипергенеза минералы титана устойчивы и могут образовывать россы-

пи. В условиях выветривания и осаждения он имеет геохимическое сродство с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и концентрируется в бокситах кор выветривания, а также в морских глинистых осадках.

## Минералогия

В настоящее время известно около 70 титановых минералов. Еще большее число минералов содержат титан в качестве примеси. Промышленное извлечение титана производят в основном из ильменита и рутила. *Ильменит*  $\text{FeTiO}_3$  (содержание Ti 31,6 %). Обычно в нем наблюдается примесь Mg и Mn, кристаллизуется в тригональной сингонии, характерны таблитчатые кристаллы. Цвет минерала черный, блеск полуметаллический, твердость 5–6, плотность 4,7 г/см<sup>3</sup>. *Рутил*  $\text{TiO}_2$  (Ti 60 %), содержит примесь Fe, Ta, Nb, Sn и др. Кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы призматические, столбчатые, игольчатые. Цвет желтый, красный, черный, черта светло-бурая, блеск алмазный и металлоидный, твердость 6, плотность 4,3 г/см<sup>3</sup>. При комплексной переработке руд его извлекают из других титансодержащих минералов: титаномагнетита –  $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeTiO}_3$ , перовскита –  $\text{CaTiO}_3$ , лопарита –  $(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ti})\text{O}_3$ . В небольших количествах титан получают также из лейкоксена и сфена.

## Применение в промышленности

Титан в настоящее время находит применение во многих отраслях промышленности. Сплавы его с небольшими добавками алюминия, хрома, марганца и других металлов имеют высокую прочность, жаропрочность, малую плотность. Они являются важнейшими конструкционными материалами для деталей ответственного назначения, используемых в «тяжелых условиях» – при высоких или очень низких температурах, в морской воде и во влажном морском воздухе.

Титан и его сплавы применяются для изготовления многих деталей самолетов, морских судов, а также в химической промышленности. Особой прочностью характеризуются титан-ванадиевые сплавы, которые используются

в ракетостроении и космической технике, например, для изготовления баллонов высокого давления, топливных систем ракет «Аполлон», «Сатурн», корпусов двигателей космических кораблей и др. Сплавы титана находят применение при изготовлении быстрорезов (скоростное резание металлов), титановых белил и эмалей, для производства дымообразователей, получения гипохлорита натрия  $\text{NaClO}$  (используется для обезвреживания цианосодержащих сточных вод).

Кондиционными на титан являются россыпные месторождения с содержанием не менее 20 кг/т в пересчете на «условный ильменит», а для коренных месторождений — руды, дающие при механическом обогащении выход ильменитового концентрата не менее 10 % или рутилового не менее 1,5 % от массы исходной руды.

## Ресурсы и запасы

Ресурсы титана выявлены в 48 странах мира и оцениваются в 1,2 млрд. т (в пересчете диоксид титана —  $\text{TiO}_2$ ), в том числе в ильмените — около 1 млрд. т, остальные — главным образом в рутиле и анатазе. Большая часть ресурсов титана сосредоточена в недрах Австралии, Индии, Канады, Китая, Норвегии, США, Республики Корея, Украины и ЮАР.

По общим запасам титана полной статистической информации нет. По данным ГНПП «Аэрогеология» *Министерства природных ресурсов РФ* мировые (без России) подтвержденные запасы на начало 1997 г. составили около 735 млн. т. Они распределяются следующим образом: Азия — 422,3 млн. т (57,4 %), Америка — 142,5 млн. т (19,4 %), Африка — 72,1 млн. т (9,8 %), Европа — 60,8 млн. т (8,3 %), Австралия и Океания — 37,3 млн. т (5,1 %).

Запасы коренных (магматических) месторождений составляют около 69 % мировых (без России), месторождения кор выветривания — 11,5 %, россыпных месторождений — 19,5 %. На долю запасов в ильмените приходится более 82 %, в рутиле — 6 % и в анатазе — менее 12 %. Ильменит-магнетитовые и ильменит-гематитовые руды коренных месторождений составляют основу минерально-сырьевой базы титановой промышленности Канады, Ки-

тая и Норвегии. Месторождения коры выветривания карбонатитов разрабатываются пока только в Бразилии. В остальных странах основные запасы титановых минералов сосредоточены в россыпях, а также комплексных месторождениях.

В настоящее время в мире выявлено более 300 месторождений титановых минералов, в том числе 70 — магматических, 10 — латеритных и более 230 россыпных. Из них разведано по промышленным категориям 90 месторождений, преимущественно россыпных.

По запасам диоксида титана промышленные месторождения подразделяются на следующие группы: 1) очень крупные (уникальные) с запасами превышающими 10 млн. т; 2) крупные — 1–10 млн. т; 3) средние — от 100 тыс. т до 1 млн. т; 4) мелкие — от 50 до 100 тыс. т.

## **Добыча и производство**

В 1995–2000 гг. добыча титановых руд и титансодержащих песков осуществлялась в 12 странах. Действовало 23 карьера и несколько рудников. Коренные месторождения разрабатывались в Норвегии (Теллнес) и Канаде (Аллард-Лейк), в Китае — коренное месторождение (Панчжихуа) и россыпные, в Бразилии — латеритное (Каталан-1) и россыпные, в остальных странах — только россыпные.

Извлеченные из недр руды и пески либо обогащались с получением ильменитового, рутилового, анатазового и лейкоксенитового (а также цирконового, монацитового и др.) концентратов, содержащих до 45–70 %  $TiO_2$ , либо подвергались плавке с выходом титанового шлака (до 85 %  $TiO_2$ ) и чугуна или переработке на синтетический рутил.

Мировыми лидерами по производству концентратов являлись Австралия (51,6 % мирового производства) и Норвегия (17,3 %). Суммарные мощности обогатительных фабрик дальнего зарубежья в 1997 г. превышали 5,3 млн. т / год и использовались на 75–80 %. Для освоения новых месторождений строятся или проектируются фабрики в Австралии, Вьетнаме, Мозамбике и ЮАР.

## Металлогения и эпохи рудообразования

Месторождения титана формировались главным образом на ранней стадии геосинклинального этапа в связи с отчетливо дифференцированными интрузиями пород габбро-пироксенит-дунитовой формации. Они залегают в форме долопитообразных или плитообразных тел, приуроченных к зонам глубинных разломов, развитым в областях сочленения древних платформ с протерозойскими и раннепалеозойскими складчатыми сооружениями. С зонами активизации древних платформ связано образование многофазных плутонов щелочного и ультраосновного состава с лопаритовым, перовскитовым и титаномагнетитовым оруденением. В процессе разрушения ильменит-рутил- и анатазсодержащих пород возникли латеральные, проаллювиальные и аллювиальные россыпи.

Титановые месторождения формировались в различные эпохи — от докембрийской до кайнозойской включительно. *Докембрийская эпоха* являлась наиболее благоприятной для образования крупных коренных месторождений титаномагнетитовых и ильменитовых руд. Они сосредоточены в пределах древних платформ или областей развития докембрийских образований, где пространственно связаны с ультрабазитами и базитами нормального ряда. Особенно широко распространены эти интрузивные комплексы на Африканском, Канадском и Балтийском щитах и Австралийской платформе. Крупнейшие месторождения находятся в ЮАР и приурочены к Бушвельдскому комплексу пород габбро-перидотитовой формации, абсолютный возраст которых определен  $1950 \pm 100$  млн. лет. Такой же возраст имеет комплекс основных и ультраосновных пород Танзании, с которыми связаны также крупные месторождения титаномагнетита. В США в штате Нью-Йорк в Адирондакских горах расположено месторождение Тегаvus, которое обеспечивает около 50 % добываемого в стране ильменита. Многочисленные месторождения титана докембрийского возраста выявлены в Канаде. Наиболее крупные из них — Аллард-Лейк, Лейк-Тио, Миллз, Пьюиджелон и другие, расположены в провинции Квебек. В России месторождения титаномагнетитовых руд известны в Карелии (Пудожгорское, Койкарское), в пределах габброидного пояса западного склона Южного Урала (Кусинское, Медведевское, Копанское и другие месторождения).

*Раннепалеозойская эпоха* была неблагоприятной для образования промышленных месторождений титана. Сравнительно небольшие месторождения известны на Урале, в Северной Европе и Южной Африке.

В *позднепалеозойскую эпоху* сформировалось весьма ограниченное количество промышленных месторождений. К ним относится Ярегское месторождение в Республике Коми. Оно представляет собой древнюю прибрежно-морскую россыпь, приуроченную к нефтеносным песчаникам среднего девона. Промышленное значение имеет лейкоксен. Источником производства титановых концентратов могут также стать апатит-нефелиновые руды Хибинского месторождения.

В *мезозойскую эпоху* промышленные месторождения титана практически не образовывались.

*Кайнозойская эпоха* ознаменовалась формированием крупных аллювиальных и прибрежно-морских россыпей титана. Они обычно содержат в значительных концентрациях ильменит, рутил, циркон, магнетит, титаномагнетит и лейкоксен, реже монацит и колумбит. Особенно широко россыпи распространены в Индии, Австралии, США и ЮАР. В Индии наиболее крупные россыпи сосредоточены на Траванкурском побережье в юго-западной части полуострова Индостан. Вдоль побережья россыпи («черные пески») прослеживаются в полосе протяжением 160 км, при средней ширине 150 м и мощности до 7,5 м. В Австралии разрабатываются прибрежные морские россыпи, протягивающиеся в виде полосы длиной более 1200 км от о. Фрезерс в штате Квинсленд до г. Сиднея (штат Новый Южный Уэльс). Среднее содержание минералов в тяжелой фракции составляет (%): рутила 20–45, ильменита 14–50, циркона 26–53, монацита 0,2–2,0. Общие запасы этих минералов, подсчитанные по 16 наиболее крупным месторождениям, оцениваются в 2,4 млн. т, в том числе рутила 750 тыс. т и ильменита 660 тыс. т.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Среди промышленных месторождений титана выделяются: 1) магматические, 2) россыпные, 3) выветривания, 4) осадочно-вулканогенные, 5) метаморфогенные.

*Магматические месторождения* по составу материнских пород делятся на два класса: 1) связанные с основными и ультраосновными массивами и 2) с комплексами щелочных пород. Крупные месторождения титаномагнетитовых руд широко распространены в пределах Южно-Африканского, Канадского, Балтийского и Индостанского щитов. Типичными являются месторождения, залегающие в норитах Бушвельдского комплекса. Здесь пластообразные рудные тела мощностью 0,3–0,6 м прослеживаются по простиранию на многие километры. Они содержат 51–60 % Fe и 12–20 % Ti. В России типичным титаномагнетитовым месторождением, связанным с габбро, является Кусинское, а приуроченное к пироксенитам среди габбро – Качканарское.

*Кусинское месторождение* (Южный Урал) залегает в дайкообразном массиве основных пород, внедрившихся по контакту карбонатных пород саткинской свиты и гранитогнейсов. Габброидный массив, вмещающий рудные тела, сильно дифференцирован. Среди пород массива наиболее широко развиты габбро (обычно полосчатые габбро), состоящие из лейкократовых и меланократовых полос; подчиненное значение имеют горнблендиты и пироксениты, а также анортозиты и габбро-пегматиты.

Большинство рудных тел Кусинского месторождения имеет жиллообразную форму и располагается в центральной части рудоносной полосы (рис. 12). Простирание рудных жил соответствует общему направлению рудоносной полосы, т. е. примерно северо-восточное (40–50°). Главные рудные жилы прослеживаются на 2–2,5 км. Мощность их изменяется от 0,5 до 10 м (в среднем 3,5 м); падение жил юго-восточное под углом 70–80°, местами вертикальное. Руды сложены магнетитом (60–70 %) и ильменитом (20–30 %) с незначительной примесью борнита, халькопирита, хлорита, пироксенов, гематита, пирита и др. Они содержат 50–57 % Fe, 10–20 % TiO<sub>2</sub>, 1–2 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,12 % S, а также заметные количества V. Ванадий связан с магнетитом и присутствует в виде изоморфной примеси, а также входит в состав ванадийсодержащего магнетита – кульсонита.

*Россыпные месторождения.* Среди них различают два класса: прибрежно-морские и континентальные. Главное значение имеют *прибрежно-морские* ильменит-рутил-цир-

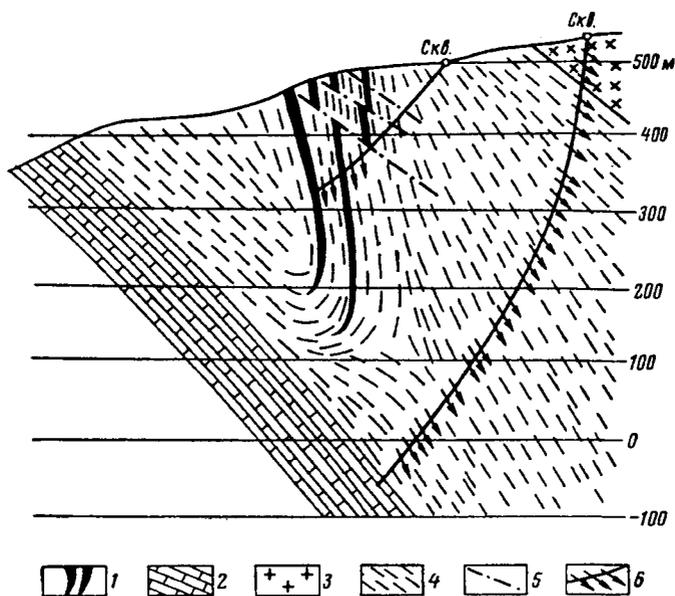


Рис. 12. Поперечный разрез Кусинского месторождения (по Д. Штейнбергу и др.):

1 — сплошной титаномагнетит; 2 — карбонатные породы лежачего бока; 3 — гранито-гнейсы; 4 — габбро-амфиболиты; 5 — тектонические нарушения; 6 — направление структурных элементов (полосчатости и план-параллельной текстуры) по данным замеров в керне скважин

коновые россыпи. Из современных прибрежно-морских россыпей рутил и ильменит добывают в Австралии, Индии, Шри-Ланка, Сьерра-Леоне, Бразилии и США. Наиболее интересны в промышленном отношении пляжевые россыпи Австралии в центральной части восточного побережья, где они с перерывами прослеживаются более чем на 75 км. Ширина их достигает 800 м, мощность продуктивного пласта — 1,8 м. Содержание рутила 18–20 кг/м<sup>3</sup>, ильменита 15–16 кг/м<sup>3</sup>.

Древние прибрежно-морские россыпи представлены слабо сцементированными или уплотненными рудными песками мезо-кайнозойского возраста. Типичным представителем являются Среднеднепровские месторождения циркон-рутил-ильменитовых песков Украины. Они образовались за счет размыва мощной мезозойской коры выветривания метаморфических пород Украинского кристаллического щита,

последующей сортировки и переотложения продуктов выветривания на бортах Днепровско-Донецкой и Причерноморской впадин в третичный период.

*Континентальные россыпи* распространены преимущественно в аллювии, элювии и пролювии четвертичных, палеогеновых и нижнемеловых отложений. Рудные тела аллювиальных россыпей, как правило, имеют форму лентовидных залежей, приуроченных к долинам рек. По минеральному составу континентальные россыпи обычно полимиктовые (ильменит, кварц, полевой шпат, каолинит и др.). Размеры зерен ильменита 0,1–0,25 мм и более. Окатанность их слабая. Содержание ильменита в промышленных континентальных россыпях варьирует от 20–30 до 200–500 кг/м<sup>3</sup>.

*Месторождения выветривания.* Эти месторождения возникают в условиях жаркого и влажного климата при выветривании габбро-анортозитовых и метаморфических пород, содержащих повышенные концентрации ильменита и рутила. При этом зерна рудных минералов сохраняют первичную форму кристаллов (они не окатаны). Мощность кор выветривания достигает нескольких десятков метров. Типичным примером может служить *Стремигородское месторождение*, образовавшееся при выветривании габбро-анортозитового массива на Воляни (Украина). Кора выветривания здесь обогащена только ильменитом, содержание которого достигает 300–500 кг/м<sup>3</sup>. На *Кундыбаевском месторождении в Казахстане*, образовавшемся в процессе выветривания метаморфических пород, в коре выветривания содержится до 180 кг/м<sup>3</sup> ильменита и до 75 кг/м<sup>3</sup> рутила.

*Осадочно-вулканогенные месторождения.* Они тесно связаны с титаноносными вулканогенно-осадочными образованиями и встречаются сравнительно редко. Наиболее типичным представителем является месторождение *Нижний Мамон*, расположенное в Воронежской области. Район месторождения сложен осадочными и вулканогенно-осадочными породами палеозоя, мезозоя и кайнозоя, залегающими на докембрийском кристаллическом фундаменте. Продуктивными являются отложения ястребовского горизонта девона. Глубина залегания его 50–70 м. Мощность вулканогенно-осадочных образований варьирует от 2–3 до 35 м. Наибольшее количество ильменита приурочено к грубообломочным туфам, туффитам и туфопесчани-

кам, в которых эффузивные обломки представлены преимущественно породами основного состава. Цементом служит магнезиально-железистый хлорит. Наиболее обогащены ильменитом (иногда до 50 % массы) грубообломочные разновидности туфогенных пород. Размеры зерен ильменита составляют, как правило, 0,25—0,30 мм. Образование вулканогенных пород, содержащих ильменит, по-видимому, происходило в мелководном морском бассейне вследствие проявления подводной вулканической деятельности.

*Метаморфогенные месторождения.* Среди них различают метаморфизованные и метаморфические месторождения титана.

*Метаморфизованные месторождения* возникли в результате метаморфизма продуктивных песков и превращения их в песчаники и кварциты. Они известны в пестроцветных лейкоксен-кварцевых песчаниках девонских отложений Тимана. Здесь наиболее крупным является *Ярегское месторождение*, представляющие собой погребенную метаморфизованную девонскую россыпь. Развита два рудоносных горизонта: нижний сложен грубо- и крупнозернистыми кварцевыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов, верхний — полимиктовыми конгломератами и разнозернистыми кварцевыми песками. Рудные минералы представлены полуокатанными зернами лейкоксена и единичными зернами ильменита. Из зарубежных метаморфизованных месторождений наиболее известно *Робинзон Коп* в США (штат Виргиния). Здесь среди песчаников кембрия встречаются линзообразные тела, обогащенные рутилом и ильменитом, составляющими в сумме до 50 % объема этих тел.

*Метаморфические месторождения* титана приурочены к древним кристаллическим сланцам, гнейсам, эклогитам и амфиболитам. Образуются они в результате метаморфизма различных пород, обогащенных титаном. К этому классу относятся: месторождение Харворд (США), где продуктивными являются докембрийские хлоритовые сланцы, содержащие до 20 % рутила; месторождение Плюмо-Идальго в Мексике (докембрийские гнейсы с содержанием рутила до 25 %); месторождения Среднего Урала (Кузнечихинское), Кольского полуострова и др.

Месторождения и рудопроявления в Беларуси. В Беларуси в 1966 г. открыто сравнительно небольшое по

---

запасам *Новоселковское месторождение* ильменит-магнетитовых руд, связанное с интрузией габбро. В рудах содержание  $TiO_2$  составляет 4,2–6,0 %. По данным института «Гипроруда» (Санкт-Петербург) с железными рудами месторождения связано 4,06 млн. т  $TiO_2$ .

Известно пять рудопроявлений титана и циркония, приуроченных к кварц-глауконитовым пескам палеогена: Микашевичское, Житковичское, Кобринское, Ковыжевское и Глушковичское. *Микашевичское проявление* тяготеет к Микашевичско-Житковичскому выступу пород кристаллического фундамента. Зона ископаемых россыпей шириной 4–5 км простирается в субширотном направлении на 23 км. Продуктивные песчаные горизонты киевской свиты залегают в интервале глубин 45–53 м. Средние и максимальные содержания составляют соответственно ( $кг/м^3$ ): ильменита 7,08 и 8,46, циркона – 2,11 и 2,48.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВАНАДИЯ

### Краткие исторические сведения

Ванадий был открыт в 1801 г. мексиканским минералогом Дель Рио. Впервые он получил промышленное применение в 1905 г. в черной металлургии. В XX в. его стали широко применять для легирования чугуна и стали.

### Геохимия

Кларк ванадия в земной коре 0,009 %. Повышенные содержания ванадия (0,02 %) отмечаются в основных породах — габбро и базальтах. В природе известно два стабильных изотопа ванадия:  $^{50}\text{V}$  и  $^{51}\text{V}$ . Наиболее широко распространен изотоп  $^{51}\text{V}$ . В магматических образованиях встречаются соединения только трехвалентного ванадия. Близость ионных радиусов  $\text{V}^{3+}$  и широко распространенных в магматических породах  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Ti}^{4+}$  приводит к тому, что ванадий в гипогенных процессах целиком находится в рассеянном состоянии и не образует собственных минералов. Поэтому концентраторами его являются минералы, содержащие Fe и Ti, — титаномагнетит, рутил, сфен, ильменит, пироксены, амфиболы. В гидротермальных образованиях наблюдаются минералы трех-, четырех- и пятивалентного ванадия. Он склонен к образованию комплексных соединений с галоидами (Cl, F), что способствует переносу ванадия гидротермальными растворами.

По-иному ведет себя ванадий в экзогенном процессе. Он легко переносится в растворах и адсорбируется различными природными продуктами. Среднее содержание ванадия в речных водах  $1 \cdot 10^{-7}$  %, а в морской воде — 0,001–0,003 мг/л. Речными и морскими водами ванадий переносится в виде взвесей и истинных растворов ( $\text{VCl}_3$ ,  $\text{VCl}_4$ ,  $\text{VOCl}$ ,  $\text{VOCl}_3$ ), а также адсорбируется гидроксидами железа, алюминия и органическим веществом (ОВ). В зоне

гипергенеза растворы, обогащенные ванадием, легко вступают в химические соединения с рядом компонентов и образуют ванадаты — соли ортованадиевой кислоты  $\text{H}_3\text{VO}_4$ .

## Минералогия

В природных условиях известно около 70 минералов, содержащих ванадий. Больше половины из них ванадаты, остальные относятся к оксидам, сульфидам и силикатам. Только некоторые из них образуют промышленные концентрации: роскоэлит, карнотит, патронит, ванадинит, деклуазит.

*Роскоэлит*  $\text{KV}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  (содержание  $\text{V}_2\text{O}_5$  19–29 %). Минерал назван по фамилии минералога Г. Э. Роско. *Карнотит*  $\text{K}_2\text{U}_2[\text{VO}_4]_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (содержание  $\text{V}_2\text{O}_5$  20 %) (по фамилии французского горного инженера Карно), кристаллизуется в моноклиальной сингонии, ярко-желтого цвета, твердость 2–2,5, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>. *Патронит*  $\text{VS}_4$  (содержание  $\text{V}_2\text{O}_5$  29 %); *ванадинит*  $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$  (содержание  $\text{V}_2\text{O}_5$  19 %) кристаллизуется в гексагональной сингонии, кристаллы коротко- и длиннопризматические до игольчатых и волосовидных, цвет оранжево-красный и бурый, твердость 2,5–3, плотность 7,1 г/см<sup>3</sup>; *деклуазит*  $(\text{Zn,Cu})\text{Pb}[\text{VO}_4]\text{OH}$  (содержание  $\text{V}_2\text{O}_5$  20–23 %), (по фамилии Деклуазо), кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов изменчивый: дипирамидальный, призматический, реже таблитчатый или короткопризматический, цвет вишнево-красный, бурый до черного, блеск жирный, твердость 3–3,5, плотность 6,2 г/см<sup>3</sup>.

Ванадий в основном (70 %) извлекают из титаномагнетитовых руд — титаномагнетита и магнетита. В *титаномагнетите* за счет присутствия мелких включений кульсонита  $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$  содержание ванадия может достигать нескольких процентов. Повышенные концентрации ванадия (до 1–2 %  $\text{V}_2\text{O}_5$ ) часто наблюдаются в эгирине, сфене, гранате, амфиболах и некоторых других минералах. Кроме того, источником ванадия могут служить: осадочные железные руды, зола некоторых углей и горючих сланцев.

## Применение в промышленности

Основной областью применения ванадия является черная металлургия (около 90 %), где он используется для легирования чугуна и стали. Небольшое количество ванадия, добавленное к любой стали, способствует удалению кислорода и азота, резко повышает ее твердость, упругость и сопротивление разрыву, уменьшает истирание стенок двигателей внутреннего сгорания. Для легирования конструкционных сталей обычно на 1 т стали идет 1–10 кг ванадия. Ванадий применяется для производства сплавов с железом, кремнием, титаном, кобальтом, алюминием. Титано-ванадиевые сплавы используются для изготовления деталей сверхзвуковых самолетов, космических кораблей, ракет-носителей и т. д.

В химической промышленности ванадий применяется при производстве анилиновых красок и катализаторов, используемых при производстве серной кислоты и синтетического каучука. В небольших количествах он находит применение в керамической промышленности (для окрашивания керамических изделий), для изготовления цветных кино- и фотопленок, при производстве литографских красок.

В настоящее время основные объемы ванадия извлекают попутно при переработке руд железа, титана, урана, свинца, цинка и фосфатов. В СНГ главным сырьем для получения ванадия являются титаномагнетитовые руды. После доменной плавки этих руд почти весь ванадий переходит в чугун. Затем в процессе передела чугуна на сталь остаются шлаки, содержащие до 25 %  $V_2O_5$ . Они подвергаются обжигу с сильвинитом или содой ( $Na_2CO_3$ ) и последующему выщелачиванию с выделением технического пентоксида ванадия.

## Ресурсы и запасы

Новых статистических данных о мировых ресурсах и запасах ванадия в мире в опубликованных российских источниках не имеется. Общие запасы ванадия (в пересчете на  $V_2O_5$ ) в конце 1980-х годов в капиталистических и развивающихся странах составляли 6,7 млн. т, 85 % которых

были сосредоточены в ЮАР и Австралии, остальные — в Индии, США, Финляндии, Норвегии и Намибии.

По запасам пектоксида ванадия выделяют следующие группы месторождений: 1) уникальные с запасами в миллионы тонн; 2) крупные — сотни—десятки тысяч тонн; 3) мелкие — единицы тысяч тонн.

## **Добыча и производство**

Добыча руд и производство ванадийсодержащих концентратов осуществляется в ЮАР, США, Финляндии, Норвегии, России, Намибии и в некоторых других странах. Минимальное содержание  $V_2O_5$  в титаномагнетитовом концентрате 0,3 %; вредные примеси — CaO и P. Производство ванадиевых концентратов (в пересчете на  $V_2O_5$ ) в 1985—1990 гг. составляло около 35—40 тыс. т. Основной страной-производителем этого вида продукции является ЮАР (около 70 % мирового производства).

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

В эндогенных условиях месторождения ванадия возникли на ранней стадии геосинклинального этапа в связи с интрузиями пород габбро-пироксенитовой формации. В этих формациях ванадий тесно связан с титаномагнетитовыми и ильменит-магнетитовыми рудами. Распределение ванадийсодержащих интрузивных массивов в докембрийских толщах подчиняется следующим закономерностям: 1) на щитах платформ с северного полушария (Северо-Американской, Восточно-Европейской и Сибирской) распространены небольшие по размерам, но многочисленные массивы основных и ультраосновных пород, содержащие относительно небогатую ванадием титаномагнетитовую руду; 2) в Южном полушарии интрузивы гипербазитов не столь многочисленны, но среди них встречаются очень крупные (например, Бушвельдский массив); 3) крупнейшие ванадиеносные интрузивные массивы, как правило, образуют рудоносные зоны, контролируемые глубинными разломами, и которые размещаются вдоль границ древних платформ и протерозойских геосинклиналей.

В экзогенных условиях ванадий концентрировался в осадочных толщах углеродисто-кремнистых черных сланцев, образовавшихся на геосинклинальном этапе, а также в осадочных рудах железа, бокситах, углях и зонах окисления месторождений уран-ванадиевого и полиметаллического состава.

*Докембрийская эпоха* – наиболее благоприятная для образования эндогенных месторождений ванадия. В это время сформировались крупнейшие в мире месторождения, связанные с Бушвельдским комплексом. В титаномагнетитовых рудах содержание  $V_2O_5$  составляет 0,4–2,5 %. Наиболее крупное месторождение Магнет Хейтс. На базе руд Бушвельдского комплекса созданы заводы по производству ванадиевых шлаков годовой производительностью 20 тыс. т в пересчете на  $V_2O_5$ . В Финляндии разведано несколько коренных месторождений (Отанмяки, Вуолийоки и др.), в рудах которых среднее содержание  $V_2O_5$  достигает 2,4 %. В России месторождения ванадийсодержащие титаномагнетитовые руды известны в Карелии и на Южном Урале.

В *раннепалеозойскую эпоху* промышленные эндогенные месторождения ванадия практически не образовывались. В это время возникли экзогенные месторождения ванадия, связанные с углеродисто-кремнистыми сланцами.

*Позднепалеозойская эпоха* в целом являлась малопродуктивной для ванадия. В это время образовывались сравнительно небольшие месторождения, связанные в основном с углями и углеродисто-кремнистыми сланцами.

*Мезозойская и кайнозойская эпохи* рудообразования являлись глобальными для формирования морских и континентальных оолитовых железных руд, являющихся концентраторами ванадия. Наиболее крупные месторождения этого типа образовались в Западной Европе (Лотарингский бассейн) и на территории СНГ (Керченский железорудный бассейн).

## **Генетические типы промышленных месторождений**

К промышленным месторождениям ванадия принадлежат: 1) магматические, 2) выветривания, 3) россыпные, 4) осадочные, 5) метаморфогенные.

*Магматические месторождения.* В месторождениях этого типа сосредоточены основные запасы промышленных ванадийсодержащих руд. Они пространственно связаны с основными и ультраосновными изверженными породами. Площади наиболее крупных массивов достигают нескольких сотен квадратных километров, а изредка до тысяч квадратных километров. Среднее содержание ванадия в рудах невысокое – 0,1–1 %. Однако запасы ванадийсодержащих руд на некоторых месторождениях достигают нескольких миллионов тонн. Наиболее высокие концентрации ванадия наблюдаются в рудных минералах в породах ультраосновного состава. Важнейшие провинции эндогенных месторождений ванадия в России: 1) восточного склона Урала (Гусевогорское, Качканарское, Первоуральское и др. месторождения), 2) западного склона Урала (Кусинское, Медведевское, Маткальское, Копанское), 3) Карело-Кольская (Пудожгорское, Ельть Озеро и др.), 4) Кузнецко-Саянская (Лысаковское, Кедранское и др.), 5) Восточно-Забайкальская (Кручининское и др.), 6) Сибирская трапповая (Камышевский Байкитик и др.). Наиболее значительные магматические месторождения ванадия дальнего зарубежья: Бушвельд (ЮАР), Миллз, Лак-Тио, Пьюиджелон (Канада), Тегавус (США), Баррамби (Австралия), Родсенд, Сельвог (Норвегия), Таберг (Швеция).

*Месторождения выветривания* формируются в зонах окисления полиметаллических руд. Они, как правило, небольшие по запасам. Ванадий концентрируется только в окисленных рудах (содержание его достигает 5,5 %). Рудные тела имеют трубообразную форму, верхняя часть их сложена окисленными рудами, содержащими церуссит, смитсонит, малахит, англезит, азурит и минералы ванадия – деклуазит, купродеклуазит и ванадинит. Глубина зон окисления руд обычно не превышает нескольких сот метров. Месторождения этого типа широко распространены в Африке (Брокен-Хилл в Замбии, Тсумеб, Берг-Аунас, Абенаб в Намибии), встречаются также в Австралии, США, Аргентине, Мексике и России.

*Россыпные месторождения* известны в Австралии, Новой Зеландии, Индии, России и других странах. По генезису – это прибрежно-морские россыпи ванадийсодержащих титаномагнетитовых песков. Содержание  $V_2O_5$  в них невысокое – около 0,7 %. Крупные россыпи ванадийсо-

державших песков известны на побережье Новой Зеландии (запасы около 800 тыс. т).

*Осадочные месторождения.* Значительные количества ванадия концентрируются в осадочных месторождениях железа, бокситов, а также в сланцах, углях и нефтях. В оолитовых бурых железняках (Лотарингский, Керченский бассейны и др.) содержится 0,05–0,1 %  $V_2O_5$ , который извлекается. Повышенные содержания ванадия установлены в бокситах Италии, в углях многих месторождений (в золе содержание  $V_2O_5$  достигает десятых долей процента).

*Месторождения ванадиеносных сланцев* представлены чередованием пачек углисто-глинистых и кремнистых сланцев суммарной мощностью в десятки метров, при мощности отдельных пачек 0,5–2,0 м. Ванадий концентрируется главным образом в углистых прослоях, где содержание его достигает 1–2 %, в то время как в кремнистых прослоях снижается до 0,2–0,3 %. Состав таких руд очень сложный: углистое вещество с участием карбонатов и ванадатов (ванадинит, узбекит, фольбортит), фосфаты, барит, роскоэлит и др.

*Карнотитовые и роскоэлитовые месторождения* в пестроцветных отложениях (алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты) осадочного чехла (тип «плато Колорадо») распространены во многих странах, но наибольшее значение имеют в США, где в них наблюдаются повышенные концентрации ванадия (до 1,7 %), урана (0,18–0,34 %  $U_3O_8$ ) и меди (около 0,5 %).

Повышенной ванадиеносностью характеризуются высокосернистые нефти Урало-Волжской провинции, Венесуэлы, Ирана и некоторых других нефтегазоносных областей.

Патронит в асфальтитах обрабатывается на месторождении *Минас Рагра*. Оно расположено в Перу на высоте 4700 м. Район месторождения сложен глинистыми сланцами, песчаниками и известняками мелового возраста. Породы прорваны дайками порфиоров. Главное рудное тело прослежено по простираанию на 100 м при мощности от нескольких сантиметров до 9–12 м. Руда сложена черным аморфным патронитом в асфальтоподобном веществе, содержащем серу и примесь вторичных сернистых соединений никеля (бравойт –  $(Fe, Ni, Co)S_2$ ). Руды очень богатые и содержат  $V_2O_5$  до 15 %, Ni – 1,5 %, Mo – 0,5–1,5 %. Условия образования этого месторождения не совсем ясны.

Предполагается, что в процессе образования асфальта (при разложении белков животного и растительного происхождения без доступа воздуха) выделялось значительное количество  $H_2S$ , который в верхней зоне частично окислялся до самородной серы, частично же осаждал из грунтовых растворов V, Ni и Mo.

*Метаморфогенные месторождения.* Месторождения этого типа немногочисленны. Они известны в Финляндии, Норвегии и США. В Финляндии – это месторождение Отанмяки. Здесь в амфиболитах, залегающих в гранито-гнейсах, развиты две зоны линзовидных рудных тел, сложенных ильменит-магнетитовыми рудами со средним содержанием ванадия 0,62 %. На месторождении попутно ежегодно извлекают 1,3–1,5 тыс. т ванадия.

В США находится месторождение *Уилсон-Спрингс*. Оно приурочено к зоне аргиллитизации на контакте нефелиновых сиенитов и кристаллических сланцев. Концентратами ванадия служат глинистые минералы. Содержание ванадия в них в среднем составляет 0,6 %. Запасы  $V_2O_5$  на месторождении около 30 тыс. т.

Месторождения и рудопроявления в Беларуси. В ильменит-магнетитовых рудах Новоселковского месторождения среднее содержание  $V_2O_5$  составляет 0,15–0,24 %. Подсчитанные по категории  $C_2$  запасы ванадия (в пересчете на  $V_2O_5$ ) оценены в 164,2 тыс. т.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ

Никель, наряду с алюминием, кобальтом, медью, свинцом, цинком, оловом, вольфрамом, молибденом, висмутом, сурьмой, ртутью и магнием, относится к цветным металлам.

### Краткие исторические сведения

Никель известен еще с глубокой древности. Он входил в состав сплавов, из которых чеканили монеты еще в Бактрийском царстве (200 лет до н. э.). Из сплава никеля, меди и цинка в древнем Китае изготавливали различные металлические изделия. Как химический элемент никель впервые был открыт шведским химиком А. Кронстедом в 1751 г. в минерале никелине. В средние века саксонские рудокопы часто встречали скопления красноватых руд, которые принимали за медные. Однако выплавить из них медь, как ни старались, так и не смогли, так как температура плавления никеля почти на 400 °С выше, чем у меди. Они дали название этой руде «купферникель» («медный дьявол»). Когда А. Кронстедт открыл в этом минерале новый элемент, он назвал его никель («дьявол»), отбросив «купфер» — медный.

В конце XIX — начале XX века никель еще относился к очень редким металлам. Из него изготавливали кулоны, браслеты и прочие украшения. Впервые крупные залежи никеля, когда он еще считался драгоценным металлом, были открыты на о. Новая Каледония в Тихом океане.

Никель — серебристо-белый, тугоплавкий металл (температура плавления 1453 °С). Он тверд, гибок, ковок, тягуч, хорошо поддается полировке, химически малоактивен.

## Геохимия

Кларк никеля в земной коре 0,0058 %. Содержание его в ультраосновных породах ( $1,2 \cdot 10^{-1}$  %) примерно в 200 раз выше, чем в кислых ( $8 \cdot 10^{-4}$  %). Известно пять стабильных изотопов никеля:  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{61}\text{Ni}$ ,  $^{62}\text{Ni}$  и  $^{64}\text{Ni}$ , среди которых преобладает  $^{58}\text{Ni}$ .

Промышленные концентрации никеля обычно ассоциируются с базит-гипербазитовыми магмами, связанными с подкоровыми очагами. Ему присущи сидерофильные и халькофильные свойства. В ультраосновных породах никель связан, как правило, с оливинами, содержащими 0,13–0,41 % Ni, в которых он изоморфно замещает Fe и Mg. При наличии в магме серы никель наряду с медью и железом, обособляется в виде сульфидов. В процессе раскристаллизации отликвировавшего сульфидного расплава возникают магматические месторождения сульфидных медно-никелевых руд.

В гидротермальном процессе совместно с кобальтом, мышьяком, серой, иногда и висмутом, ураном и серебром никель образует повышенные концентрации в виде арсенидов и сульфидов.

В экзогенных условиях никель накапливается в коре выветривания в результате выщелачивания его из серпентинитов и оливина. Переходя в раствор и при наличии избыточной  $\text{CO}_2$  мигрирует в виде бикарбоната  $\text{Ni}(\text{HCO}_3)_2$ . Осаждение его происходит обычно в нижних горизонтах кор выветривания, где создаются условия для образования водных силикатов никеля, а также содержащих никель ферри- и алюмосиликатов.

## Минералогия

Известно 45 минералов никеля. Главными минералами руд сульфидных месторождений являются пентландит, миллерит и никелин. *Пентландит*  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$  (содержание Ni 22–42 %) (по фамилии ирландского естествоиспытателя Дж. Б. Пентланда). Кристаллизуется в кубической сингонии. Характерны агрегаты зернистые; пластинчатые и пламенеобразные выделения в пирротине, образующиеся в результате распада твердого раствора. Цвет бронзово-желтый, блеск металлический, твердость 3–4, плотность 4,5–

5 г/см<sup>3</sup>. Обычно содержит примесь кобальта (до 3 %) и палладия.

*Миллерит* NiS (Ni до 65 %) (по фамилии Миллер). Кристаллизуется в тригональной сингонии. Агрегаты зернистые, радиальнолучистые, спутанно-волоконистые, корочки. Цвет латунно-желтый, блеск металлический, твердость 3–3,5, плотность 5,6 г/см<sup>3</sup>. Минерал встречается в жильных медно-никелевых сульфидных рудах и гидротермальных месторождениях комплексных никель-кобальт-серебряных руд.

*Никелин* NiAs (Ni до 44 %), кристаллизуется в гексагональной сингонии. Минерал бледного медно-красного цвета, дает буровато-черную черту, блеск металлический, образует агрегаты зернистые, почковидные со столбчатой и радиально-лучистой структурой, сетчатые и дендритовые, твердость 5–5,5, плотность 7,8 г/см<sup>3</sup>. Содержит примесь Fe, S, Sb и Co. Встречается в гидротермальных месторождениях комплексных никель-кобальт-серебряных руд.

Из других минералов необходимо отметить сернистые и мышьяковые соединения никеля и кобальта: *хлоантит* (NiCo)As<sub>3–2</sub>, *герсдорфит* (NiCo)AsS и *раммельсбергит* NiAs<sub>2</sub>.

Особенно большое практическое значение имеют силикаты никеля (гарниерит, непуит, ревинскит и др.), развитые в корках выветривания. *Гарниерит* NiO·SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O (содержание NiO 46 %) (по фамилии французского инженера и минералога Ж. Гарнье), светло-зеленый гидросиликат. Образует агрегаты землистые, натечные, скрытокристаллические.

*Непуит* (Ni,Mg)<sub>6</sub>(OH)<sub>8</sub>·Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub> (NiO 20–46 %) – гидросиликат никеля зеленого цвета с голубоватым оттенком. Кристаллизуется в моноклиальной сингонии, габитус кристаллов пластинчатый, агрегаты чешуйчатые, пластинчатые, твердость 2–2,5, плотность 2,5–3,2 г/см<sup>3</sup>.

*Ревинскит* (Ni,Mg)<sub>6</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub> (NiO до 46 %) – зеленовато-голубой гидросиликат никеля, встречается в парагенезисе с гарниеритом и непуитом.

## Применение в промышленности

В настоящее время никель широко применяется в металлургии (около 80 % общего потребления) для производства легированных сталей и сплавов. Крупными потреби-

телями никелевых сплавов являются тракторная и автомобильная промышленность, станкостроение и электронная промышленность. Наиболее широкое применение имеют сплавы Ni с Cu, Zn, Al (латунь, нейзильбер, мельхиор, бронза), Ni с Cr (нихром), монетный сплав (75 % Cu+25 % Ni) и платинит (49 % Ni+51 % Fe).

В химической и пищевой промышленности чистый никель используется для изготовления разнообразной аппаратуры, в том числе тиглей, труб, приборов, посуды для выпаривания эфирных масел. Сплавы никеля находят применение в реактивной авиации, ракетостроении, в производстве оборудования для атомной промышленности. В XX в. никелевая сталь широко использовалась для производства брони, орудийных стволов, коленчатых валов и т. д. Е. Ф. Шнюков в книге «Мир минералов» писал, что когда в 1942 г. Германия захватила Печенгу, почти за 3 года оккупации было вывезено оттуда около 0,4 млн. т богатых (пентландитовых) руд. Германская промышленность все эти годы на 3/4 снабжалась рудой Печенги. Однако «рудный путь» Кольский полуостров — Германия дорого обошелся немцам: на этом пути было уничтожено более 650 немецких транспортных и боевых кораблей.

В настоящее время никель извлекается из сульфидных, силикатных и комплексных руд. Содержание Ni в сульфидных рудах должно быть не менее 0,5—1,0 %, в силикатных — 1,3 %. Нижним пределом для комплексных сульфидных медно-никелевых руд считается 0,3 %.

## Ресурсы и запасы

Общие запасы никеля в мире на начало 1997 г. составляли 132,2 млн. т, подтвержденные (разведанные) — 54,96 млн. т. На долю четырех стран (Россия, Куба, Новая Каледония и Индонезия) приходится около 59 % мировых подтвержденных запасов никеля (табл. 3).

В мире открыто более 400 месторождений никелевых руд, в том числе 235 сульфидных и 155 силикатных. По разведанным запасам месторождения никеля подразделяются на уникальные (более 1 млн. т), весьма крупные (от 500 тыс. т до 1 млн. т), крупные (от 250 до 500 тыс. т), средние (от 100 до 250 тыс. т) и мелкие (менее 100 тыс. т).

Таблица 3

## Запасы никеля (тыс. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Средние содержания Ni в рудах, %
Россия	7300	6600	12	1,5
ЕВРОПА	8420	2980	5,4	...
Албания	3300	1000	1,8	1,2
Греция	2340	450	0,8	1,0
АЗИЯ	28400	6140	11,2	...
Индия	1380	860	1,6	1,2
Индонезия	10300	3200	5,8	1,7
Казахстан	1080	780	1,4	0,75
Китай	7400	730	1,3	0,9
АФРИКА	17730	4497	8,2	...
Ботсвана	820	480	0,9	0,7
Мадагаскар	1530	1440	2,6	1,4
ЮАР	9400	2500	4,5	0,4
АМЕРИКА	39295	27823	50,6	...
Бразилия	2920	670	1,2	1,7
Венесуэла	860	620	1,1	1,2
Гватемала	1545	900	1,6	1,8
Канада	9775	6200	11,3	1,5
Колумбия	1035	560	1,0	2,6
Куба	21100	18000	32,8	1,1
ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ	31010	6920	12,6	...
Австралия	5140	2200	4,0	2,1
Новая Каледония	24450	4500	8,2	2,1
Папуа-Новая Гвинея	1420	220	0,4	1,0

К уникальным месторождениям, оказавшим существенное влияние на развитие никелевой промышленности, относятся сульфидные месторождения Норильск-1, Талнахское и Октябрьское в России, группы месторождений Садбери и Томпсон в Канаде, Агню, Камбалда и Маунт-Кейт в Австралии, Цзиньчуань в Китае, а также силикатные месторождения на о. Эвбея в Греции, Непуи в Новой Каледонии, Памалеа и Гебе в Индонезии. Начальные запасы каждого из них превышали 1 млн. т никеля.

## Добыча и производство

В 1996–2000 гг. добыча никелевых руд (в пересчете на металл) в мире превышала 1 млн. т. Большая часть руды была добыта на месторождениях сульфидных (61,2 %) и силикатных (38,8 %) руд. В никеледобывающей промышленности действовало 60 горных предприятий, в том числе 32 рудника, 23 карьера и 5 предприятий комбинированной добычи. Добыча никелевых руд осуществлялась в 22 странах. К настоящему времени наиболее крупные объемы добычи достигнуты в России (27,7 % мировой добычи), Канаде (18,2 %), Новой Каледонии (11,8 %) и Австралии (10,7 %). Общая доля этих стран в мировом производстве никеля превышает 78 %.

К наиболее крупным компаниям относятся РАО «Норильский Никель» в России, «Inco Ltd» и «Falconbridge» в Канаде и «Western Mining Corp.» в Австралии. РАО «Норильский Никель» обеспечивает до 95 % добычи и производства никеля в России. В его структуру входят Норильский горно-металлургический комбинат (НГМК) и расположенные на Кольском полуострове ГМК «Печенганикель» и комбинат «Североникель».

## Металлогения и эпохи минералообразования

Месторождения никеля не характерны для геосинклинального этапа. В это время возникали лишь редкие и небольшие по размерам гидротермальные месторождения сульфидоарсенидов никеля, связанные с гранитоидами средней и поздней стадий развития геосинклиналией.

Преобладающая масса сульфидных медно-никелевых месторождений сформировалась на стадии активизации древних платформ в связи с трапповым магматизмом. Основной путь образования таких месторождений – это ликвация, обусловленная снижением растворимости сернистых соединений Fe, Ni и Cu в зависимости от содержания в кристаллизующейся магме Fe, S, SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Образовавшиеся в результате ликвации магмы сульфидный и силикатный расплавы в дальнейшем кристаллизовались

независимо друг от друга, причем выделение силикатов опережало выделение сульфидов на 200–300 °С. В зависимости от геологической и тектонической обстановки сульфиды могли оставаться на месте, образуя скопления сингенетических руд, или проникать в трещины в теле интрузива и зоны дробления по контакту с вмещающими породами, формируя «отщепленные» тела эпигенетических медно-никелевых руд.

На щитах рудоносные массивы основных и ультраосновных пород внедрялись в зоны пересечения разрывных нарушений и в период становления подвергались стратификации. Месторождения, возникшие на краях активизированных платформ, приурочены к наиболее поздним дериватам расслоенных интрузивов основного состава. Оруденение локализуется в нижних горизонтах дифференцированных интрузий или в подстилающих породах.

Экзогенные месторождения силикатных никелевых руд, приуроченные к корам выветривания, образовывались на платформенном этапе. В зависимости от геологического строения рудоносных площадей, наличия или отсутствия карбонатных пород и особенностей строения рельефа формировались рудные залежи различной формы — плащеобразные, жилобразные и более сложные, приуроченные к карстовым полостям.

Месторождения никеля возникали в различные геологические эпохи. Главной в формировании сульфидных медно-никелевых руд являлась *докембрийская эпоха рудообразования*. В это время сформировалась преобладающая часть запасов Канады (район Садбери и оз. Линн, месторождения Мистери-Лейк, Моак-Лейк, Томпсон), Норвегии, Финляндии, Австралии и отдельные месторождения в России (Мончегорское). В Австралии в штате Западная Австралия выявлено более 30 месторождений сульфидных руд, приуроченных к докембрийским массивам ультрабазитов. По масштабам оруденения и добычи никеля выделяется месторождение Камбалда, доказанные запасы никеля которого составляют 1,1 млн. т при среднем содержании Ni 1,5–2,0 %.

В *раннепалеозойскую эпоху рудообразования* промышленные месторождения никеля формировались в основном на северо-западе Европы. Наиболее крупным среди них является месторождение Рингерих в Норвегии.

Для *позднепалеозойской эпохи рудообразования* промышленные месторождения никеля не характерны. Встречаются гидротермальные кобальт-никелевые месторождения (Ховуаксы в Туве) и связанные с корой выветривания ультраосновных массивов (Урал).

В *мезозойскую эпоху рудообразования* образовались крупные месторождения сульфидных медно-никелевых руд в Норильском районе (Россия) и в ЮАР. В ЮАР месторождения сосредоточены в Восточном Грикваленде и связаны с основными интрузивными породами, залегающими среди осадочных свит системы Карру. По масштабам оруденения выделяется месторождение Инсизва, вкрапленные и массивные руды которого приурочены к донной части крупного силла долеритов. Силикатные никелевые руды распространены на Южном Урале, в Северо-Западном Казахстане, Бразилии и других регионах.

В *кайнозойскую эпоху рудообразования* формировались главным образом силикатные никелевые руды, приуроченные к коре выветривания массивов ультраосновных пород. Большинство месторождений этого возраста сосредоточено в Юго-Восточной Азии, Центральной и Южной Америке и Океании. Разрабатываются только те месторождения, в рудах которых содержание Ni превышает 1 %. Наиболее крупные месторождения известны на о. Новая Каледония и Кубе (провинция Ориенте), а также в Индонезии (месторождения Сороака, Памалеа и др.).

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Важнейшими типами промышленных месторождений никеля являются: 1) магматические, 2) плутоногенные гидротермальные, 3) коры выветривания.

*Магматические месторождения* сульфидных медно-никелевых руд известны в России — в Красноярском крае (Норильск-1, Октябрьское, Талнахское), на Кольском полуострове (Печенга, Аллареченское), в Швеции (Клева), Финляндии (Пори), Канаде (Садбери, Томпсон и др.), США (Стиллуотер), ЮАР (Бушвелд, Инсизва) и Австралии. Все они связаны с дифференцированными базит-гипербазитовыми массивами.

Рудные тела размещаются внутри, по периферии в придонной части и вблизи материнских интрузивов. Наиболее характерны: 1) пластообразные висячие залежи вкрапленных руд; 2) пластообразные и линзовидные донные залежи массивных «шиловых» и прожилково-вкрапленных руд; 3) линзы и неправильные тела приконтактных брекчиевых руд; 4) жилообразные и жильные тела массивных руд. Размеры рудных тел варьируют от первых сотен метров до 1,0–1,5 км по простиранию и от нескольких сотен до 800–1000 м по падению при мощностях от 1–3 до 50 м и более. Минеральный состав руд достаточно хорошо выдержан. Главные рудные минералы: пирротин, халькопирит, пентландит, второстепенные — магнетит, пирит, кубанит, борнит, полидимит, никелин, миллерит, спериллит, виоларит и куперит.

Типичным примером медно-никелевых месторождений, сформировавшихся на активизированных платформах, является *Норильское месторождение*. Оно расположено в пределах обширного Норильского рудного района, приуроченного к сочленению Сибирской платформы и Енисейской зоны складчатости. Основным структурным элементом района является Хантайско-Рыбинский вал, к востоку от которого находится западный край Тунгусской синеклизы (плато Сыверна), а к западу широкий мульдообразный прогиб Норильского плато. В основании комплекса пород, слагающих Норильское плато, залегают осадочные известково-глинистые и мергелистые породы девона, которые с несогласием перекрываются песчано-глинистыми образованиями среднего карбона—верхней перми, известные под названием тунгусской серии. Мощность этой серии составляет 130–225 м. На осадочных породах тунгусской серии залегают мощная толща лав, в которой выделяются четыре горизонта. Самый нижний из них относится к перми, остальные к триасу (рис. 13).

Норильский рудный район представляет собой группу медно-никелевых месторождений, пространственно и генетически связанных с рядом сближенных между собой во времени интрузивов дифференцированных габбро-долеритов второго цикла триасового вулканизма. Залегают они в форме лакколитообразных и пластообразных тел, полого секущих вмещающие породы. Развиты сингенетические вкрапленные медно-никелевые руды, сложенные пирро-

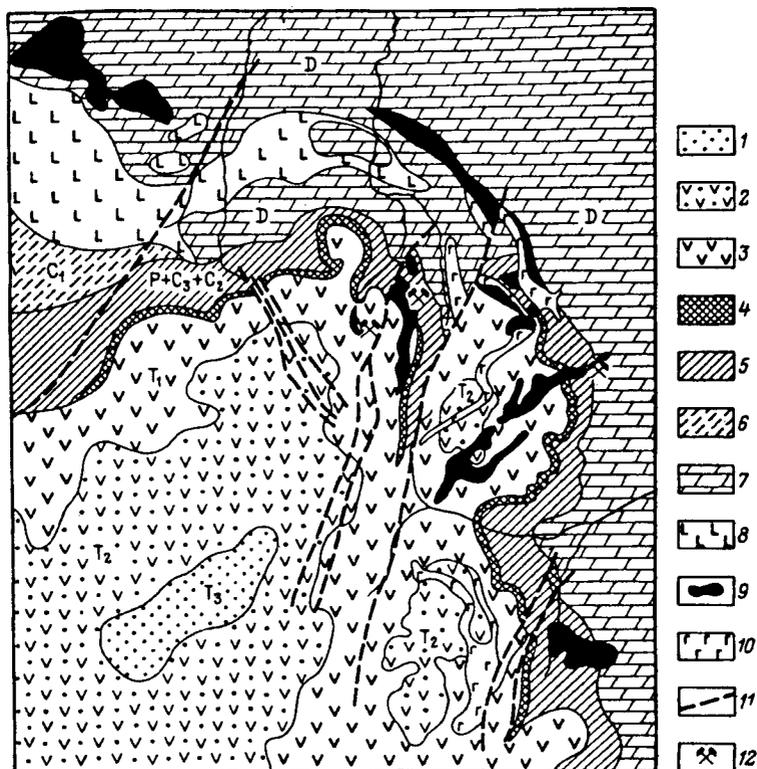


Рис 13. Геологическая схема Норильского рудного района (по Н. Зотову): 1–3 – лавы третьего (1), второго (2), первого (3) вулканических циклов триаса; 4 – лавы пермского вулканического цикла; 5 – осадочные породы верхнего палеозоя (тунгусская серия); 6 – осадочные породы нижнего карбона (морские известняки); 7 – осадочные породы девона; 8 – долериты и габбро-долериты второго триасового цикла; 9 – дифференцированные габбро-диабазы второго триасового цикла; 10 – габбро-долериты третьего триасового цикла; 11 – сбросы; 12 – медно-никелевые месторождения (в целях упрощения на схеме не показаны интрузивные силлы пермского и первого триасового циклов)

тином (52 %), халькопиритом (28 %), пентландитом (20 %) и минералами группы платины. Кроме того, распространены жилы массивных руд, в ряде случаев имеющие довольно сложную форму, и сложенные пирротином (70 %), халькопиритом (13 %) и пентландитом (17 %). В норильских рудах присутствуют многочисленные минералы платины, число которых увеличивается при повышении в ру-

дах содержаний халькопирита и кубанита, а также в висячих бортах рудных жил.

Образование массивных сульфидных руд Норильского рудного района связано с глубинной ликвацией и поступлением рудоносных растворов по разрывным нарушениям из остывавших на глубине магматических очагов. В районе Норильска имеются и другие месторождения медно-никелевых руд — Талнахское, Октябрьское и др.

Месторождения района Садбери находятся в Канаде в провинции Онтарио. Они приурочены к обширному дифференцированному массиву, в плане имеющему форму овала с длинной осью субширотного простирания до 60 км и короткой — 25 км (рис. 14). В разрезе он представляет опрокинутый конус, вершина которого находится на глубине

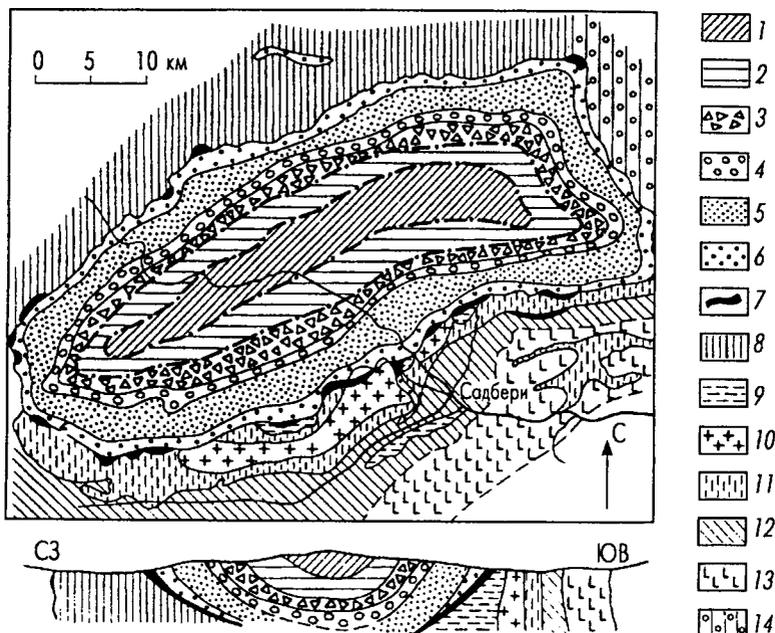


Рис. 14. Геологическая карта и разрез массива Садбери (по Ф. Гранту и др.): 1 — хельмсфордский песчаник; 2 — сланец онветин; 3 — туфы; 4 — конгломераты; 5 — оливковые нориты; 6 — нориты, сверху микропегматиты; 7 — рудные залежи; 8 — лаврентьевская свита; 9 — граниты; 10 — древние нориты; 11 — амфиболиты; 12 — граувакки; 13 — кварциты; 14 — лаврентьевские и зеленокаменные породы

от 10 до 25 км от земной поверхности. Массив сложен дифференцированной серией пород: в подошве находятся кварцевые нориты, выше – габбро-нориты, габбро и кварцевые габбро, переходящие в гранофиры.

Рудные залежи имеют пласто-, жило- и линзовидную форму. Они, как правило, окаймляют массив Садбери по его периферии, отходя иногда в подстилающие породы на несколько километров. Размеры рудных тел варьируют в значительных пределах и на отдельных месторождениях достигают в длину по простиранию до 700 м и по падению до 600 м при мощности до 20 м. Развиты два типа руд: 1) бедные вкрапленные, образующие донные залежи пластообразной и линзовидной формы в основании ранних норитов; 2) богатые, слагающие инъекционные тела жилообразной формы среди поздних норитов, брекчий и диоритовых даек подстилающих пород. Главные рудные минералы: пирротин, пентландит, халькопирит и кубанит, второстепенные – герсдорфит, никелин, маухерит, магнетит, борнит, валлериит и др. Среднее содержание Ni в рудах изменяется от 0,7 до 1,45 %, Cu – от 0,8 до 1,9 %. Кроме никеля, меди и кобальта руды месторождений района Садбери содержат золото, серебро, платиноиды, селен и теллур, которые извлекаются попутно.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения.* К этому типу относятся жильные месторождения никель-кобальтовых арсенидов, нередко с серебром и висмутом. Они возникают в условиях низких и средних температур. Месторождения этого генетического типа известны в России (Ховуаксы в Туве), Марокко (Бу-Аззер), Канаде (Эльдорадо, Кобальт), Германии (Рудные горы), Финляндии и Киргизии. Рудные тела обычно представлены жилами и жилообразными залежами, которые прослеживаются на десятки – первые сотни метров по простиранию и на столько же по падению. Мощность их варьирует от 0,1 до 1,0 м и более, и в среднем составляет 0,4–0,5 м. Главные рудные минералы: никелин, смальтин, хлоантит, скуттерудит, саффлорит. Месторождения различаются по составу руд и условиям образования. Наиболее характерны следующие рудные формации: 1) арсенопирит-глаукокодот-кобальтиновая (месторождение Бу-Аззер); 2) смальтин-хлоантит-никелиновая (Ховуаксы); 3) смальтин-хлоантит-аргентитовая (Кобальт); 4) пятиэлементная формация (Ni–Co–Ag–Bi–U)

(Эльдорадо). Этот генетический тип месторождений играет резко подчиненную роль по запасам и добыче никеля.

*Месторождения коры выветривания.* Никеленосные латеритные коры образуются в условиях тропического климата при выветривании основных и ультраосновных пород. Происходит разрушение оливина и серпентина, в которых изоморфно с магнием находится никель. Никель высвобождался и перемещался, часто совместно с кобальтом, из верхних горизонтов коры выветривания в нижние. Здесь в связи с изменением щелочности растворов образовывались вторичные никельсодержащие минералы — гарниерит, непуйт, ревдинскит, нонтронит и др.

По форме рудных тел различают следующие промышленные типы: 1) плащеобразные или площадного типа; 2) линейно вытянутые или трещинные; 3) контактово-карстовые.

*Месторождения площадного типа* широко распространены на Кубе, в Бразилии, Индонезии, Филиппинах, а также в России. Руда состоит из смеси гидроксидов железа и алюминия, глинистого материала с примесью Ni, Cr, Co и Mn. Мощность рудных зон колеблется от 3—8 до 25—30 м, площадь измеряется несколькими квадратными километрами. Содержание Fe составляет 30 %, Ni — от следов до 2,3 %, Co — от следов до 1,7—2 %. Отношение Ni/Co в рудах 10.

Характерным представителем этого типа является *месторождение Шкляры* в Польше. Руды приурочены к поверхностной части серпентинитового массива, обнажающегося к северу от Зомбиковице-Слёнске. Серпентиниты залегают в докембрийских гнейсах (рис. 15). Латеритное выветривание серпентинитов развивалось в зонах тектонического дробления. Выветрелые зоны располагаются беспорядочно, их мощность варьирует от 10 до 15 м и лишь в глубоких карстовых воронках достигает 80 м. В трещинах коры выветривания и в серпентинитах встречаются мелкие жилы опала и халцедона, часто из-за примесей никеля окрашенных в зеленый цвет, иногда образуется полудрагоценный камень — хризопраз. Основные рудные минералы: пимелит, гарниерит и сухардит. Руды содержат 0,5—2,5 % Ni и 10—12 % Fe. Месторождение периодически эксплуатируется с 1891 г. Руды, добываемые в настоящее время содержат в среднем 0,7 % Ni.

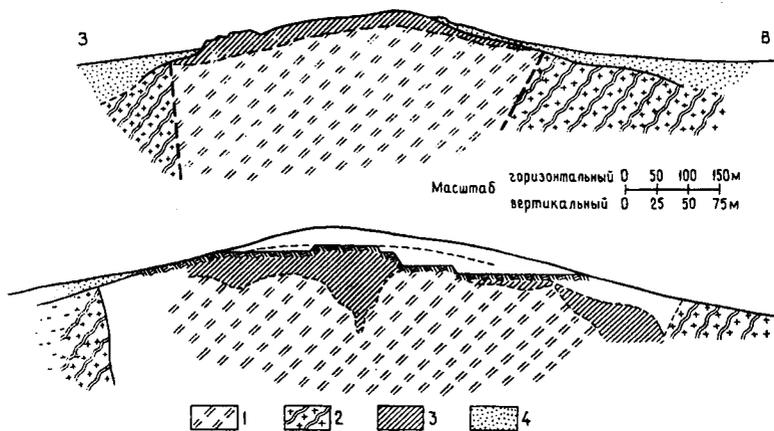


Рис. 15. Схематический геологический разрез через месторождение никелевых руд Шкляры (по А. Граничному):  
 1 – серпентиниты; 2 – вмещающие гнейсы; 3 – кора выветривания с никелевыми рудами; 4 – наносы (плейстоценовые и третичные отложения)

*Линейно вытянутые или трещинные месторождения* контролируются линиями относительно крупных разрывных нарушений и зонами повышенной трещиноватости, прослеживающимися в серпентинитах. Вдоль этих зон происходило интенсивное выветривание, проникавшее на большую глубину. Из циркулировавших по трещинам растворов отлагались растворенные в них вещества. Возникали охристо-кремнистые образования. Продукты выветривания часто располагались симметрично с зонами охр в центре. В составе этих зон наблюдаются «рудные», или «сетчатые», брекчии, а также каолинизированные и железненные серпентиниты, содержащие гидросиликаты никеля. Руды довольно богатые. Месторождения этого типа широко распространены в Новой Каледонии, имеются в Греции и России (Рогоженское, Бурыктальское, Аккермановское и др.).

*Месторождения контактово-карстового типа* приурочены к тектоническим контактам серпентинитов с известняками. Последние под действием воды легко выщелачиваются с образованием карстовых пустот, которые заполняются глинистыми продуктами выветривания серпентинита, сланцев и других пород. Силикаты никеля осаждаются в глинах карста, образуя налеты, натеки и прожилки. Примером ме-

сторождений этой группы, служит *Уфалейское месторождение*, приуроченное к тектоническому контакту известняков и серпентинитов. Руды сложены разрушенными серпентинитами, тальк-карбонатными породами, а также различными обломочными, глинистыми и охристо-глинистыми образованиями, в которых развиты гидросиликаты никеля и гидроксиды марганца. Преобладают собственно никелевые асболаны и псиломелан-вады.

**Рудопоявления Беларуси.** Медно-никелевые проявления, как правило, контролируются небольшими интрузиями ультраосновных-основных пород, развитых в пределах Смолевичско-Дрогичинской зоны Белорусского кристаллического массива и его южных склонов. Среди них выделяется одно рудопоявление — *Столбцовское*, расположенное в Минской области близ д. Стецки. Металлоносным является одноименный массив основных — ультраосновных пород русиновского комплекса, сложенный габбро, оливиновыми габбро и анортозитами, в верхней части преобразованными в сланцы хлорит-тремолит-актинолитового состава. Главными рудными минералами являются халькопирит и пирротин, второстепенными — пентландит, кубанит. Эти минералы присутствуют в виде тонкой рассеянной вкрапленности или нитевидных прожилков. Содержание их в породах обычно не превышает первых процентов, а мощность рудоносных зон колеблется от десятков сантиметров до 1–4 м. Концентрация меди в минерализованных зонах достигает 0,2–0,8 %, а никеля — 0,2–0,5 %. Прогнозные ресурсы никеля по категории P<sub>3</sub> оцениваются в 67 тыс. т. Поисковыми работами, проведенными в последнее десятилетие в пределах Столбцовского интрузива, богатых рудных зон с промышленными концентрациями Cu и Ni не выявлено.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОБАЛЬТА

### Краткие исторические сведения

Синие кобальтовые краски были известны и широко применялись в керамической и стекольной промышленности еще в глубокой древности, за 5000 лет до н. э. в Египте, Иране, Индии и других странах. Секрет их изготовления был утерян и лишь в XVI в. был найден вновь. История названия этого металла следующая. В средние века в Саксонии при добыче серебра иногда встречали руду очень похожую на серебряную, но получить из нее серебро никому не удавалось. Во время обжига из нее постоянно выделялся ядовитый газ, который отравлял рудокопов. Эту руду стали называть «кобальдом» по имени коварного горного духа (или подземного духа), якобы поселившимся в этом металле.

Сам металл кобальт, который так и не удалось получить саксонским рудокопам, впервые был выплавлен шведским химиком Г. Брандтом в 1735 г. Широкое использование его началось только в XX в. (после 1907 г., когда были впервые получены твердые сплавы — стеллиты).

Кобальт — тугоплавкий металл (температура плавления 1493 °С), ковкий, тягучий, устойчив к коррозии. Он имеет очень высокую точку Кюри (1121 °С), т. е. температуру, при достижении которой металл перестает быть магнитом.

### Геохимия

Кларк кобальта 0,003 %, коэффициент концентрации невысокий — 100. Содержание Co увеличивается от кислых ( $5 \cdot 10^{-4}$  %) до ультраосновных магматических пород примерно в 100 раз, хотя отношение Co/Ni в этом направлении уменьшается. В осадочных породах концентрация кобальта низкая и только в глинистых отложениях прибли-

жается к кларку (0,003 %, или 30 г/т), а в осадках, содержащих гидроксиды железа и марганца, в ряде случаев достигает 0,1–2,0 %. Кобальт представлен единственным стабильным изотопом  $^{59}\text{Co}$ . В простых соединениях наиболее устойчив  $\text{Co}^{2+}$ , в комплексных –  $\text{Co}^{3+}$ . Кобальт по сравнению с никелем геохимически ближе к  $\text{Fe}^{2+}$ .

На магматическом этапе кобальт концентрируется совместно с никелем в тесной генетической связи с ультраосновными и основными магмами. В гидротермальном процессе он вместе с  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  выносится растворами в виде сульфидных, галоидных и мышьяковых комплексных соединений. В экзогенных условиях при высоком окислительном потенциале кобальт переходит в трехвалентное состояние и концентрируется совместно с марганцем в зонах окисления мышьяковых и сернистых соединений. В корях выветривания гипербазитовых массивов он аккумуляруется в силикатных рудах никеля.

## Минералогия

Основными минералами первичных кобальтовых руд являются: кобальтистый пентландит, линнеит, кобальтин, глаукодот, саффлорит, скуттерудит. *Кобальтистый пентландит*  $(\text{Fe},\text{Ni},\text{Co})_9\text{S}_8$  (содержание Co до 3 %). Кобальт в пентландите изоморфно замещает никель и железо; минерал весьма характерен для сульфидных медно-никелевых руд ликвационных месторождений. *Линнеит*  $\text{Co}_3\text{S}_4$  (Co 57,96 %) (по фамилии шведского натуралиста Карла Линнея), кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов октаэдрический, розовато-белый, твердость 5,5, плотность 4,85 г/см<sup>3</sup>. Основной минерал руд Заира и Замбии. *Кобальтин*  $\text{CoAsS}$  (Co 35–41 %), кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов октаэдрический, кубический и додекаэдрический, цвет розовато-белый, блеск металлический, твердость 5,5, плотность 6,4 г/см<sup>3</sup>, характерен для руд гидротермальных месторождений. *Глаукодот*  $(\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$  (Co 23,85 %), кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов призматический, цвет зеленовато-синий, серовато-белый до красноватого, блеск металлический, твердость 5, плотность 6,2 г/см<sup>3</sup>. *Саффлорит*  $(\text{Co},\text{Fe})\text{As}_2$  (Co 28,23 %) кристаллизуется в монокли-

нальной сингонии, цвет оловянно-белый до свинцово-серого, блеск металлический, твердость 4,5–5, плотность 7,3 г/см<sup>3</sup>; распространен в гидротермальных месторождениях. *Скуттерудит*  $\text{CoAs}_3$  (Co 16–20 %) (по названию месторождения Скуттеруд в Норвегии), кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов кубический, октаэдрический, пентагондодекаэдрический, цвет белый, твердость 5,5–6, плотность 6,7 г/см<sup>3</sup>.

В зоне выветривания отмечаются скопления гидроксидов кобальта экзогенного происхождения – *асболана*  $m(\text{Co}, \text{Ni})\text{O}_2 \cdot n\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (Co до 19 %), а в зоне окисления эндогенных руд кобальта – *эритрина*  $\text{Co}_3\text{As}_3\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (Co 11–29 %).

## Применение в промышленности

Значительная часть кобальта (около 70 %) используется в производстве сплавов (с Ni, W, Mo и Cr), особенно магнитных, тугоплавких и специальных. В настоящее время эти сплавы применяются в производстве реактивных двигателей, ракет, газовых турбин и атомных реакторов. Кобальт – составная часть многих жаростойких и инструментальных сталей, идущих для изготовления фрез, сверл и другого инструмента. Кобальт и его соединения используются в лакокрасочной, керамической и стекольной промышленности, а также в производстве эмалированных изделий.

Радиоактивные изотопы кобальта, в частности <sup>60</sup>Co широко применяется для выявления дефектов в металлических изделиях, в металлургии (для контроля и регулирования расплавов в печах), в геофизической аппаратуре (облучение горных пород в скважинах). В медицине <sup>60</sup>Co (кобальтовые пушки) используются для лечения злокачественных опухолей.

## Ресурсы и запасы

Мировые ресурсы кобальта оцениваются в 12,5 млн. т. Большая их часть сосредоточена в латеритных никелевых (около 60 %) и стратиформных медно-кобальтовых (23 %) месторождениях.

Таблица 4

## Запасы кобальта (тыс. т) в некоторых странах

Страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание Со в рудах, %
Австралия	420	52	1,1	0,07
Ботсвана	70	56	1,15	0,06
Греция	120	90	1,9	0,04
Заир	2500	2000	41,6	0,31
Замбия	540	360	7,5	0,17
Индонезия	580	245	5,1	0,11
Казахстан	70	50	1,0	0,04
Китай	320	120	2,5	0,04
Куба	1800	1000	20,8	0,10
Нов. Каледония	860	230	4,8	0,07
П.–Нов. Гвинея	151	142	2,95	0,11
Россия	230	140	3,0	0,10

Общие запасы кобальта в мире составляют 9,8 млн. т, а подтвержденные — 4,8 млн. т. Ведущее место по запасам кобальта занимает Африка: на нее приходится 38 % общих и около 50 % подтвержденных мировых запасов. Наиболее крупными держателями запасов кобальта являются Заир, Куба и Замбия (табл. 4).

По разведанным данным месторождения кобальта подразделяются на уникальные (более 50 тыс. т), крупные (50–25), средние (25–10) и мелкие менее 10 тыс. т. Богатые руды содержат Со более 0,5 %, рядовые 0,5–0,1 % и бедные менее 0,1 %.

## Добыча и производство

Рудничное производство кобальта в 1995–2000 гг. составляло 28–30 тыс. т ежегодно. Добыча его в большинстве случаев осуществляется попутно с никелем и медью. Основными добывающими странами являются Замбия (7,9 тыс. т), Заир (2,0 тыс. т), Канада (5,8 тыс. т), Куба (1,9 тыс. т), Австралия (2,3 тыс. т) и Россия (3,5 тыс. т).

В Замбии и Заире кобальт извлекают из руд стратиформных медно-кобальтовых месторождений. Работы в этих стра-

нах ведут государственные компании «*Zambian Consolidated Copper Mines*» (ZCCM) и «*Gecamines*». На Кубе латеритные никелевые месторождения разрабатываются множеством государственных предприятий, а также канадской компанией «*Sherrit Gordon Ltd.*». Другая крупная канадская компания «*KWG Resources of Canada*» в 1997 г. заключила соглашение с правительством о завершении геологоразведочных работ и последующей разработке латеритного никелевого месторождения Купей, принадлежащего государственной компании «*Commercial Caribbean Nickel S. A.*». Предусматривается строительство ГОКа. Запасы руд этого месторождения составляют 107 млн. т при среднем содержании Ni 1,32 % и Co 0,115 %. В России основные объемы кобальта извлекают из сульфидных медно-никелевых руд месторождений Норильск-1, Талнахское и Октябрьское, расположенных в Норильском рудном районе, а также из аналогичных руд Ждановского и Заполярного месторождений Кольского полуострова. Эксплуатацию перечисленных месторождений осуществляет РАО «*Норильский никель*».

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

На ранней стадии геосинклинального этапа кобальт в небольших количествах концентрировался в кобальтсодержащих пиритах колчеданных месторождений и в кобальтсодержащих магнетитах скарновых месторождений. На средней и поздней стадиях развития геосинклиналей возникали гидротермальные месторождения кобальтовых месторождений. На стадии активизации платформ кобальт накапливался в сульфидных медно-никелевых рудах. На платформенном этапе образовывались стратиформные месторождения медистых песчаников с кобальтом, а также месторождения кор выветривания гипербазитовых массивов.

В истории развития земной коры отмечалось несколько эпох формирования кобальтовых месторождений, наиболее продуктивными из которых являлись докембрийская, мезозойская и кайнозойская. В *докембрийскую эпоху* сформировались крупные промышленные месторождения в Канаде (Кобальт, Садбери и др.), Замбии, Заире и Марокко. В Марокко разрабатываются месторождения Бу-Аззер и Эль-Граара. Рудные жилы этих месторождений при-

урочены к контакту докембрийских серпентинитов и диоритов. Кобальтовые минералы представлены кобальтином, скуттерудитом и смальтином.

В мезозойскую эпоху образовались месторождения в Южной Африке (Инсизва и др.) и России (Норильский рудный район, отдельные месторождения кор выветривания на Урале).

*Кайнозойская эпоха* ознаменовалась формированием никелевых месторождений, связанных с латеритными корами выветривания. Такие месторождения сосредоточены преимущественно на Кубе, в Новой Каледонии и Индонезии.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Известны следующие основные типы промышленных месторождений кобальта и кобальтсодержащих руд: 1) магматические, 2) скарновые, 3) плутоногенные гидротермальные, 4) стратиформные, 5) коры выветривания.

*Магматические месторождения* представлены сульфидными медно-никелевыми рудами ликвационного генезиса, концентрирующими кобальт. Эти руды являются комплексными и содержат относительно невысокие количества кобальта (около 0,1 % и менее). Из руд этого генетического типа извлекаются основные объемы кобальта в России, Канаде и ЮАР. Месторождения данного типа располагаются на щитах (Кобальт, Томпсон, Линн-Лейк и другие на Канадском щите, Мончегорское, Печенгское на Балтийском щите) или на платформах (Норильск-1, Октябрьское, Талнахское на Сибирской платформе; Бушвельд, Инсизва на Африканской платформе).

*Скарновые месторождения* – представлены, как правило, кобальтсодержащими магнетитами известковистых скарнов. Они известны в Казахстане (Соколовское и Сарбайское месторождения), в России (Высокогорское и Магнитогорское на Урале; Таежное в Восточной Сибири) и в некоторых других странах.

Рудные тела залегают обычно в зоне контактов интрузивных массивов и карбонатных пород и имеют пластообразную форму, реже штоко- и столбообразную. Размеры

рудных тел изменяются от первых сотен метров до 2 км по простиранию и от десятков метров до 1 км по падению при мощности от 1–5 до 200 м. Кобальт присутствует либо в виде изоморфной примеси к железу в сульфидных минералах (пирите, пирротине, арсенопирите, сфалерите, халькопирите) и магнетите, либо в виде минералов кобальта (в кобальтине, линнеите, глаукоде и др.). Кобальтоносность руд этих месторождений определяется главным образом присутствием в них кобальтистого пирита, содержащего до 1,5 % Со.

Примером может служить *Дашкесанское месторождение*. Площадь его сложена вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями средней и верхней юры, перемежающихся с горизонтами их туфов и туфоконгломератов (рис. 16). Комплекс этих отложений собран в пологую синклиналию складку, ядро которой прорвано серией пород гранодиоритовой магмы, сопровождающихся жильной фацией и более поздними дайками диабазовых и

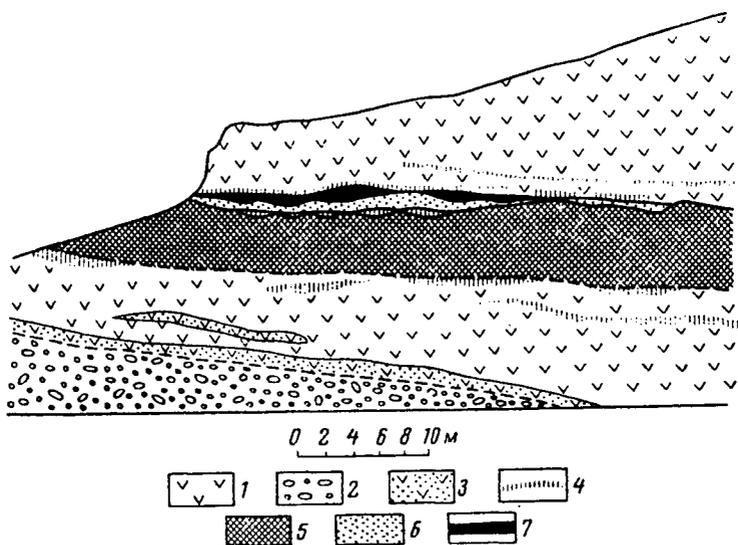


Рис. 16. Поперечный разрез скарновой залежи северо-восточного участка Дашкесанского месторождения (по Г. Крутову):  
 1 – порфириты и туфы; 2 – туфоконгломераты; 3 – ороговикованные породы; 4 – дашкесанитовые породы; 5 – магнетитовая руда; 6 – сульфидное оруденение; 7 – скопления кобальтовой руды

плагиоклазовых порфиристов. Над магнетитовой залежью наблюдаются скопления кобальтовой руды.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* обычно связаны с гранитоидными интрузивами, а вмещающие толщи представлены осадочными и метаморфизованными образованиями, реже скарнами и серпентинитами. В большинстве случаев рудные тела имеют форму жил и штоков-верков.

Месторождения кобальта этого типа распространены в Марокко (Бу-Аззер), Чехии (Яхимов), США (Блэкбирд), Канаде (Эльдорадо), России (Ховуаксы), Австралии (Маунт-Кобальт). Среди них известны следующие рудные формации: 1) *смальтин-хлоантит-никелин-аргентитовая* (Ховуаксы, Кобальт), 2) *арсенопирит-глаукоdot-кобальтиновая* (Дашкесан-Кобальт), 3) *пятиэлементная формация Co-Ni-Bi-Ag-U* (Эльдорадо).

Типичным представителем этого генетического типа является *месторождение Ховуаксы*, расположенное в Туве. Район месторождения сложен осадочными породами кембрия и силура, представленными алевролитами и песчаниками с прослоями известняков. Породы смяты в складки и прорваны дайками различного состава. Отдельные горизонты осадочной толщи подверглись скарнированию. Оруденение связано с субмеридиональным крупноамплитудным разломом и оперяющимися его трещинами свола. Рудные тела представлены жилами, часто пересекающимися скарны. Главные рудные минералы: никелин, смальтин, хлоантит, скуттерудит, раммельсбергит и саффлорит, жильные — кальцит и доломит. Текстуры руд полосчатые, брекчиевидные, прожилковые и вкрапленные, структуры — кристаллические, радиально-лучистые и колломорфные.

*Стратиформные месторождения* кобальтсодержащих медистых песчаников известны в Замбии (Чамбиши, Нчанга) и Заире и имеют большой удельный вес в мировой добыче кобальта. Они приурочены к Катанга-Родезийскому меденосному поясу, который простирается в юго-восточном направлении от района Колвези в Катанге (Заир) до рудника Бвана-Мкубва в Замбии. Месторождения отличаются исключительно высоким качеством руд, в которых наряду с медью в значительных количествах содержится кобальт и другие полезные компоненты. Оруденение приурочено к рудной серии системы катанга (верхней протерозой).

В Замбии рудоносные горизонты представлены главным образом слабо метаморфизованными и дислоцированными сланцами, аргиллитами, полевошпатовыми песчаниками и кварцитами (рис. 17).

В Заире рудоносны доломиты или доломитовые сланцы, претерпевшие более интенсивную складчатость и разбитые серией продольных и поперечных сбросов, вплоть до образования надвигов. Здесь месторождения часто располагаются в гребнях антиклинальных структур. Рудные залежи имеют, как правило, пластообразную форму и залегают согласно с вмещающими породами. В связи с проявлением интенсивной складчатости они нередко выходят на земную поверхность и поэтому доступны для открытой разработки. Эксплуатируются преимущественно окисленные руды, в которых среднее содержание меди составляет 4–7%. Кобальт концентрируется главным образом в зоне окисления, где на отдельных наиболее обогащенных участках руды содержат в среднем 1–2% кобальта. Кроме меди и кобальта в них присутствуют в промышленных концентрациях цинк, платина, кадмий, германий, серебро, уран и другие полезные компоненты.

Месторождения кор выветривания кобальтсодержащих никелевых руд приурочены к коре выветривания серпен-

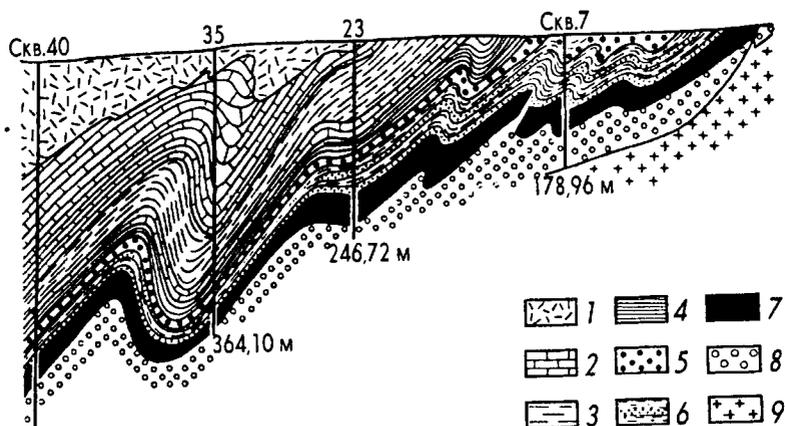


Рис. 17. Разрез месторождения Чамбиши (по Ф. Мендельсону):  
 1 – габбро; 2 – доломиты; 3 – песчаные сланцы; 4 – кварциты и сланцы; 5 – верхний горизонт кварцитов; 6 – кварциты висячего бока; 7 – сульфидные руды; 8 – кварциты лежащего бока; 9 – граниты

тинитов. Кобальтсодержащие гидроксиды марганца встречаются во всех зонах профиля выветривания площадного типа, но наиболее обогащены кобальтом верхние горизонты обожженных и нонтронизированных серпентинитов. В месторождениях линейного типа обогащение оксидами марганца, содержащими Co и Ni, происходит в зонах охр и брекчий, совпадающих с контуром промышленных никелевых руд. Отношение Co/Ni в асболанах площадной коры выветривания приближается к единице, однако в среднем для руд кор выветривания составляет 1:20–1:10.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ

### Краткие исторические сведения

Медь была известна человеку уже в начале седьмого тысячелетия до н. э. (на Ближнем Востоке и на территории Турции). Первыми медными рудами, очевидно, были самородки, встречающиеся довольно часто. Наиболее крупный в мире самородок меди был найден в районе оз. Верхнего в США и достигал 500 т. Во втором тысячелетии до н. э. начал применяться сплав меди с оловом (бронза), на Кавказе — сплавы меди с мышьяком, а в Средней Азии — сплавы меди со свинцом. Населению Европы с давних пор были известны залежи меди на Кипре. Полагают, что от слова Кипр и возникло латинское название меди «купрум».

В начале XIX в. добыча меди во всем мире составляла около 18000 т. Россия при Петре I несколько десятилетий занимала первое место по выплавке меди.

Медь — это металл красного цвета, обладающий хорошей ковкостью, тягучестью, электропроводностью, сплавляемостью с другими металлами, легкоплавкий (температура плавления 1083 °С).

### Геохимия

Кларк меди 0,01 %. Повышенные ее содержания наблюдаются в основных породах ( $1,4 \cdot 10^{-2}$  %), пониженные в гранитах ( $3 \cdot 10^{-3}$  %). Коэффициент концентрации меди 200. Она представлена двумя изотопами:  $^{65}\text{Cu}$  и  $^{69}\text{Cu}$ .

Медь — типичный халькофильный элемент и чаще всего встречается в виде сульфидов. В природных условиях она одно- и двухвалентна. Двухвалентная медь характеризуется высокой миграционной способностью в восстановительных условиях и реагирует с ионами  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  и  $\text{VO}_4^{3-}$ , образуя фосфатные, карбонатные и силикатные соединения.

При базальтовом магматизме медь концентрируется в гипербазитах, образуя ликвационные и скарновые месторождения, а на поствулканическом этапе она ассоциирует с колчеданными образованиями.

## Минералогия

В природе известно более 240 минералов меди, из которых около 200 встречаются в коре выветривания. Однако промышленное значение имеют не более 17 минералов. Главными среди них являются: самородная медь, халькопирит, борнит, кубанит, халькозин, ковеллин, энаргит, тетраэдрит, теннантит, куприт, тенорит, малахит, азурит и др.

*Самородная медь* (содержание Cu до 100 %) кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов кубический и додекаэдрический, образует дендриты, нитевидные, проволочные, моховидные агрегаты, порошковые выделения, конкреции, сплошные массы, цвет розоватый и медно-красный с бурой и пестрой побежалостью, твердость 2,5–3, плотность 8,4–8,9 г/см<sup>3</sup>.

*Халькопирит*  $\text{CuFeS}_2$  (Cu 34,6 %). Известны две его модификации: тетраэдрическая и кубическая – высокотемпературная. Цвет минерала золотисто-желтый, часто с бурой побежалостью, блеск металлический, встречается в скарнах, ликвационных медно-никелевых, свинцово-цинковых, вольфрам-молибден-оловянных и колчеданных месторождениях, а также в медистых песчаниках и в месторождениях фосфоритов.

*Борнит* (по фамилии Борн)  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  (Cu 63,3 %). Образует несколько полиморфных модификаций: тетрагональную – низкотемпературную, тригональную – метастабильную при низкой температуре, кубическую – стабильную выше 228 °С. Габитус кристаллов кубический, додекаэдрический, реже октаэдрический, цвет темно-бронзовый с пестрой побежалостью, блеск металлический, твердость 3, плотность 5,3 г/см<sup>3</sup>.

*Кубанит* (по о. Куба)  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$  (Cu 22–24 %) кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов удлиненный, толстотаблитчатый, бронзово-желтого цвета, блеск металлический, плотность 4,16 г/см<sup>3</sup>. Встречается в сульфидных медно-никелевых месторождениях с пирро-

тином и халькопиритом в колчеданных рудах, изредка в жильных и полиметаллических месторождениях.

*Халькозин*  $\text{Cu}_2\text{S}$  (Cu 79,9 %). Известны две полиморфные модификации: ромбическая — низкотемпературная и менее распространенная гексагональная — высокотемпературная. Габитус кристаллов короткопризматический, таблитчатый, дипирамидальный, цвет свинцово-серый, твердость 2,5–3, плотность 5,8 г/см<sup>3</sup>. Встречается в медных месторождениях с борнитом, халькопиритом и другими сульфидами.

*Ковеллин* (по фамилии Ковелли)  $\text{CuS}$  (Cu 66,5 %), кристаллизуется в гексагональной сингонии, габитус пластинчатый, агрегаты землистые, порошковые, сажистые, цвет индигово-синий до черного с радужной побежалостью, твердость 1,5–2, плотность 4,6 г/см<sup>3</sup>.

*Энарцит*  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$  (Cu 48,3 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы призматические или таблитчатые, агрегаты зернистые, цвет сероватый до железо-черного, черта серовато-черная, твердость 3,5, плотность 4,3–4,5 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гидротермальных, обычно средне-температурных медноколчеданных, меднопорфировых, пирит-энарцитовых, свинцово-цинковых, серебряно-медных и других месторождениях.

*Тетраэдрит* (по форме кристаллов)  $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  (Cu 52,3 %). Известны следующие его разновидности: серебросодержащая — *фрейбергит*; ртутьсодержащая — *швацит*, *аптонит*, *ртутная блеклая руда*; цинксодержащая — *зандбергерит*, *цинковая блеклая руда*; железосодержащая — *ферротетраэдрит*, *коппит*; никелисодержащая — *фригидит*, *никелевая блеклая руда*; теллурсодержащая — *голдфилдит*; свинецсодержащая — *малиновскит* и др.

*Домейкит* (назван по фамилии выходца из Беларуси Игнасио Домейко)  $\text{Cu}_3\text{As}$  (Cu 71,1 %). Известны две полиморфные модификации — кубическая и гексагональная с температурой перехода 225 °С. Агрегаты плотные, почковидные и гроздьевидные, цвет серебристо-белый, серый с желтовато-бурой побежалостью, твердость 3–3,5, плотность 7,5 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гидротермальных месторождениях в ассоциации с самородными медью и серебром, сульфидами меди и арсенидами никеля и кобальта.

## Применение в промышленности

Широкое использование меди основано на ее высокой электропроводности, химической устойчивости, ковкости и других свойствах. Она находит применение в машиностроении, химической промышленности (перегонные котлы, змеевики, трубы), электротехнике, судостроении, гравировании, выделке монет и во многих других отраслях промышленности. Так, например, в США и Великобритании на производство одного легкового автомобиля используется до 20 кг меди.

В настоящее время основная масса меди идет на изготовление сплавов, важнейшие из которых — бронзы и латуни. Бронзы состоят не только из меди и олова в различных соотношениях; в некоторые сорта добавляют свинец, цинк, фосфор, кремний и другие компоненты. Латуни состоят из сплава меди (60–80 %) с цинком (20–30 %).

Промышленные требования к рудам со временем изменяются в сторону понижения в них меди. Так, еще в начале XX в. разрабатывались только богатые руды с содержанием Cu 5–15 % и более, в настоящее время при подземной разработке крупных месторождений содержание меди должно быть не менее 1 %, мелких — около 3 %, при обработке карьерами — 0,2–0,7 %, а из комплексных полиметаллических руд медь извлекается при содержании 0,1 % и более.

## Ресурсы и запасы

В настоящее время ресурсы меди выявлены более чем в 90 странах. По данным *Геологической службы США* они оцениваются 1,6 млрд. т. Основу минерально-сырьевой базы медедобывающей промышленности мира составляют месторождения трех геолого-промышленных типов: меднопорфировые; стратиформные в медистых песчаниках и сланцах; медноколчеданные и колчеданно-полиметаллические. Общие запасы меди в мире — 932,6 млн. т, подтвержденные — 668,3 млн. т. Основные объемы их сосредоточены в недрах Чили, США, Перу, Китая и Казахстана (табл. 5). Данные о запасах меди в России отсутствуют.

Таблица 5

## Запасы меди (тыс. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание Cu в рудах, %
<b>ЕВРОПА</b>	80002	47028	7	...
Польша	36000	22200	3,3	1,69
<b>АЗИЯ</b>	226699	169931	25,4	...
Армения	6539	6273	0,9	0,29
Афганистан	8470	6050	0,9	2,09
Индонезия	23880	21915	3,3	1,28
Иран	15100	10150	1,5	1,10
Казахстан	41497	36979	5,5	0,46
Китай	56200	38000	5,7	0,87
Монголия	9340	9250	1,4	0,80
Узбекистан	16958	16238	2,4	0,39
Филиппины	13965	11138	1,7	0,44
<b>АФРИКА</b>	83348	57248	8,6	...
Заир	25783	23650	3,5	3,97
Замбия	30703	18000	2,7	2,75
ЮАР	13000	7500	1,1	–
<b>АМЕРИКА</b>	509028	364593	54,6	–
Аргентина	20139	16236	2,4	0,70
Бразилия	18120	16670	2,5	0,90
Канада	33732	21836	3,3	0,74
Мексика	22875	17247	2,6	0,51
Панама	31295	13500	2,0	0,77
Перу	45977	37438	5,6	0,85
США	117559	77516	11,6	0,65
Чили	208866	158440	23,7	1,01
<b>ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ</b>	33509	29490	4,4	–
Австралия	19262	15866	2,4	2,44
П.-Нов. Гвинея	10247	9624	1,4	0,54

По оценке «*Metals Economics Group*» (MEG) затраты на геологоразведочные работы, проведенные горнорудными компаниями на цветные и благородные металлы в мире в 1995–2000 гг., ежегодно составляли 4–5 млрд. долларов США. Из них около 18–19 % приходилось на медь. В Чили основными направлениями геологоразведочных работ являлись доизучение и подготовка к освоению ранее не раз-

рабатывавшихся месторождений, а также работы, направленные на прирост запасов действующих рудников.

К уникальным относятся месторождения с запасами меди более 5 млн. т, к крупным — 5–1 млн. т, средним — 1–0,2 млн. т и мелким — менее 0,2 млн. т.

## **Добыча и производство**

Заводы выпускают черновую (99,0 %), рафинированную (99,6 %) и электролитическую медь (99,95 %). Производство меди в мире в 1995–2000 гг. составляло ежегодно около 10–11 млн. т, причем около 45 % выпуска ее пришлось на долю двух стран — Чили и США.

В России основу минерально-сырьевой базы медедобывающей промышленности составляют медно-никелевые руды месторождений Норильского района и Кольского полуострова (месторождение Ждановское). Разрабатываются также относительно небольшие месторождения в Челябинской (Новоучалинское) и Оренбургской (Гайское) областях. Обеспечение потребностей России в меди на перспективу возможно за счет сооружения крупного горнодобывающего предприятия на базе Удоканского месторождения медистых песчаников.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

На ранней стадии геосинклинального развития в связи с базальтоидным магматизмом образовывались относительно крупные колчеданные месторождения, а в конце этой стадии в связи с плагиигранитами — скарновые и ранние месторождения меднопорфировых руд. Средняя стадия геосинклинального этапа являлась малопродуктивной для меди. На поздней стадии формировалась главная масса гидротермальных месторождений, среди которых основное значение имеют поздние меднопорфировые. В это же время возникали стратиформные месторождения медистых песчаников, пространственно тесно связанных с молассовыми отложениями.

На платформенном этапе в терригенных осадках чехла формировались месторождения медистых сланцев и пес-

чаников, а на активизированных платформах — магматические сульфидные медно-никелевые месторождения.

Месторождения меди возникали в различные геологические эпохи и образовывались в разнообразных геологических обстановках. В *докембрийскую эпоху* сформировались крупные месторождения стратиформных медистых песчаников на Африканской (Катанга-Родезийский медный пояс) и Сибирской (Удоканское месторождение) платформах, магматических медно-никелевых руд на Канадской, Восточно-Европейской, Сибирской и Африканской платформах. Для этих месторождений характерен комплексный состав руд, в которых наряду с медью промышленное значение имеют Ni, Co, а также Zn, Pb, Ag, Au, Pt.

В *раннепалеозойскую (каледонскую) эпоху* образовывались в основном медно-колчеданные месторождения в Норвегии (Сулительма, Леккен, Гронг, Фоллаль и др.), Канаде (на о. Ньюфаундленд), в России на Урале, а также в Центральном Казахстане. По масштабам оруденения это, как правило, средние или мелкие месторождения. Удельный вес их в мировых запасах и добыче незначителен.

В *позднепалеозойскую (герцинскую) эпоху* промышленное медное рудообразование наиболее интенсивно проявилось на территории СНГ. Месторождения меди этого возраста широко представлены в России на Урале, Казахстане (Кунрад) и Узбекистане (Алмалык). В дальнем зарубежье крупные месторождения известны в Испании (Рио-Тинто и Тарсис), Португалии, Германии, Польше и Китае.

*Мезозойская эпоха* ознаменовалась образованием крупных медно-никелевых месторождений на Канадской, Сибирской и Африканской платформах, а также меднопорфировых и колчеданных в складчатых областях Закавказья и Балкан.

В *кайнозойскую эпоху* образовалась значительная часть мировых ресурсов меди (более 50 %), сосредоточенных главным образом в прожилково-вкрапленных меднопорфировых рудах. Меднопорфировые месторождения отличаются крупными размерами и масштабами оруденения. Большинство ресурсов руд этого типа сосредоточено в Тихоокеанском поясе, в пределах которого особенно выделяются месторождения Чили (Чукикамата, Эль-Тениенте), Перу (Токепала), Панама (Серра-Колорадо), США (Сан-Мануэль). В Океании наиболее крупным является месторож-

дение Пангуна на о. Бугенвиль (Папуа-Новая Гвинея). Запасы его превышают 900 млн. т руды, содержащей 0,48 % Cu и 0,04 % Mo. В СНГ крупнейшие месторождения этого возраста находятся в Армении – Каджаран и Агарак.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Медь концентрируется в месторождениях всех известных генетических групп, за исключением пегматитовой. Промышленное значение имеют месторождения: 1) магматические, 2) карбонатитовые, 3) скарновые, 4) плутоногенные гидротермальные, 5) вулканогенные гидротермальные, 6) колчеданные, 7) стратиформные.

*Магматические месторождения.* В этой группе важное экономическое значение имеют *ликвационные месторождения сульфидных медно-никелевых руд*, пространственно и генетически тесно связанных с интрузивами основного и ультраосновного состава (габбро, нориты, пироксениты, перидотиты, оливиновые диабазы и др.), расположенными в фундаменте докембрийских щитов или в осадочно-эффузивных толщах платформенных чехлов. Медь накапливается к концу процесса рудообразования в связи с выделением халькопирита, борнита, миллерита. Больше других обогащены минералами меди экзоконтактные зоны интрузий. Минеральный состав руд сульфидных медно-никелевых формаций достаточно сложный. Преобладают пирротин, пентландит, халькопирит и талнахит, подчиненное значение имеют миллерит, пирит (обычно кобальтсодержащий), магнетит, кубанит, арсениды кобальта и никеля, минералы группы платины (сперрилит, куперит, стибипалладинит, палладистая платина), золото и др. Из этих руд извлекаются, помимо меди (содержание 1–2 % и более) и никеля, также кобальт, золото, платиноиды и рассеянные элементы. Месторождения этого типа охарактеризованы в главе 6 «Месторождения никеля».

Наряду с медно-никелевыми к магматическим относятся также *медно-титановые месторождения*, ассоциирующие с массивами габбро. Типичным примером является *Волковское месторождение* на Урале, расположенное близ г. Красноуральска. Здесь в массиве габбро развиты вкрап-

ленные руды, представленные халькопиритом, борнитом и ванадийсодержащим титаномагнетитом. Минерализация подвергнута апикальная часть интрузива габбро. Руды характеризуются вкрапленными и пятнистыми текстурами и образуют гнезда размером в несколько метров, изометрические участки с диаметром в первые десятки метров и зоны, вытянутые в субмеридиональном направлении на сотни метров.

*Карбонатитовые месторождения.* Халькопирит и другие медные минералы в небольшом количестве наблюдаются в рудах многих карбонатитов, но промышленные скопления их известны только в массиве *Палабор* в северо-восточном Трансваале (ЮАР). С 1930 г. карбонатиты массива разрабатывались на фосфор, а добыча медных руд началась с 1962 г. Это одно из крупнейших медных месторождений Африки. Суммарные запасы медных руд до глубины 360 м оцениваются в 315 млн. т, при среднем содержании Cu 0,69 %. Карбонатиты слагают трубообразное тело размером 350 x 650 м, прослеживающееся среди ультраосновных пород на глубину 1000 м. Центральная часть его сложена карбонатитами, а периферическая — магнетит-апативыми рудами. Главные минералы: борнит, образовавшийся в первую стадию минералообразования, и халькопирит, выделившийся во вторую стадию; второстепенные — халькозин, валлериит, кубанит и магнетит. Руды комплексные. Помимо меди, магнетита и апатита из руд извлекают также U, Th, Au и Ag. Сульфидный концентрат содержит 1,77 г/т Au и 43,4 г/т Ag. Годовая добыча руды составляет около 12 млн. т, а годовое производство меди 80 тыс. т.

*Скарновые (контактово-метасоматические) месторождения* меди распространены достаточно широко. Однако крупные рудные объекты встречаются редко. Они образуются метасоматическим путем при взаимодействии восходящих высокотемпературных растворов с карбонатными и контактирующими с ними силикатными породами. Рудные тела обычно располагаются в контактах карбонатных и силикатных пород, причем силикатные породы часто представлены эффузивами. Минералы меди выделяются в несколько стадий: в раннюю — вместе с магнетитом, в позднюю — наряду с сульфидами и в завершающую — преимущественно с галенитом и сфалеритом. Рудные тела,

как правило, не имеют четких границ; последние устанавливаются по данным опробования.

Главными рудными минералами являются халькопирит, пирротин, пирит и магнетит; нерудные — представленные гранатом, пироксеном, эпидотом, хлоритом, кварцем и карбонатами. Содержание меди обычно высокое (3–10 %), но неравномерное.

К скарновому типу относятся месторождения в России на Урале (Турьинская группа), в Западной Сибири (Юлия, Антоновское, Глафириновское), в Казахстане (Саяк I), США (Моренси, Бисби, Клифтон), Мексике (Долорес) и др.

В качестве примера охарактеризуем месторождение *Саяк I*. Оно расположено в Северо-Западном Прибалхашье. Район месторождения сложен вулканогенно-осадочными отложениями карбона, среди которых залегает пачка известняков мощностью до 150–200 м. Породы формируют асимметричную антиклиналь, восточное крыло которой прорвано гранитоидами и дайками (рис. 18). Антиклиналь осложнена серией сбросов-сдвигов. В экзоконтакте интрузии развиты гранат-пироксеновые скарны, образовавшиеся по известнякам и формирующие зоны длиной до 3 км и шириной 0,5–1 км. На месторождении развиты два типа рудных тел: линзообразные мощностью до 10–15 м и зоны прожилково-вкрапленных руд в гранитоидах. Главные минералы первичных руд: халькопирит, магнетит, борнит, пирротин, арсенопирит и кобальтин. Помимо меди руды содержат Mo, Au, Co, Hg, Bi, Te и Se.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения.* Они связаны обычно с гипабиссальными порфиристыми интрузиями умеренно-кислого состава, реже с гранитоидами. Среди них выделяют медно-порфиристые и жильные.

*Медно-порфиристые месторождения* представляют крупные скопления небогатых медных или молибден-медных руд штокверкового типа в порфиристых интрузиях. Они приурочены, как правило, к участкам пересечения разломов, флексурам, антиклиналям и вулкано-купольным структурам. Рудные тела — это чаще всего штокверки овальной или кольцевой формы в плане, цилиндрической или конической в разрезе. Штокверки имеют длину 2–3 км при ширине 0,7–1,5 км. Вертикальный размах оруденения 300–500 м и более. Руды представлены тонкой сетью кварцевых и кварц-полевошпатовых прожилков мощностью от долей

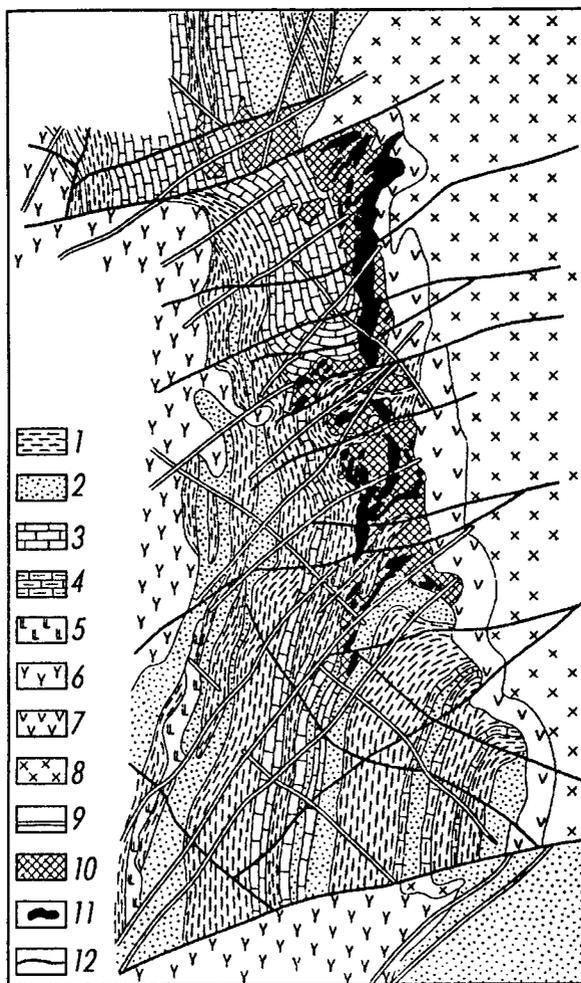


Рис. 18. Схематическая геологическая карта месторождения Саяк I (по Г. Бурдукову и Ю. Тарнавскому):

1-4 — ниже-среднекаменноугольные отложения: 1 — туфоалевролиты, 2 — песчаники, 3 — известняки, 4 — известковистые туфоалевролиты; 5 — субвулканические тела диорит-порфиритов, 6 — пермские (?) эффузивы среднего и основного состава; 7-8 — верхнекаменноугольные интрузивные породы: 7 — диориты, 8 — гранодиориты и кварцевые диориты; 9 — дайки диоритовых и диабазовых порфиритов, гранодиорит-порфиритов, 10 — скарны, 11 — рудные тела, 12 — тектонические нарушения

миллиметра до первых сантиметров, содержащих сульфиды, которые образуют также вкрапленность и небольшие гнезда.

Главные минералы первичных руд: халькопирит и пирит; второстепенные – молибденит, борнит, энаргит, халькозин, блеклые руды, галенит, сфалерит и др. Среднее содержание меди в первичных рудах относительно невысокое – 0,2–0,7 %, в зоне вторичного обогащения увеличивается до 1–1,5 %. Попутно извлекаются молибден (0,005–1,05 %), Se, Te и Re.

Медно-порфировые месторождения известны во многих странах: Чили, Перу, Мексике, США, Филиппинах, Болгарии, Армении, Казахстане, России и др. Выделяются три планетарных пояса распространения медно-порфировых руд: 1) – Тихоокеанский (Чили, Перу, Мексика, США, Канада) – мезо-кайнозойский; 2) Средиземноморский – кайнозойский, совпадающий с областью альпийской складчатости (Сербия, Болгария, Армения, Турция, Иран, Афганистан, Пакистан, северная часть Индии); 3) Казахстанско-Монгольский – герцинского и частично каледонского возраста (Казахстан, Узбекистан, Россия (Тува), Монголия и Китай).

В настоящее время основные объемы рудничного производства меди в мире связаны с медно-порфировыми рудами. Наиболее значительные ресурсы и запасы руд этого типа сосредоточены в Чили, где известен ряд уникальных и крупных месторождений: Чукикамата, Эль-Абра и др. Для этих месторождений характерна связь их с порфировыми породами (диоритовые, гранодиоритовые, монцититовые порфиры). Рудоносные штокверки сформировались в измененных порфирах и в интродуцированных ими породах. На большинстве месторождений развиты трубообразные тела брекчий. Главными рудными минералами являются халькопирит, борнит и халькозин, второстепенными – молибденит и энаргит. Наибольшую промышленную ценность представляют руды зоны окисления и ковеллин-халькозин-борнитовые руды вторичного сульфидного обогащения.

*Месторождение Чукикамата* открыто в 1915 г. Расположено в пустыне Атакама, примерно в 140 км от Тихоокеанского побережья, на высоте 2 000 м над уровнем океана. Оно приурочено к олигоценовому интрузиву монцитит-порфи-

ров (возраст 28 млн. лет), который на востоке прорывает юрские гранодиориты Елена, а на западе по разлому граничит с палеогеновыми гранодиоритами Форчуна (рис. 19).

Рудное тело представлено штокверком, протягивающимся с севера на юг на 3 км при ширине 0,8 км. Харак-

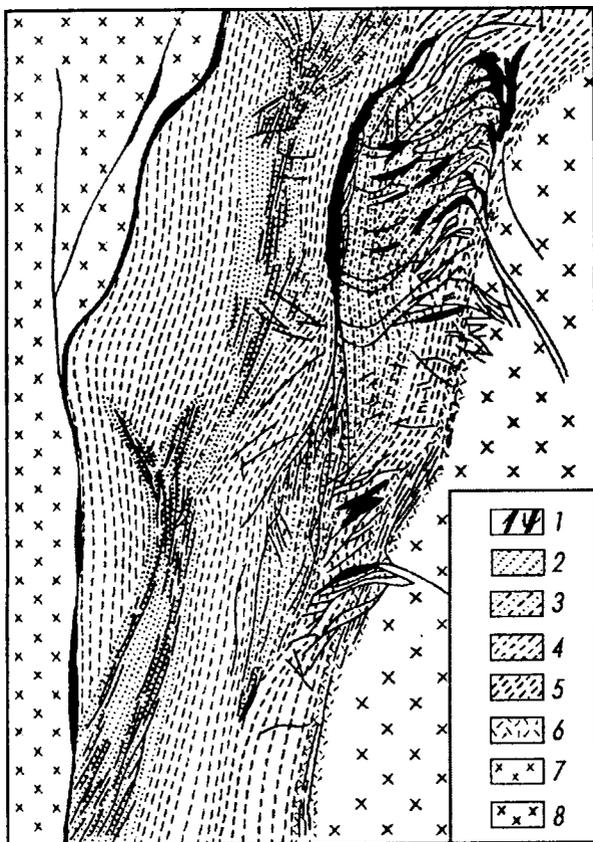


Рис. 19. Схема геологического строения медно-порфирового месторождения Чукикамата (по В. Лопесу и В. Перри):

1 – рудные жилы и прожилки (штокверковая зона); 2–6 – измененные палеогеновые монцонитовые порфиры: 2 – окварцованные, 3 – серичитизированные и слабо окварцованные, 4 – интенсивно серичитизированные, 5 – альбитизированные и серичитизированные, 6 – хлоритизированные и альбитизированные; 7 – палеогеновые гранодиориты (Форчуна), 8 – юрские гранодиориты (Елена)

терно развитие густой сети минерализованных прожилков и ветвящихся жил. Главные минералы первичных руд: пирит, энаргит и халькопирит; второстепенные — борнит, сфалерит, галенит, молибденит. Вмещающие породы интенсивно изменены гидротермальными процессами (преимущественно серицитизированы, отчасти окварцованы и хлоритизированы). Первичные руды подверглись гипергенным изменениям. На месторождении хорошо проявляется вертикальная зональность: 1) зона оксидных руд (с содержанием Cu около 1,3 %) до глубины 200 м; 2) зона вторичного сульфидного обогащения (Cu 1,5–2 %) до глубины 700 м; 3) зона первичных сульфидных руд (Cu 1,3–1,9 %) (рис. 20). В зоне окисления, которая формировалась в условиях чрезвычайно сухого климата, главными медными минералами являются антлерит, хальколит и кренкит. На месторождении уже добыто более 15 млн. т меди. В добываемых рудах преобладают оксидные разности, которые перерабатываются гидрометаллургическим методом. Месторождение разрабатывается в основном открытыми горными работами. Производительность горнорудного предприятия в сутки составляет 60 тыс. т руды, годовая — 20 млн. т, выпуск меди — 300 тыс. т, молибдена — 2,5 тыс. т при содержании этих металлов соответственно 2,0 и 0,037 %

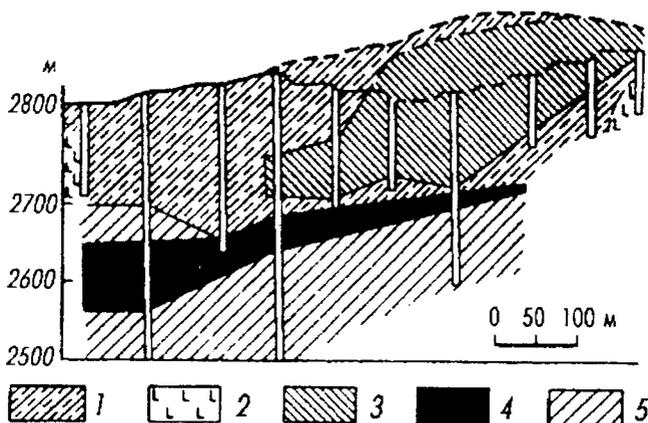


Рис. 20. Разрез месторождения Чукикамата (по А. Тэйлору): 1 — выщелоченные пустые породы; 2 — гранодиориты; 3 — оксидные руды; 4 — смешанные руды; 5 — сульфидные руды

(извлечение их 80 и 40 %). Содержание в одноименных концентратах меди составляет 50 %, молибденита 92 %.

Государственная компания «Codelco» в 1999 г. начала работы по доизучению нового участка Чуки-Норте с запасами медно-порфириновых руд 5,4 млн. т меди, расположенного в рудном районе Чукикамата. Его освоение должно компенсировать истощение запасов на эксплуатируемом руднике Мина-Сур, входящем в горнодобывающий комплекс Чукикамата.

*Жильные месторождения* распространены довольно широко, но крупные объекты встречаются редко. Они известны в Казахстане (Жайсанское, Чатыркульское), Болгарии (Росен, Вырли Бряг), США (Магма, Бьютт) и в других странах. Вмещающими породами являются гранитоиды, реже вулканогенные, осадочные и метаморфические породы. Оруденение приурочено, как правило, к трещинам скола. Рудные жилы, обычно крупные, прослеживаются в длину на сотни метров – первые километры, мощность их варьирует от 0,3 до 10 м и более. Главные рудные минералы: халькопирит и энаргит, второстепенные – магнетит, гематит, пирит, халькозин, борнит, молибденит. Руды формировались в несколько стадий. Близ земной поверхности они часто окислены.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения.* К этой группе относятся месторождения самородной меди в эффузивах и субвулканических образованиях. Они известны в США, Дании (Фарерские острова), Иране (Мескани, Талмеси, Даман-Джала), России (на Урале и Кольском полуострове). Характерными особенностями этого типа месторождений являются: 1) приуроченность их к вулканогенным толщам (базальтам и антезито-базальтам, осложненным разрывными нарушениями; 2) преимущественно пластообразная форма рудных тел; 3) простой минеральный состав руд – самородная медь в ассоциации с хлоритом, эпидотом, серицитом, цоизитом, кварцем, кальцитом, датолитом, реже халькозином.

Типичными представителями этой группы являются *месторождения района оз. Верхнего* (США). Промышленная разработка медных руд здесь началась в 1845 г. К настоящему времени запасы истощены (было добыто более 5 млн. т меди). Месторождения меди приурочены к верх-

ним амигдалоидным (миндалекаменным) частям отдельных лавовых покровов и к пластам конгломератов, объединяемым в лавовую серию Портедж-Лейк. В Мичиганском меднорудном районе мощность этой толщи, сложенной несколькими сотнями базальтовых покровов, составляет не менее 5000 м, а в других районах оз. Верхнего достигает 10000 м. Скопления самородной меди выполняют миндалины в верхних частях покровов, а также наблюдаются в конгломератах.

Главные рудные залежи, как правило, пластообразные. Однако большинство месторождений приурочено к перегибу пластов вблизи надвига Кивино. Оруденение контролируется разрывными нарушениями, параллельными этому надвигу. Форма рудных столбов, залегающих в верхних частях лавовых покровов, разнообразна. Местами столбы сильно удлинены. Ширина их колеблется от 30 до 150 м, а протяжение – от 100 до 1000 м.

Единственный полезный рудный минерал – самородная медь, иногда ей сопутствует самородное серебро (не более 0,1 % от содержания меди). Спорадически встречаются халькозин и арсениды меди. Первичные выделения самородной меди представлены мелкими или крупными зернами, рассеянными в амигдалоидной лаве или конгломератах. Нередко наблюдаются самородки меди массой от 500 г до многих тонн. Самородная медь местами образует тесные взаимные прорастания с пренитом и датолитом.

Оруденение пространственно связано с зонами метаморфизма – с ореолами развития кварца, эпидота и пренита во вмещающих породах. Главный фактор, определивший форму и размеры рудных тел, – проницаемость пород. Амигдалоидные горизонты и пласты осадочных пород подвергались более интенсивной хрупкой деформации по сравнению с массивными породами. Это создавало благоприятные условия для просачивания растворов и рудоотложения. Медное оруденение эпигенетично.

*Колчеданные месторождения.* Это, как правило, средне-температурные образования малых глубин. Они формируются на ранних этапах развития геосинклинальных складчатых областей и залегают обычно среди вулканогенных образований, реже в других породах. Месторождения пространственно связаны с малыми субвулканическими ин-

трузиями кварцевых порфиров, гранодиорит-порфиров, дацитов и диабазов, которые в свою очередь, располагаются вдоль протяженных глубинных разломов. Промышленное оруденение контролируется брахиантиклинальными складками, разбитыми разрывами и развивается в благоприятных для метасоматического замещения толщах порфиров, брекчий кератофиров и других пород, находящихся под экранами непроницаемых для растворения горизонтов (туффилов, силлов альбитофилов и др.). Руды сложены преимущественно пиритом либо мельниковитом, суммарное содержание которых достигает 80–90 % от всей рудной массы. Из других сульфидов развиты халькопирит, сфалерит либо вюртцит, пирротин, реже борнит, блеклые руды, галенит, гематит, самородное золото и серебро. Руды содержат до 40 % S, 3–5 % Cu и 2–4 % Zn.

На месторождениях этого типа преобладают линзы и штоки, грибовидные, сундучные, реже пласто- и жиллообразные тела. По морфологии рудных тел и структурно-текстурным особенностям руд медно-колчеданные месторождения подразделяются на две группы. К первой из них относятся штоко- либо линзовидные рудные тела, характеризующиеся массивными или метаколлоидными текстурами и колломорфными структурами. Руды таких месторождений представлены, как правило, мелкозернистым пиритом, а также марказитом, мельниковитом и вюртцитом. Ко второй группе относятся линзообразные тела с полосчатыми текстурами и зернистыми структурами. Для этих руд мельниковит и вюртцит не характерны.

На большинстве медно-колчеданных месторождений отчетливо проявились процессы гипергенеза, обусловившие вертикальную зональность (сверху вниз): 1) зона гидроксидов железа (железная шляпа), прослеживающаяся на глубину 10–15 м, иногда до 30–40 м; 2) кварц-пиритовая сыпучка (2–3 м); 3) пиритовая сыпучка (1–3 м); 4) зона вторичного сульфидного обогащения (50–100 м и более); 5) зона неизменных первичных руд.

Медно- и медно-цинково-колчеданные месторождения широко распространены в СНГ (Алтай, Салаирский кряж, Тува, Казахстан, Киргизия). Классическим примером развития медно-колчеданных месторождений является Урал (уральский тип), где они наблюдаются на всем протяжении от Северного до Южного Урала включительно. В стра-

нах дальнего зарубежья месторождения этого типа известны в Испании (Рио-Тинто), Турции (Эргани-Маден), Болгарии (Радка), Норвегии (Леккен), Швеции (Болиден), Канаде (Кидд-Крик), США (Юнайтед Верде), Японии, Китае.

В качестве примера рассмотрим *месторождение Рио-Тинто*. Оно расположено в Испании в юго-западной части страны в провинции Уэльва. Это одно из крупнейших в мире медно-колчеданных месторождений, разрабатывающееся уже более 3000 лет и давшее за это время более 5 млн. т меди. Оно входит в состав так называемого Иберийского ртутного пояса, который представляет собой эвгеосинклинальный трог, выполненный вулканагенно-осадочными породами среднего палеозоя.

Месторождение Рио-Тинто представляет антиклиналь, образовавшуюся на месте вулканокупольной постройки. Оруденение приурочено к пачке пирокластических пород кислого состава (рис. 21). Рудное тело обладает сложной формой: вверху его выделяется пластовая залежь массивных колчеданно-полиметаллических руд (значительно эродированных), а ниже — находящийся под ней штокверк прожилково-вкрапленных медно-колчеданных руд. Пластовая залежь простирается в длину на несколько километров при мощности до первых десятков метров. Имеется также несколько участков развития штокверков, прослеживающихся на глубину до 300 м. Главные минералы колчеданно-полиметаллических руд: пирит, халькопирит, галенит

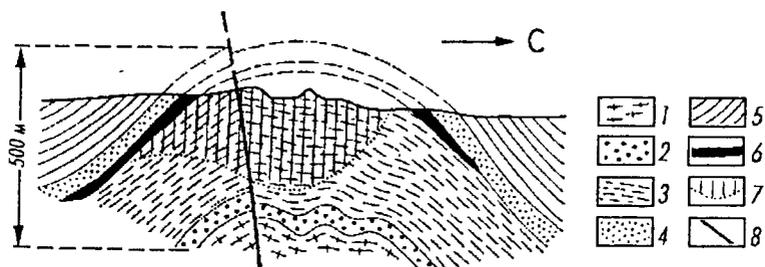


Рис. 21. Схематический разрез месторождения Рио-Тинто (по В. Смирнову):

1 — лавовые покровы основного состава; 2 — переходный слой с конгломератами; 3 — лавовые покровы кислого состава; 4 — туфы кислого состава; 5 — граувакко-сланцевые породы; 6 — массивная колчеданная руда; 7 — рудный штокверк; 8 — пострудный сброс

и сфалерит; второстепенные – арсенопирит, пирротин, бурнонит, тетраэдрит и пираргирит. Содержание полезных компонентов составляет: Cu 1 %, Pb 1 %, Zn 2 %. Медно-колчеданные руды штокверков сложены в основном пиритом и халькопиритом. Для них характерны прожилково-вкрапленные и брекчиевые текстуры. Они также подвержены гипергенным изменениям, которые привели к образованию вторичных (халькозиновых) руд со средним содержанием меди 0,7 %.

*Стратиформные месторождения* представляют собой важный промышленный тип, концентрирующий значительные запасы медных руд. Они сформировались на заключительных стадиях геосинклинального режима и в платформенных условиях. Основными характерными особенностями стратиформных месторождений являются: 1) приуроченность к пестроцветным формациям складчатых областей и платформ; 2) развитие их в областях, где выходы кислых изверженных пород отсутствуют; 3) преимущественная приуроченность оруденения к синклинальным прогибам, нередко осложненным антиклинальными поднятиями; 4) развитие оруденения в пластах с повышенными коллекторскими свойствами (пористость, трещиноватость, кавернозность); 5) повышенное содержание в породах органического вещества; 6) преобладание пластовых рудных тел; 7) резкое доминирование рудных минералов над жильными; 8) незначительная роль в парагенезисе пирита при основном развитии халькозина, борнита, а в некоторых месторождениях халькопирита с примесью галенита, сфалерита, реже линнеита.

Месторождения этого типа формировались во все эпохи рудообразования – от докембрийской до кайнозойской включительно, но наиболее продуктивными являлись докембрийская и позднепалеозойская. Мощность рудных залежей колеблется от десятков сантиметров до первых десятков метров. Они, как правило, выдержаны по площади и прослеживаются на многие километры. Кроме меди, в рудах содержатся попутные компоненты: Pb, Zn, Ag, иногда Co и U. Вмещающие породы изменены слабо, обычно карбонатизированы и окварцованы. Стратиформные месторождения известны в Казахстане (Джезказганское), России (Удоканское), Заире (Комото, Мусоши), Замбии (Чамбиши, Нчанга, Роан-Антилоп), Афганистане (Айнак), Германии (Мансфельд) и других странах.

Примером месторождений этой группы служит *Удоканское месторождение*, находящееся в северной части Читинской области. Оно приурочено к пластам песчаников удоканской серии протерозойского возраста, образующих крупный синклиний. Основная рудоносная синклиналь представляет собой опрокинутую складку с падением обоих крыльев на юго-запад. Горизонт меденосных пород представлен ритмично переслаивающимися пластами мелко- и среднезернистых кварцитовидных песчаников с прослоями серых алеволитов и темно-серых филлитовидных пород. Главные рудные минералы – халькопирит, борнит и халькозин. Запасы медистых песчаников месторождения оцениваются в 18,0 млн. т (в пересчете на металл). По данным *Министерства природных ресурсов РФ* в настоящее время месторождение имеет мало шансов на разработку вследствие недееспособности «*Удоканской горной компании*», в которой 51 % уставного капитала принадлежит американской «*Chita Minerals Company Ltd.*», 5 % – администрации Читинской области, 15 % – государственному геологическому предприятию «*Читагеология*» и 29 % – АОЗТ «*Артер*».

Рудопроявления в Беларуси. Основное количество проявлений меди связано с породами кристаллического фундамента, среди которых выделяются три типа: *колчеданные, молибден-медные и медно-никелевые. Колчеданные проявления* являются наиболее распространенными. Известен ряд рудопроявлений этого типа: *Рудьма* (Кореличский район Гродненской области), *Рубежевичи, Деревное* (Столбцовский район Минской области), *Ельня* (Мостовский район Гродненской области). По соотношению полезных компонентов и главных рудных минералов среди них различают медно-колчеданные и медно-свинцово-цинковые. Главными минералами в них являются пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит и галенит. Эти минералы чаще всего образуют прожилково-вкрапленные зоны минерализации мощностью от нескольких сантиметров до 10–20 м в измененных и катаклазированных вмещающих породах. Содержание полезных компонентов в наиболее оруденелых интервалах неустойчиво и достигает: Cu 0,1–4,9 %, Pb 0,05–1,0 %, цинка 0,03–6,0 %.

*Молибден-медные проявления* тесно связаны с гранитоидами. Известны два проявления этого типа – *Шнипки* и *Лашевичи* (оба в Гродненской области). Главные рудные минералы – пирит, марказит, халькопирит, борнит, халькозин и молибденит. Со-

держание пирита достигает 50 %, халькопирита – 20 %, других сульфидов – 1–3 %.

*Медно-никелевые проявления* развиты в пределах Смолевичско-Дрогичинской зоны. Медные минералы (халькопирит и кубанит) образуют тонкую вкрапленность. Содержание меди в минерализованных зонах небольшое и лишь изредка достигает 0,2–0,8 %.

В отложениях платформенного чехла проявления меди представлены зонами и точками минерализации. Они встречаются в туфогенных образованиях волынской серии венда в виде карбонатных корочек и жилок мощностью до 3–5 мм, содержащих редкую вкрапленность пирита, халькопирита и халькозина. Максимальное содержание меди в этих минерализованных зонах достигает 0,12 %. Аномальные концентрации меди (до 0,1–0,4 %) отмечаются в красноцветных отложениях пермо-триаса в пределах западной части Припятского прогиба.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА

### Краткие исторические сведения

Вольфрам в виде соединения  $WO_3$  открыт в 1781 г. шведским химиком К. Шееле при анализе минерала тунгстена, названного позднее шеелитом. Через два года он был получен в чистом виде испанскими химиками братьями Дон Фаусто и Дон Хуан Хозе Эльюар.

Впервые минералы вольфрама обнаружили саксонские рудокопы. При поисках касситерита они зачастую находили вольфрамит, который им не был известен. При выплавке оловянных руд, содержащих вольфрам, минералы вольфрама словно «пожирали» минералы олова (резко снижали выход получаемого олова), в связи с тем, что температура плавления вольфрама высокая ( $3380^\circ C$ ), а олова — низкая ( $232^\circ C$ ). Отсюда происхождение названия этого элемента «вольф раум», что означает по-немецки «волчье брюхо».

Вольфрам представляет собой металл серебристо-стального цвета, тугоплавкий, химически стойкий. При температуре  $1600^\circ C$  он ковок и способен вытягиваться в тончайшую нить.

### Геохимия

Кларк вольфрама  $1,3 \cdot 10^{-4} \%$ , коэффициент его концентрации 5000. Величина кларка для различных магматических пород изменяется незначительно: несколько снижается в ультраосновных ( $1 \cdot 10^{-5} \%$ ) и незначительно повышается в кислых ( $1,5 \cdot 10^{-4} \%$ ) породах. Известно пять стабильных изотопов вольфрама:  $^{180}W$ ,  $^{182}W$ ,  $^{183}W$ ,  $^{184}W$ , и  $^{186}W$ . В природных условиях он встречается в 4- и 6-валентных соединениях.

Вольфрам генетически связан с гранитоидами, характеризующимися перенасыщенностью глиноземом, высо-

кой кислотностью и повышенным содержанием олова и фтора. Он легко образует летучие соединения с фтором, хлором, бором и накапливается в продуктах остаточной кристаллизации гранитных магм. В начальные стадии рудного процесса вольфрам выносится в виде галоидов, а затем в форме силикато-вольфрамитов типа  $\text{SiO}_2 \cdot 12\text{WO}_3 \cdot 8\text{KOH} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Осаждение из них вольфрамовых минералов начинается при температуре 350–400 °С.

В экзогенных условиях минералы вольфрама относительно устойчивы и способны образовывать россыпи. В процессе осадкообразования концентрация вольфрама происходит в морских терригенных, реже карбонатных отложениях, обогащенными Fe, Mn и углистым веществом.

## Минералогия

Известно около 20 вольфрамовых минералов, но основное промышленное значение имеют вольфрамит, гюбнерит, ферберит и шеелит.

*Вольфрамит*  $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{WO}_4$  (содержание  $\text{WO}_3$  76,5 %) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы от коротко- до длиннопризматических и игольчатых, таблитчатые, изометричные.

*Гюбнерит*  $\text{MnWO}_4$  ( $\text{WO}_3$  76,6 %) (по фамилии немецкого горного инженера А. Гюбнера). Минерал представляет крайний марганцевый член изоморфного ряда вольфрамита.

*Ферберит*  $\text{FeWO}_4$  ( $\text{WO}_3$  76,3 %) (по фамилии естествоиспытателя Р. Фербера), крайний член изоморфного ряда вольфрамита.

*Шеелит*  $\text{CaWO}_4$  ( $\text{WO}_3$  80,6 %) (по фамилии шведского химика К. Шееле) кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы пирамидальные, почти изометричные, редко таблитчатые, агрегаты зернистые, цвет белый, бледно-желтый до коричневатого, блеск стеклянный до алмазного, твердость 4,5–5, плотность 6,1 г/см<sup>3</sup>. В катодных лучах минерал люминесцирует ярким голубовато-белым светом.

В зоне окисления образуются: *тунгстит*  $\text{H}_2\text{WO}_4$ , *гидротунгстит*  $\text{H}_2\text{WO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , *ферритунгстит*  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{WO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и некоторые другие вольфрамсодержащие минералы. Они встречаются обычно в виде землистых масс желто-бурого,

светло-желтого, реже желтовато-зеленого цвета. Эти минералы являются лишь поисковым признаком наличия первичных вольфрамовых руд.

## **Применение в промышленности**

Вольфрам в промышленности стал применяться в конце XIX в. Вольфрамовая сталь впервые в мире была получена англичанином Р. Мюшетом в 1864 г, а в России — на Путиловском заводе в 1896 г. Добавка вольфрама в сталь резко повышает ее твердость, одновременно увеличивает прочность, упругость и тугоплавкость. На 1 т стали необходимо до 10–30 кг вольфрама. Вольфрамовые стали используются для изготовления быстрорежущих инструментов, бронеплит, орудийных стволов, броневых башен танков, броневой снарядов и т. д.

В 1907 г. впервые были получены сплавы вольфрама с хромом, никелем и кобальтом — стеллиты, позднее сплавы вольфрама с углеродом (карбиды), азотом (нитриды) и бором (бориды). Жаропрочные сплавы применяются в самолето- и ракетостроении. Чистый вольфрам и его сплавы используются в качестве защиты от радиации.

Вольфрам извлекают из вольфрамовых, молибден-вольфрамовых, висмут-вольфрамовых и полиметаллических вольфрамовых руд. Минимальное промышленное содержание вольфрама в рудах 0,1–0,5 % (в расчете на  $WO_3$ ) для крупных месторождений, для жильных месторождений — 1–3 %. Для комплексных руд, содержащих  $Be$ ,  $Sn$ ,  $Au$ ,  $Bi$  и другие элементы, требования могут быть снижены. Россыпи считаются промышленными при минимальном содержании вольфрамита 400–100 г на 1 м<sup>3</sup> песка.

## **Ресурсы и запасы**

Основу минерально-сырьевой базы вольфрамодобывающей промышленности мира составляют месторождения собственно вольфрамовых и комплексных вольфрамсодержащих руд, относящиеся к трем геолого-промышленным типам — штокверковому, скарновому и жильному. Ресурсы вольфрама выявлены в недрах 58 стран. Мировые про-

гнозные ресурсы вольфрама оцениваются в 9,5 млн. т.

Общие запасы вольфрама в недрах 41 страны мира составляют 4,1 млн. т, подтвержденные — 2,6 млн. т. В пяти ведущих странах — держателях запасов сосредоточено 75 % суммарных запасов вольфрама, из них: в Китае — 36,4 %, Казахстане — 13,56 %, Канаде — 10,1 %, России — 9,7 % и США — 5,4 %. Уникальные месторождения обладают запасами более 250 тыс. т  $WO_3$ , крупные — 250–100 тыс. т, средние — 100–15 тыс. т, мелкие менее 15 тыс. т.

В Китае около 40 % подтвержденных запасов заключено в штокверковых (в том числе грейзеновых) месторождениях, немногим меньше — в скарновых и около 20 % — в жильных. Месторождения с преобладающим развитием штокверковых руд (Даминьшань и др.) содержат от 0,3 до 1,0 %  $WO_3$ , запасы металла достигают нескольких сотен тысяч тонн. Наиболее высококачественными являются руды жильных месторождений (содержание  $WO_3$  0,8–2,2 %). Однако запасы вольфрама в них относительно небольшие и не превышают несколько десятков тысяч тонн (месторождения Гуйменьшань, Сингуаньшань, Пангуашань и др.). К настоящему времени большинство крупных месторождений, длительное время находившихся в эксплуатации, разрабатывается шахтным способом на больших глубинах (300–500 м), их запасы в значительной степени истощены, особенно на месторождении Гуйменьшань, а другие крупные рудники обеспечены запасами не более чем на 5–10 лет.

В России около 60 % разведанных запасов приходится на скарновые месторождения, 25 % — на штокверковые и 13 % — на жильные. Скарновые месторождения сосредоточены на Северном Кавказе, в Приморье и Республике Саха. Содержание  $WO_3$  в них составляет 0,14 % (Тырныаузское месторождение), а на отдельных месторождениях (Агылкинское) достигает 1,3 %. Несмотря на достаточно высокий потенциал минерально-сырьевой базы России, в ее освоении имеется много нерешенных проблем. Это, в первую очередь, высокая концентрация подтвержденных запасов в эксплуатируемых месторождениях, а также в целом более низкое, чем в других странах, среднее содержание триоксида вольфрама в обрабатываемых рудах.

## **Добыча и производство**

Добыча вольфрамовых руд и производство концентратов осуществляются в 20 странах мира. В 1995–2000 гг. производство вольфрамовых концентратов в мире составляло 34–35 тыс. т ежегодно. Более 96 % суммарного объема производства вольфрама в концентратах сосредоточено в Евразии. На долю Китая приходилось 70 %, России 13 %, Австралии 4 %, Португалии 3 %, Северной Кореи 2,5 %, Боливии 2 %.

В Китае добыча и производство вольфрамовых концентратов осуществляются предприятиями как государственного, так и частного сектора. Государственные предприятия (22 рудника) расположены в провинциях Цзянси, Хэнань, Гуандун и в Гуанси-Чжуанском автономном районе. В России около 80 % всей добычи вольфрама обеспечивает Лермонтовский комбинат в Приморском крае. Функционируют также Джидинский ГОК в Забайкалье и Тырныаузский вольфрамово-молибденовый ГОК на Северном Кавказе.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Эндогенные вольфрамовые месторождения формировались преимущественно на поздней стадии развития геосинклиналей, а также в связи с магматической активизацией платформ. Вольфрамовые поля и месторождения размещаются как в краевых частях складчатых областей, примыкающим к массивам, так и в периферических зонах самих массивов. Особенно широко они развиты в активизированных областях. Здесь известны месторождения на активизированных щитах (Бразильском, Австралийском и др.), в послепротерозойских складчатых областях (Хинганно-Охотской, Центрально-Французской и др.), а также на активизированных платформах (месторождения, сформировавшиеся в эпоху позднеюрской активизации Китайской платформы). Месторождения вольфрама тесно связаны с интрузивными породами гранитного ряда, характеризующимися габиссальными условиями образования, небольшими размерами и многофазностью становления. Глубины формирования вольфрамового оруденения 1200–1700 м, вертикальный размах его составляет обычно первые сотни

метров и только для среднетемпературных вольфрамит-сульфидных месторождений достигает 500 м и более.

Экзогенные месторождения чаще всего представлены континентальными россыпями вольфрамовых минералов, которые формировались на платформенном этапе.

В истории геологического развития земной коры масштабы вольфрамового оруденения и количество месторождений увеличивались от древних металлогенических эпох к молодым. В *докембрийскую эпоху* сформировались небольшие пегматитовые месторождения в Австралии, Юго-Западной Африке, США и отдельные скарновые месторождения в Бразилии (Брежу) и Швеции (Игохеллен).

*Раннепалеозойская эпоха* также была малопродуктивной для образования крупных промышленных вольфрамовых месторождений. Одним из наиболее известных является гидротермальное месторождение Богуты в Казахстане. В США разведано месторождение Квин, связанное с вольфрамосодержащими кварцевыми жилами. В Австрии разрабатывается месторождение Миттерзилль с запасами 20 тыс. т и средним содержанием  $WO_3$  в руде 0,65 %.

В *позднепалеозойскую эпоху* возникли крупные скарновые, грейзеновые и гидротермальные месторождения в различных регионах мира. Наиболее известными среди них являются: Кинг-Айленд в Австралии (оруденение приурочено к толще гнейсов); Панаскуейра в Португалии; Лос Кондорес в Аргентине; Акчатау и Караоба в Казахстане.

*Мезозойская эпоха* ознаменовалась образованием достаточно большого количества вольфрамовых месторождений. Значительное количество их сосредоточено в Малаккской вольфрам-оловянной провинции. Крупные ресурсы вольфрамовых руд имеются в Китае, где они связаны в основном с интрузиями яньшаньских гранитоидов. На Корейском полуострове по масштабам оруденения выделяется месторождение Санг-Донг, расположенное близ Сеула. В Канаде находятся крупные месторождения Флэт-Ривер и Мак-Миллан-Тангстен, в России – Тырныузское на Северном Кавказе и ряд месторождений в Приморском крае и Забайкалье.

В *кайнозойскую эпоху* образовалось значительное количество коренных и россыпных месторождений. Многие из них парагенетически связаны с оловянными рудами. Оловянно-вольфрамовые руды широко распространены в Бо-

ливии в пределах Северного района. Здесь наиболее крупными являются месторождения Акцессион, Пакуни и Тасна. В США уникальный тип вольфрамовой минерализации выявлен в месторождении оз. Сёрлс в штате Калифорния (вольфрам содержится в рассоле). Следует отметить также крупное олово-вольфрамо-бериллиевое месторождение Лост-Ривер на Аляске. В кайнозойскую эпоху рудообразования возникли многочисленные, но сравнительно небольшие по запасам месторождения в Японии (Акенабе, Инуко и др.), России (на Чукотке, в Забайкалье), Аргентине, Австралии, Нигерии и других странах.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Выделяются следующие генетические типы промышленных вольфрамовых месторождений: 1) скарновые (контактово-метасоматические), 2) грейзеновые, 3) плутоногенные гидротермальные, 4) вулканогенные гидротермальные, 5) россыпные, 6) отложения горячих минеральных источников, 7) рассолы.

*Скарновые месторождения.* Они приурочены к гранатпироксеновым и другим скарнам. По условиям залегания рудоносных вольфрамсодержащих скарнов выделяются: 1) месторождения, образовавшиеся на контакте гранитоидов и известняков; 2) возникшие на контакте любых силикатных пород (сланцев, роговиков, порфиритов и др.) с карбонатами; 3) месторождения, расположенные в гранитоидах.

Рудные тела представлены пласто- и линзообразными залежами, гнездо-, трубо- и жилообразными телами. Размеры их от первых сотен метров до нескольких километров по простиранию и от нескольких десятков до 800 м по падению, при мощности от 1–2 до 50 м. Главные рудные минералы: шеелит, иногда молибденит; второстепенные — касситерит, висмутин, магнетит, пирротин, пирит, арсенипирит, вольфрамит и др. Процесс минералообразования длительный и многостадийный (5–6 стадий). Месторождения этого типа известны в России (Тырныаузское, Восток-II), США (Пайн-Крик), Австралии (Кинг-Айленд), Китае (Хуанподи, Шичжийюань и др.), Южной Корее

(Санг-Донг). Среди этих месторождений выделяются две главные рудные формации: *шеелитовая* (Восток-II, Санг-Донг) и *шеелит-молибденовая* (Тырнаузское).

*Месторождение Санг-Донг* характеризуется тем, что скарны и связанные с ними руды сформировались не на контакте изверженных и карбонатных пород, а внутри осадочной толщи (рис. 22). Рудные тела представлены пластообразными залежами скарновых и роговиковых шеелитовых руд среди мергелей, песчаников, сланцев и роговиков на контакте с перекрывающими известняками. Протяженность главной залежи по простиранию составляет 1500 м при средней мощности 3–4,5 м. Она вскрыта наклонными шахтами на глубину 300 м или по падению — почти на 1000 м. Шеелит распространен в виде мелкой рассеянной вкрапленности в диопсидовых скарнах, но основное количество его сосредоточено в кварцевых жилах мощностью до 10–12 см и прожилках с серицитовыми зальбандами. Среднее содержание  $WO_3$  в богатых рудах составляет 1,3–1,7 %, висмута 0,46 % и молибдена 1,12 %. С 1941 г. произведено более 100 тыс. т  $WO_3$  в концентрате. В последние годы разведаны новые рудные залежи и снизились требования кондиции по содержанию  $WO_3$  в руде.

*Грейзеновые месторождения* формировались в орогенных зонах геосинклиналей и в областях активизации древней складчатости платформ на глубинах от 5 до 7 км от земной

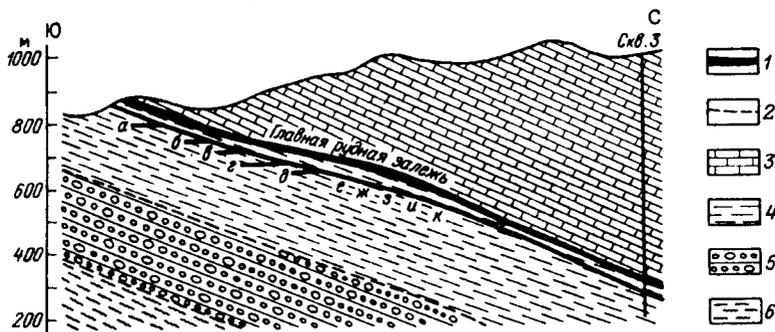


Рис. 22. Поперечный разрез рудной залежи месторождения Санг-Донг (по Н. Быховеру):

1 — рудное тело; 2 — предполагаемый контакт; 3 — серия Грейт-Лайм-Стоун; 4 — формация Майобанг; 5 — кварциты Чангсан; 6 — докембрийские сланцы. Горизонты: а — Сункианг, б — Чанг-Сан, в — Бейкан, г — Тенбек, д — Санг-Донг, е — первый, ж — второй, з — третий, и — четвертый, к — пятый

поверхности при диапазоне оруденения 300–500 м. Они приурочены обычно к апикальным куполовидным зонам лейкократовых, реже пегматоитдных гранитов. Рудные тела имеют форму штоков и штокверков, реже жил. Вольфрамовые руды связаны главным образом с кварц-топазовыми, кварц-слюдистыми и кварцевыми грейзенами. Главные рудные минералы: вольфрамит, молибденит, касситерит; второстепенные – магнетит, висмутин, пирротин, пирит, халькопирит, галенит и сфалерит. Месторождения этого типа известны в России (главным образом в Забайкалье – Спокойнинское, Букуинское), Казахстане (Акчатау, Караоба), Китае (месторождения олово-вольфрамового района массива Цзянси), Германии (Пехтельгрюн, Садисдорф), Монголии (Баянмонд, Югодзыр), Австралии (Вольфрам-Кемп, Террангтон) и других странах.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения*, как правило, ассоциируются с куполами гранитных массивов и штоками гранит-порфиров. Они размещаются в основном в экзоконтактной зоне, сложенной роговиками. Главные рудные минералы: вольфрамит, гюбнерит, иногда шеелит; второстепенные – касситерит, молибденит, висмутин и др. Глубины формирования плутоногенных гидротермальных вольфрамовых месторождений 1–5 км.

Рудные тела представлены жилами, штокверками или штокверковыми зонами. Жилы прослеживаются на десятки – сотни метров, мощность их колеблется от 0,1 до 5 м (в раздувах). Штокверки имеют размеры в поперечнике от 400 до 1000 м. Выделяются следующие рудные формации: 1) *кварц-вольфрамитовая* (месторождение Антоновское в Забайкалье); 2) *кварц-гюбнеритовая* (Бом-Горн в Забайкалье); 3) *кварц-шеелитовая* (Богуты в Казахстане); 4) *кварц-касситерит-вольфрамитовая* (Панаскуейра в Португалии, Иультин на Чукотке); 5) *кварц-сульфидно-вольфрамит-гюбнеритовая* (Холстон, Инкур в Забайкалье).

*Богутинское вольфрамовое месторождение* находится в Южном Казахстане. Шеелитовое штокверковое оруденение развито в пределах экзоконтакта гранитного массива среди терригенных образований среднего ордовика, в состав которых входят конгломераты, песчаники сланцы с прослоями и линзами кремнистых пород и известняков (рис. 23).

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* распространены в областях современного и молодого вулканизма.

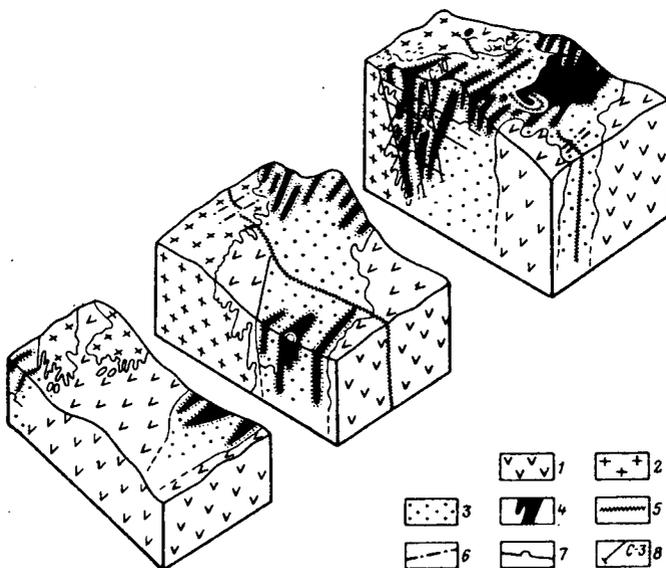


Рис. 23. Блок-диаграммы Богутынского месторождения (по Г.Н. Щербе, Б.А. Салину и др.):

1 — песчаники; 2 — граниты; 3 — рудные тела; 4 — руды с повышенным содержанием вольфрама; 5 — послерудные дайки; 6 — тектонические нарушения; 7 — горизонты штолен; 8 — скважины

Оруденение связано с андезит-дацит-липаритовыми формациями, а также вулканитами, обладающими повышенной щелочностью. Месторождения, как правило, приурочены к образованиям экструзивной, жерловой и субвулканической фаций. Рудовмещающими структурами являются вулканические купола, некки синвулканические зоны дробления и трещиноватости. Выделяются три рудные формации: 1) (киноварь)-антимонит-шеелит-ферберитовая (месторождение Горная Рача и Зопхито в Закавказье); 2) серебро-золото-шеелитовая (Боулдер в США); 3) псиломелан-тунгомелановая (Голконда в США).

Россыпные месторождения известны в России (Шерлова Гора в Забайкалье, Омчикандин в Республике Саха), Казахстане (Караоба, Богуты), США (Анатолия в штате Калифорния), Индонезии, Таиланде, Китае и в других странах. Они тесно связаны с коренными породами и образуются главным образом за счет разрушения грейзено-

вых и особенно плутоногенных гидротермальных месторождений. Наиболее широко развиты касситерит-вольфрамитовые и вольфрамитовые россыпи, реже шеелитовые и гюбнеритовые. Среди них распространены преимущественно элювиальные и аллювиальные россыпи.

*Элювиальные россыпи* образуются в результате физического выветривания коренных вольфрамовых месторождений и состоят из обломков вольфрамитовой руды (кварц с вольфрамитом и шеелитом) среди разрушенных вмещающих пород. Они известны в Боливии, Китае и Мьянме. Элювиальные россыпи до Великой Отечественной Войны отрабатывались на месторождении Караоба в Казахстане. Среди *аллювиальных россыпей* вольфрама преобладают россыпи современных долин. Русловые и особенно косовые россыпи, а также террасовые встречаются реже и практического значения не имеют. Вольфрамит, который нередко накапливается совместно с касситеритом, концентрируется в нижних частях рыхлых отложений. Длина россыпей достигает 5–8 км при ширине 100–200 м, мощность рудного пласта 1–2 м. Содержание вольфрамита и шеелита в разрабатываемых россыпях колеблется от сотен граммов до нескольких килограммов на 1 м<sup>3</sup> песка. Относительно крупными запасами обладают аллювиальные россыпи месторождения Анатолия в Калифорнии.

*Отложения горячих минеральных источников.* Месторождения этого типа имеются в США, Боливии и Монголии. Наиболее крупные из них (Голконда и Содавилль) расположены в штате Невада. Они представлены пластообразными залежами псиломелана с лимонитом, обогащенными вольфрамом. В составе псиломелана, наблюдаются повышенные количества К, Ва и WO<sub>3</sub> (от 1 до 7 %). Пластообразное тело вольфрамсодержащей марганцевой руды вместе с подстилающими и перекрывающими известковистыми туфами в виде покрова залегают несогласно на породах триаса (глинистые сланцы, песчаники, известняки и кварциты). Руды приурочены к нижним горизонтам толщи туфов. В плане рудное тело имеет серповидную форму. Мощность рудного пласта колеблется от 0,1 до 6,0 м. Предполагается, что вольфрам осаждался в псиломелан-лимонитовых образованиях из горячих источников, выщелачивавших его из расположенных поблизости жильных вольфрамовых месторождений.

*Рассолы.* В рассолах соляного пласта оз. Сёрлс, расположенного в пустыне Мохаве (штат Калифорния), установлено относительно высокое содержание  $WO_3$ . Химический состав рассолов следующий (%): NaCl 16,1;  $Na_2SO_4$  6,75; KCl 4,9;  $Na_2CO_3$  4,75;  $Na_2B_4O_7$  1,58;  $Li_2O$  0,018;  $NaHCO_3$  0,15;  $Na_3PO_4$  0,14;  $Na_2S$  0,12;  $Na_3AsO_4$  0,05; Br 0,085;  $WO_3$  0,007; I 0,003; F 0,002. Площадь распространения соляного пласта составляет около 90 км<sup>2</sup>, мощность его варьирует от нескольких сантиметров до 35 м. Запасы  $WO_3$  в рассолах оцениваются в 80 тыс. т.

Рудопроявления в Беларуси. В кристаллическом фундаменте наиболее благоприятны для вольфрамовой минерализации являются зоны скарнированных гнейсов. К настоящему времени выявлено лишь 1 рудопроявление – *Раевщинское*, локализованное в пределах Минского глубинного разлома в западном экзоконтакте Бобовнянского гранитогнейсового купола. Здесь среди интенсивно гранитизированных плаггиогнейсов установлены 2 горизонта скарноидов с вкрапленностью шеелита и содержанием вольфрама до 0,007 %.

Более мелкие проявления минерализации этого типа известны на участке *Мир* в экзоконтакте гранитоидов жуховицкого комплекса, а также на юге Беларуси в экзоконтакте гранитоидов микашевичского комплекса (участок Глушкови́чи).

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОЛИБДЕНА

### Краткие исторические сведения

В 1778 г. шведский химик К. Шееле впервые получил молибденовую кислоту, а в 1781 г. швед П. Гьельм, у которого была высокотемпературная печь, выплавил металл. Молибден более высокой чистоты был получен спустя четыре десятилетия Й. Берцелиусом. Долгое время этот химический элемент не находил применения и только в XX в. его начали широко использовать в металлургии при изготовлении легированных сталей и различных сплавов. Впервые в мире молибденовая сталь (3,7 % Мо) была выплавлена на Путиловском заводе в 1886 г.

Молибден — серебристо-белый металл, очень похожий по своим свойствам на вольфрам. Он тугоплавок (температура кипения 2620 °С), прочен, ковоч, тягуч.

### Геохимия

Кларк молибдена  $1,1 \cdot 10^{-4}$  %. В земной коре молибден распределен относительно равномерно. Меньше всего его содержится в ультраосновных породах (0,4–0,5 г/т), больше в гранитах (1–1,5 г/т). Содержание молибдена в морской воде колеблется от 8,9 до 12,2 мг/л. Наиболее высокие концентрации его в породах связаны с аксессуарными минералами (магнетит, ильменит, сфен). Известно семь стабильных изотопов молибдена с массовыми числами 92, 94–98, 100, среди которых преобладает  $^{98}\text{Mo}$ . Этот металл обладает двумя валентностями: 4-х валентный в эндогенных условиях и 6-валентный в экзогенных.

В эндогенных условиях молибден переносится в виде комплексных соединений — гетерополикремниевых кислот типа  $\text{SiO}_2 \cdot 12\text{MoO}_3 \cdot n\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}$ . При понижении температуры и давления этот комплекс разрушается, а при на-

личии сероводорода происходит диссоциация последнего с образованием молибденита. В первичных рудах молибденит встречается в ассоциации с вольфрамитом и висмутином, с минералами меди, а также с галенитом, сфалеритом. В экзогенных условиях молибденит окисляется с образованием легкорастворимых соединений типа  $\text{MoSiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{MoO}_4$ .

## Минералогия

В природе известно около 20 молибденовых минералов. Главнейшими из них являются: молибденит, повеллит, молибдошеелит, вульфенит, ферримолибдит и ильземаннит.

*Молибденит*  $\text{MoS}_2$  (содержание Mo 60 %) — это основной промышленный минерал молибденовых руд. В нем почти всегда в виде изоморфной примеси присутствует рений (до 0,3 %). Молибденит кристаллизуется в гексагональной сингонии, габитус кристаллов таблитчатый, короткопризматический, бочковидный, цвет голубовато-серый, блеск металлический. Встречается в высоко- и среднетемпературных гидротермальных месторождениях, связанных с кислыми изверженными горными породами, а также в пегматитах и грейзенах в ассоциации с вольфрамитом, касситеритом.

*Повеллит*  $\text{CaMoO}_4$  (Mo 48 %) (по фамилии Повелл), кристаллизуется в тетрагональной сингонии, габитус кристаллов дипирамидальный, таблитчатый, цвет зеленовато-желтый, блеск алмазный, твердость 3,5, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>.

*Молибдошеелит*  $\text{Ca(W,Mo)O}_4$  (Mo 0,5–15 %), молибденосодержащий шеелит. Цвет его золотисто-желтый, плотность 5,5–5,9 г/см<sup>3</sup>. Под воздействием рентгеновских, ультрафиолетовых и катодных лучей люминесцирует в белых и желтовато-белых тонах. Встречается в известковых скарнах с молибденитом, в пегматитах — с флогопитом, диопсидом, сфеном.

*Вульфенит*  $\text{PbMoO}_4$  (Mo 46 %) (по фамилии Вульфен), кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы — квадратные таблички, иногда октаэдрические, реже призматические и кубообразные, цвет желтовато-серый, зеленый до бурого, твердость 2,5–3, плотность 6,9 г/см<sup>3</sup>.

*Ферримолибдит*  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{MoO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (Mo 60 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, образует корочки пучко-

ватые или радиально-волокнистые агрегаты, цвет желтый, блеск шелковистый, твердость 1–2, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>.

*Ильземаннит*  $\text{Mo}_3\text{O}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (Mo до 30 %) (по фамилии Ильземанн). Обратимый минеральный гель, встречается в виде землистых агрегатов, пигмент пород и минералов, цвет голубой до черного, растворим в воде и кислотах.

## **Применение в промышленности**

Основная область применения молибдена — металлургия (около 85–90 % его производства), где он используется при легировании сталей и получении сплавов с ванадием, вольфрамом, медью, никелем, кобальтом, углеродом. Добавки молибдена к сталям повышают закаляемость, придают ей однородную мелкокристаллическую структуру, увеличивают пластичность, прочность, вязкость. Легированные молибденом стали применяются в автомобильной, тракторной, авиационной промышленности, в турбостроении. Чистый металл используется в радиотехнике и электронике, в ракетостроении, при изготовлении деталей атомных реакторов, а также в химической, нефтеперерабатывающей, керамической, стекольной и текстильной промышленности. Молибденит применяется в качестве лучшей смазки для трущихся частей машин при высокой температуре.

Промышленное извлечение молибденита осуществляется только из молибденовых руд. Минералы, содержащие шестивалентный молибден (оксидные руды), промышленной ценности не имеют в связи со сложной технологией его извлечения. Согласно требованиям промышленности содержание молибдена в рудах колеблется от 0,5–1 %, а в комплексных — снижается до 0,02 %.

## **Ресурсы и запасы**

Ресурсы молибдена выявлены в 35 странах мира и оцениваются в 24,4 млн. т. По состоянию на начало 2000 г. общие запасы молибдена в мире составляли 13,7 млн. т, подтвержденные — 8,7 млн. т. Основными странами-держателями запасов молибдена являются США (27,2 % миро-

вых подтвержденных запасов), Чили (16,4 %), Казахстан (10,3 %), Армения (8,4 %), Перу (7,3 %), Аргентина (6,2 %), Китай (5,7 %) и Канада (4,6 %). Опубликованных сведений о запасах этого металла в России не имеется.

Минерально-сырьевая база молибдена характеризуется высокой степенью концентрации запасов. Так, в США в четырех молибденпорфировых месторождениях (Гендерсон, Клаймакс, Куотс-Хилл и Куэста) сосредоточено 56,7 % подтвержденных запасов страны и 16,4 % мировых запасов молибдена. Около 92 % мировых (без России) подтвержденных запасов заключено в молибденово-меднопорфировых (68 %) и молибденпорфировых (24 %) месторождениях.

Уникальные месторождения содержат более 500 тыс. т металла, весьма крупные – 500–100 тыс. т, крупные – 100–50 тыс. т, средние – 50–25 тыс. т и мелкие – менее 25 тыс. т. Концентрация молибдена в рудах невысокая. Так, в богатых рудах содержание металла составляет более 0,5 %, в рядовых – 0,5–0,2 %, бедных – 0,2–0,1 %, а в убогих – 0,1–0,02 % (в комплексных рудах).

## **Добыча и производство**

В 1995–2000 гг. мировое производство молибдена в концентратах составляло 125–130 тыс. т. Добыча молибдена осуществлялась на 41 руднике в 12 странах. Странами-лидерами по производству молибденовых концентратов (в тыс. т) являлись США (56,0), Китай (25,2), Чили (17,4) и Канада (8,7). В России производство молибдена в концентратах составляло 4–6 тыс. т.

В настоящее время все большее влияние на рынок молибдена оказывает Китай. По оценкам западных экспертов эта страна располагает мощностями по переработке молибденовых концентратов более 20 тыс. т в год и значительным экспортным потенциалом. Китай спонтанно выбрасывает на рынок партии молибденовых продуктов ниже сложившихся на мировом рынке цен, что является сильным дестабилизирующим фактором.

## Металлогения и эпохи рудообразования

Эндогенные месторождения молибдена формировались главным образом на средней и поздней стадиях геосинклинального этапа, а также в связи с явлениями магматической активизации на платформенном этапе. Собственно молибденовые месторождения размещаются в областях с приподнятым кристаллическим фундаментом, преимущественно сложенным гранитоидами. Оруденение контролируется зонами длительно развивавшихся разрывных нарушений. Общей особенностью месторождений молибдена является формирование их в тесной связи с внедрением малых интрузий в неспокойной тектонической обстановке, что существенно отличает эти месторождения от вольфрамовых. Глубина формирования верхних частей рудных тел колеблется от нескольких сотен до 1000–1500 м, а вертикальный размах оруденения достигает 1000 м и более.

Медно-молибденовые месторождения обычно размещаются в складчатых областях на площадях широкого проявления магматизма. Оруденение пространственно связано с малыми интрузиями и развивается в их апикальных частях. Месторождения этого типа ассоциированы с монцититами, гранодиоритами и граносиенитами.

Экзогенные месторождения (молибденосодержащие угли, углистые и углисто-кремниевые сланцы) образовывались на ранней стадии геосинклинального этапа и в платформенных условиях. Они обладают достаточно крупными ресурсами, но из-за низкого содержания молибдена (сотые–тысячные доли процента) в настоящее время являются невостребованными.

Молибденовые месторождения формировались в различные геологические эпохи рудообразования. В наиболее древнюю — *докембрийскую эпоху* образовались сравнительно небольшие месторождения в Норвегии, Швеции, Финляндии, Канаде и в ЮАР, представленные преимущественно молибденоносными гранитными пегматитами, а также гидротермальными жильными и штокверковыми зонами медно-молибденовых руд. Некоторые из них разрабатываются: Кнабен в Норвегии, Ла Корн и Норанда в Канаде (провинция Квебек).

В *раннепалеозойскую (каледонскую) эпоху* они становятся заметнее и распространены несколько шире. Наиболее

крупные месторождения этого возраста — Местерс-Виг в Гренландии и Сора в Кузнецком Алатау (Россия). На месторождении Сора рудоносными являются лейкократовые граниты.

Молибденовые месторождения *позднепалеозойской эпохи* рудообразования известны в Австралии, Казахстане и Северной Африке (Марокко). В Австралии многочисленны, но не большие по запасам месторождения сосредоточены преимущественно в восточных районах страны (штаты Квинсленд и Новый Южный Уэльс). Они генетически связаны с герцинскими гранитоидами, интрузирующими толщу метаморфических пород силурийско-каменноугольного возраста. Среднее содержание молибдена в рудах 0,5–1,0 %. В Казахстане наиболее крупными являются месторождения Восточный Коунрад и Коктенколь.

*Мезозойская эпоха* ознаменовалась формированием сравнительно большого количества молибденовых месторождений, но промышленные сконцентрированы в основном в России, Китае и Канаде. В России они расположены главным образом в Забайкалье, где связаны с гранитоидными породами и локализованы вдоль региональных разломов (Бугдая, Шахтама и др.). В Канаде наиболее известными являются месторождения в провинции Британская Колумбия (Эндако, Босс Маунтин, Аданак и др.). В Китае основное промышленное значение имеют месторождения штокверкового типа, представленные кварц-молибденитовыми прожилковыми и прожилково-вкрапленными рудами. Среди них наиболее известно месторождение Янцзы-Чжандзы, в пределах которого развито 6–7 рудных тел мощностью от 1–3 до 30 м. Содержание в рудах молибдена 0,1–0,3 %.

В *кайнозойскую эпоху* образовалось основное количество крупных месторождений. Причем около 80 % всех запасов молибдена, сформировавшихся в эту эпоху рудообразования, заключено в месторождениях США. Они сосредоточены главным образом в юго-западной части страны, где выделяется богатейшая в мире медно-молибденовая провинция на территории штатов Колорадо, Юта, Аризона и Нью-Мексико. Уникальными по запасам молибдена являются месторождения Клаймакс, Квеста-II, Гендерсон, Пайн-Ралли и др. Крупные месторождения имеются на Аляске (Куотс-Хилл с запасами руды 1,18 млрд. т и сред-

нем содержания  $Mo$  0,08 %) и в штате Айдахо (Томпсон Крик с запасами 180 млн. т руды и среднем содержании  $Mo$  0,18 %).

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Среди промышленных месторождений молибдена выделяются: 1) скарновые, 2) грейзеновые, 3) плутоногенные гидротермальные, 4) вулканогенные гидротермальные.

*Скарновые месторождения.* К этой группе относятся скарново-молибденит-шеелитовые и скарново-шеелитовые месторождения, образующиеся на контактах гранитоидов с карбонатными породами. Основная масса молибденита выделялась после образования скарновых минералов и шеелита в виде секущих скарны молибденитовых либо кварц-молибденитовых прожилков.

Рудные тела имеют пластообразную, линзовидную, жильную форму, иногда представлены штокверками прожилковых руд в гранитоидах. Главные рудные минералы: молибденит, пирит, шеелит (иногда молибдошеелит), халькопирит и магнетит; второстепенные — сфалерит, галенит и др. Месторождения этого типа известны в России (Тырныаузское, Киялых-Узень в Хакассии), Казахстане (Каратас-1), Марокко (Азгур), Румынии (Байтца), Китае (Янцзы-Чжандзы), США (Пайн-Крик), Турции (Тахталыдаг).

Типичным представителем шеелит-молибденитовой формации является *Тырныаузское месторождение*. Оно находится на территории Кабардино-Балкарии и приурочено к пересечению субширотной зоны разломов с поперечным поднятием. Участок месторождения представляет собой фрагмент крупной складчатой структуры, сложенной сильно дислоцированными и контактово-метаморфизированными карбонатными, терригенными и вулканогенными породами среднего палеозоя (рис. 24). На месторождении развиты разновозрастные интрузии: лейкократовых гранитоидов (возраст 20–18 млн. лет), эльджуртинских порфиридных гранитов (1,9–1,8 млн. лет) и липаритов (1,8–1,6 млн. лет). Под воздействием интрузий известняки были преобразованы в мраморы, а песчано-сланцевые отложения — в роговики.

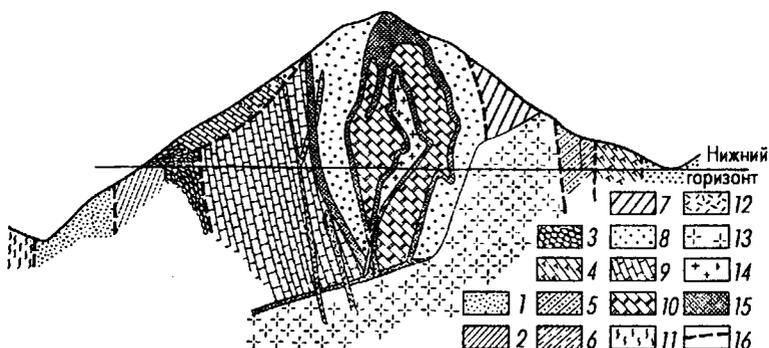


Рис. 24. Схематический геологический разрез Тырнаузского месторождения (по А. Пэку):

1–3 – мукуланская свита: 1 – песчаники, 2 – черные сланцы, 3 – конгломераты; 4 – вулканогенная свита; 5, 6 – зеленокаменная свита: 5 – аркозовые песчаники, 6 – черные сланцы; 7 – кварцевые плагио-порфиры; 8 – биотитовые роговики; мраморы: 9 – слоистые, 10 – массивные; 11 – мигматиты; 12 – липариты; 13 – эльджуртинский гранит; 14 – лейкократовые гранитоиды; 15 – скарны и пироксеновые роговики; 16 – тектонические контакты

Основное рудное тело представлено залежью скарнов с шеелитом и молибденитом и находится на контакте известняков и роговиков в шарнире антиклинали. Главные рудные минералы: шеелит, молибдошеелит и молибденит. Текстура руд массивная, брекчиевидная, пятнисто-гнездовая и прожилково-вкрапленная. Шеелит и молибдошеелит обычно образуют неравномерную мелкую вкрапленность и прожилки мощностью 1–2 см. Молибденит встречается в виде тонкочешуйчатых агрегатов, листочков и прожилков.

Месторождение образовалось в позднеальпийскую эпоху тектономагматической активизации на краю Скифской платформы и сопряжено с неинтрузиями. В его развитии выделялись четыре стадии минералообразования. Месторождение разрабатывается.

*Грейзеновые месторождения* достаточно широко распространены в Казахстане (Восточный Коунрад, Акчатау, Жанет и др.), России (Первомайское и Булуктай в Забайкалье), Монголии (Югодзыр), Аргентине (Серро-Асперо) и других странах. Они связаны с куполами гранитов, располагаясь в них на 300–500 м в глубину. Рудные тела име-

ют форму штокверков, реже труб. Собственно грейзены состоят из слюды (мусковит, биотит) и кварца, а также плагиоклаза, турмалина, топаза и флюорита. Главные рудные минералы: молибденит, вольфрамит; второстепенные — касситерит, висмутин, магнетит, пирит, халькопирит, сфалерит и галенит.

Процесс минералообразования происходил длительно и прерывисто. Выделяется до четырех стадий минералообразования, из которых продуктивными для молибдена и вольфрама являлись первые три. Грейзенизация происходила при температуре 470–360 °С, а кристаллизация жильного рудного кварца — от 540 до 300 °С. Для грейзеновых месторождений характерна четкая вертикальная зональность: в нижней части развивается редкоземельное, циркониевое и тантал-ниобиевое оруденение, в средней — молибден-олово-вольфрамовое, а в верхней — свинец-цинк-медное.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* весьма широко распространены и имеют большое экономическое значение. Среди них выделяются три основные рудные формации: 1) *кварц-молибденитовая*, 2) *кварц-молибденит-серицитовая*, 3) *кварц-молибденит-халькопирит-серицитовая*.

*Месторождения кварц-молибденитовой формации* самые многочисленные. К ним относятся месторождения в Забайкалье (Шахтама, Давенда, Жирекен), на Дальнем Востоке (Умальта), в Казахстане (Шалгия), Канаде (Босс-Маунтин), США (Квеста-I, Квеста-II и др.). Они тяготеют к ореолам развития биотит-мусковитовых гранитов. Рудные тела приурочены к поздним дайкам кислого и субщелочного состава. По форме они могут быть разделены на штокверковые, имеющие много общего с месторождениями меднопорфировых руд, и жильные. Главные рудные минералы: молибденит и вольфрамит; второстепенные — касситерит, шеелит, пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит; жильные — кварц, калиевый полевой шпат, плагиоклаз, мусковит и др. Минералообразование протекало в несколько стадий.

*Месторождения кварц-молибденит-серицитовой и кварц-молибденит-халькопирит-серицитовой формаций* представлены, как правило, молибденовыми, часто медно-молибденовыми прожилково-вкрапленными рудами. В Армении — это месторождение Каджаран, в России — Сора, в США —

Клаймакс, Гендерсон и др. Они связаны с порфировыми интрузиями диорит-гранодиорит-гранитовых комплексов. Находятся в эндоконтактных зонах интрузивов. Рудные тела представлены преимущественно штокверками концентрического или линейного строения. Главные рудные минералы первичных руд: молибденит, халькопирит и пирит; второстепенные — магнетит, гематит, борнит, блеклые руды, галенит и сфалерит. Содержание молибдена в рудах молибденпорфировых месторождений составляет 0,05–0,5 %, а в медно-молибденпорфировых — 0,005–0,025 %.

Минералообразование протекало многостадийно. Выделяется до семи стадий, которые характеризуются изменяющимися парагенетическими ассоциациями минералов, имеющими и соответствующие температуры образования.

В качестве примера рассмотрим *месторождение Клаймакс*, являющееся представителем кварц-молибденит-серицитовой формации (рис. 25). Оно находится в США в штате Калифорния. Район месторождения сложен докембрийскими гранитами, гнейсами и кристаллическими сланцами. На западе по сбросу Москино с амплитудой 2,7 км они граничат с палеозойскими осадочными породами. Все породы, согласно С. Уоллесу, разбиты разломами и прованы дорудными штоками и раннетретичными дайками

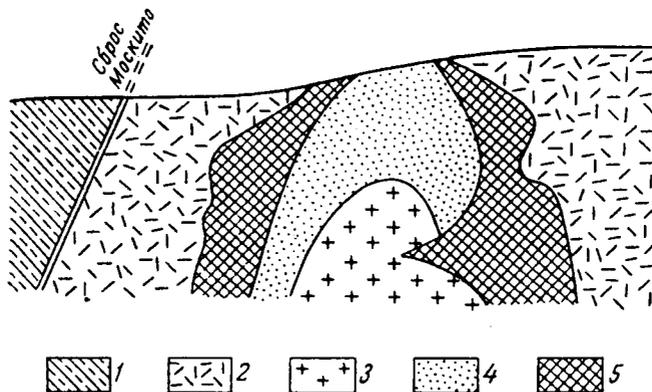


Рис. 25. Схематический геологический разрез месторождения Клаймакс (по Вандервильду):

1 — осадочные породы карбона; 2 — граниты и гнейсы докембрия; 3 — третичные кварцевые монзонит-порфиры; 4 — безрудное кварцевое ядро; 5 — рудная зона

порфиоров диорит-кварц-монцонитового состава. На месторождении основным структурным элементом является шток Клаймакс. Он обладает трубообразной формой и имеет в плане около 1 км в поперечнике. Формирование этого штока происходило в четыре фазы, которые сопровождались гидротермальной деятельностью.

Рудные тела Клаймакса представляют собой штокверки, образованные преимущественно кварц-молибденитовыми прожилками, которые развиты как в докембрийских породах, так и в порфирах. На месторождении известны три рудных тела (сверху вниз): Сириско (почти полностью уничтоженное эрозией), Верхнее и Нижнее, пространственно и генетически связанные с первыми тремя фазами формирования штока Клаймакс.

Рудное тело Верхнее является наиболее крупным и хорошо изученным. Оно имеет в плане кольцевую, а в разрезе дугообразную форму. Средняя мощность кольца 250 м, внутренний диаметр 210 м, на глубину рудное тело прослежено на 800 м. Главные рудные минералы: пирит, молибденит; жильные — кварц и серицит. Ежегодно обогатительные фабрики перерабатывают 45–50 тыс. т руды со средним содержанием  $\text{MoS}_2$  0,32 % и  $\text{WO}_3$  0,025 %. С 1948 г. начали извлекать также вольфрамит (около 1 тыс. т  $\text{WO}_3$ ), касситерит, пирит и монацит.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* представлены уранинит-молибденитовой формацией. Они обычно приурочены к участкам пересечения разломов различного направления, секущих туфогенно-осадочные породы и эффузивы типа кварцевых порфиоров. Форма рудных тел — штокверки. Молибденит мелкочешуйчатый, в тесном прорастании с урановой смолкой. Выделение его происходило после образования основной массы сульфидов и карбонатов. Изменение вмещающих пород вблизи рудных тел проявилось в серицитизации, хлоритизации, окварцевании, альбитизации, карбонатизации или аргиллитизации.

Рудопроявления в Беларуси. Проявления молибдена связаны с медно-молибденовой сульфидно-скарновой (Шнипки) и медно-молибденовой сульфидной (Скидельское) формациями. *Рудопроявление Шнипки* находится в Щучинском районе Гродненской области. Кристаллический фундамент здесь сложен катаклазированными и милонитизированными породами заборской толщи щучинской серии. Встречены маломощные

участки сульфидной и магнетитовой минерализации, приуроченные к крутопадающим тектоническим зонам. Оруденение представлено обильной вкрапленностью и прожилками сульфидов. В скв. № 5п в интервале 233,6–239,4 м вскрыта карбонат-кварц-сульфидная жила, рудные минералы в которой представлены пиритом, марказитом, халькопиритом, пирротинном, магнетитом и молибденитом.

*Рудопроявление Скидельское* локализовано в Западно-Белорусской металлогенической зоне, выделяемой в западном обрамлении гранулитового пояса. Вмещающими породами являются эпидотизированные и хлоритизированные гранитогнейсы, гранитоиды и полевошпатовые жилы. Минерализация представлена вкрапленностью и прожилками сульфидов, среди которых установлены халькопирит, молибденит, борнит и пирит. Мощность минерализованных интервалов не превышает 0,5 м. В качестве элементов-примесей отмечены Co, Ni, Pb, Zn, Sn, Ag и Au.

В последнее время проявления молибдена выявлены при отработке пород кристаллического фундамента месторождения Микашевичи. Здесь молибденит связан с жилами мелкокристаллического розовато-серого гранита. Этот минерал встречается в виде включений размером до  $0,5 \times 1,5$  см, а также образует небольшие гнезда.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ СВИНЦА И ЦИНКА

В природе свинец и цинк встречаются обычно в месте, образуя комплексные свинцово-цинковые полиметаллические руды. Кроме них в состав этих руд часто входят Ag, Cd, Au и другие металлы.

### Краткие исторические сведения

Свинец был известен в Месопотамии и Египте за 6–7 тыс. лет до н. э. Свинцовые водопроводные трубы обнаружены при раскопках Помпеи, а свинцовые монеты, изготовленные за 200 лет до н. э., в Китае. Свинцовый промысел возник в России в конце XVII – начале XVIII в. С 1698 г. свинец добывался на Нерчинских рудниках в Забайкалье, а с 1726 г. – на Алтае.

Цинк в виде чистого металла был получен только в 1746 г. немецким химиком А. Маргграфом. Руды цинка, очевидно, были известны и разрабатывались еще в древности. В ассирийских и урартских клинописях имеются указания, свидетельствующие о том, что окисленные цинковые руды использовались как добавки при выплавке меди, бронзы и латуни.

Свинец – белый металл, мягкий, ковкий, имеет низкую точку плавления (327,4 °С) и высокую температуру кипения (1740 °С). Цинк также белый металл, обладает низкой температурой плавления (419,5 °С), кипит при температуре 906 °С, устойчив против коррозии.

### Геохимия

Кларк свинца в земной коре  $1,6 \cdot 10^{-3} \%$ . Содержание его увеличивается от ультраосновных ( $1 \cdot 10^{-5} \%$ ) к кис-

лым магматическим породам ( $2 \cdot 10^{-3} \%$ ). Известно четыре стабильных изотопа свинца с массовыми числами 204 и 206–208, среди них преобладает  $^{208}\text{Pb}$ .

Природные соединения свинца, как правило, двухвалентны, исключение составляют лишь  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ . Ионы свинца электроположительные. Типичны катионы, вызывающие ясно выраженную поляризацию.

Кларк цинка несколько выше, чем свинца и составляет  $8,3 \cdot 10^{-3} \%$ . Наблюдается увеличение содержания его от ультраосновных к основным магматическим породам. Цинк типичный четный элемент из группы побочных, т. е. дающих ионы типа купро с сильной активной поляризацией. Цинк имеет пять стабильных изотопов с массовыми числами 64, 66–68 и 70, среди которых преобладает  $^{64}\text{Zn}$ .

Свинец и цинк концентрируются в остаточных очагах кислых производных базальтовой и гранитной магм. Оба металла выносятся гидротермальными растворами в комплексных соединениях в виде солей хлористоводородной, угольной, серной, хромовой, молибденовой, фосфорной и других кислот. Многочисленны также соли сульфокислот с мышьяком и сурьмой.

В экзогенных условиях сульфиды свинца и цинка, окисляясь переходят в сульфаты. Сульфат цинка относится к легкорастворимым соединениям и обладает высокой миграционной способностью, сульфат свинца, наоборот, плохо растворим, и свинец обычно не выносится из зоны окисления.

## Минералогия

Главными минералами свинца являются галенит, буланжерит, бурнонит, церуссит и англезит, а главными минералами цинка — сфалерит, вюртцит, смитсонит и каламин.

*Галенит*  $\text{PbS}$  (содержание  $\text{Pb}$  86,6 %), часто наблюдаются примеси  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ . Кристаллизуется в кубической сингонии, кристаллы кубические, кубооктаэдрические, октаэдрические, реже триоктаэдрические, скелетные. Образуется зернистые агрегаты и друзы. Цвет минерала серый, в отраженном свете белый, твердость 2–3, плотность  $7,6 \text{ г/см}^3$ .

*Буланжерит*  $Pb_5Sb_4S_{11}$  (содержание Pb 55,4 %) (по фамилии Буланже), содержит обычно примеси Cu и Fe. Кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы игольчатые или призматические. Встречается в виде агрегатов зернистых, волокнистых и перистых. Цвет синевато-свинцово-серый до черного, черта серо-черная с красноватым оттенком, блеск металлический, твердость 2,5–3, плотность 6,0–6,2 г/см<sup>3</sup>. Распространен в средне- и низкотемпературных гидротермальных месторождениях.

*Бурнонит*  $CuPbSbS_3$  (Pb 42,5 %) (по фамилии Бурнон). Кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы короткопризматические, таблитчатые и псевдогексагональные; агрегаты зернистые. Цвет минерала стально-серый до темно-серого, черта темно-серая, блеск металлический, твердость 2,5–3, плотность 5,8 г/см<sup>3</sup>. Встречается в средне- и низкотемпературных гидротермальных свинцово-цинковых и сурьмяных месторождениях с сульфосолями цинка и свинца.

*Церуссит*  $PbCO_3$  (Pb 77,6 %), примеси Ag, Sr, Zn. Кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы псевдогексагонально-дипирамидальные, таблитчатые и др. Характерны зернистые, порошковатые и волокнистые агрегаты. Цвет обычно белый, серый, реже черный, бурый, синий, блеск алмазный, твердость 3–3,5, плотность 6,4 г/см<sup>3</sup>.

*Англезит*  $PbSO_4$  (содержание Pb 68,3 %). Назван по месту его находки на о. Энглези (Великобритания). Кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы от тонкодо толстотаблитчатых, призматические, агрегаты зернистые и желваковые, твердость 2,5–3, плотность 6,4 г/см<sup>3</sup>.

*Сфалерит*  $ZnS$  (Zn 67 %), примеси Fe, Cd, Ir, Ga, Mn, Hg и др. Кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов: тетраэдрический, кубооктаэдрический, додекаэдрический. Характерны агрегаты зернистые, скорлуповатые, почковидные, колломорфные, землистые. Цвет минерала черный, бурый, красноватый, желтый, зеленый, бесцветный, блеск жирный, алмазный. Широко распространен в гидротермальных месторождениях различных типов, особенно в свинцово-цинковых, оловянных и колчеданных.

*Вюртцит*  $ZnS$  (Zn 63 %) (по фамилии Вюртц). Кристаллизуется в гексагональной и тригональной сингониях. Образует пять полиморфных модификаций с одинаковы-

ми физическими свойствами. Кристаллы пирамидальные и таблитчатые, агрегаты: колломорфные, концентрически-лучистые, слоистые, волокнистые. Бесцветный, бурый до черного (в зависимости от содержания железа), блеск смолистый, стеклянный, твердость 3,5–4, плотность 3,9–4,0 г/см<sup>3</sup>.

*Смитсонит*  $ZnCO_3$  (Zn 52 %) (по фамилии Смитсон), изоморфные примеси Fe, Mn, Mg, Co, Cu, Pb, Cd, In и др. Кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы скаленоэдрические, ромбоэдрические, агрегаты: зернистые, скорлуповатые, почковидные, землистые, ячеистые и др. Цвет минерала белый, зеленовато-серый, буроватый, блеск стекловатый, твердость 4–5, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>, вскипает с HCl на холоде.

*Каламин*  $Zn_4[Si_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$  (Zn 53,7 %), кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов таблитчатый, призматический. Характерны агрегаты: друзы, сталактиты, гроздьевидные, волокнистые, зернистые и иные. Цвет белый, голубоватый до бурого, блеск стеклянный, твердость 4,5–5, плотность 3,5 г/см<sup>3</sup>.

## Применение в промышленности

Около 40 % выплавляемого свинца используется для производства аккумуляторов. Он широко применяется как антидетонаторная добавка в бензин (тетраэтилсвинец), для изготовления оболочек кабеля, защитных экранов от радиоактивного излучения, в военном деле и т. д. Свинец входит в состав бронз, латуней, баббитов, типографских сплавов.

Цинк, благодаря своим антикоррозионным свойствам, употребляется в металлическом виде для оцинкования различных изделий — железных листов, труб, проволоки. Значительное количество его используется для получения сплавов (бронза, мельхиор, латунь). Эти сплавы применяются в машиностроении, приборостроении, а мельхиор — для изготовления посуды, хирургических инструментов, художественных изделий.

Требования промышленности к рудам свинца и цинка не одинаковы. Так, в месторождениях собственно свинцовых руд минимальное содержание металла принимается 3 %, в собственно цинковых рудах — 5 %. В комплексных

свинцово-цинковых рудах содержащих примеси серебра, иногда кадмия и других элементов, количество свинца и цинка (в сумме) должно быть не ниже 3%, причем свинца не менее 1 %.

## Ресурсы и запасы

Мировые ресурсы свинца оцениваются в 1,5 млрд. т. Большая часть их сосредоточена в США, Австралии, Канаде, Казахстане, Китае, России, Мексике, Индии, ЮАР, Перу и Испании. Общие запасы свинца в мире составляли 220,2 млн. т, а подтвержденные – 136,3 млн. т. Около 65% мировых разведанных запасов свинца приходится на 8 стран, каждая из которых располагает запасами металла более 5 млн. т: это Австралия, Казахстан, Россия, США, Канада, Китай, Индия и ЮАР (табл. 6).

В США наиболее крупные месторождения свинца находятся в штате Миссури, где сконцентрировано примерно 30 % подтвержденных запасов, а также в штатах Айдахо, Колорадо и Аляска, где добыча полиметаллических руд производится уже несколько десятилетий.

В Австралии в 1995–2000 гг. геологоразведочные работы проводились на месторождениях Мак-Артур-Ривер (штат Северная Территория), Сенчери (штат Квинсленд), Кэд-жебат и Блендвэйл (штат Западная Австралия).

Мировые ресурсы цинка оцениваются в 1,8 млрд. т. Они сосредоточены в основном в Канаде, США, России, Перу, Казахстане, Китае, Индии и Испании. Общие запасы цинка в мире (без России) составляли 490 млн. т, а подтвержденные – 275 млн. т. Около 39,4 % подтвержденных запасов сосредоточено в Азии и 24,4 % в Америке (табл. 7).

В мире насчитывается около 43 крупных свинцово-цинковых месторождений с запасами каждого свыше 1 млн. т цинка. Наиболее крупными среди них являются Маунт-Айза, Хилтон (Австралия), Кидд-Крик, Салливан, Полярис (Канада), Рэд-Дог, Балмат-Эдвардс (США), Жайрем, Шалгия (Казахстан), Уч-Кулач (Узбекистан), Озерное, Холднинское, Горевское (Россия) и др.

Россия занимает первое место в мире по подтвержденным запасам цинка и третье – по общим (после Австралии и Канады). Около 95% запасов цинковых руд связаны

Таблица 6

## Запасы свинца (тыс. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание Pb в рудах, %
Россия	14150	13950	10,2	1,3
<b>ЕВРОПА</b>	28983	16837	12,4	...
Ирландия	2600	1750	1,3	2,1
Испания	4320	2315	1,7	1,5
Польша	3945	2435	1,8	1,3
Португалия	2000	1500	1,1	...
Швеция	1900	1490	1,1	2,3
Югославия	4480	2480	1,8	3,1
<b>АЗИЯ</b>	79307	45335	33,3	...
Азербайджан	1661	1525	1,1	1,5
Индия	6570	5674	4,2	1,6
Казахстан	20800	14860	10,9	1,3
Китай	17580	7200	5,3	6
Таджикистан	6550	4500	3,3	0,7
Узбекистан	4870	3200	2,3	1,8
Япония	1770	1770	1,3	1,0
<b>АФРИКА</b>	16850	9186	6,7	...
Марокко	4360	1800	1,3	5,7
ЮАР	8220	5130	3,8	5,0
<b>АМЕРИКА</b>	55675	30963	22,7	...
Бразилия	2900	1990	1,5	6,1
Канада	16500	9410	6,9	2,8
Мексика	4540	3510	2,6	1,8
Перу	3370	2500	1,8	1,1
США	25850	11850	8,7	3,5
<b>ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ</b>	24400	20000	14,7	...
Австралия	24400	20000	14,7	6,4

с колчеданно-полиметаллическими, полиметаллическими и медно-колчеданными месторождениями.

Уникальные месторождения имеют суммарные запасы свинца и цинка более 5 млн. т, очень крупные от 5 до 2 млн. т, крупные от 2 млн. т до 600 тыс. т, средние от 600 до 200 тыс. т и мелкие – менее 200 тыс. т.

Запасы цинка (тыс. т) в некоторых странах

Таблица 7

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание Zn в рудах, %
ЕВРОПА	66636	41210	15	...
Ирландия	13120	9220	3,4	10,2
Испания	8830	5510	2	...
Польша	12195	7100	2,6	3,7
Португалия	6000	4500	1,6	4,4
Югославия	5600	3470	1,3	4,4
АЗИЯ	182790	108284	39,4	...
Азербайджан	3758	3648	1,3	3,7
Индия	25550	17510	6,4	5
Иран	9600	5800	2,1	14
Казахстан	41175	34220	12,5	3,2
Китай	48100	15000	5,5	8
Таджикистан	7745	4660	1,7	0,6
Турция	6635	5335	1,9	6,2
Узбекистан	5553	4725	1,7	2,4
Япония	7505	6805	2,5	4,9
АФРИКА	35470	19094	7	...
ЮАР	15000	11800	4,3	5,3
АМЕРИКА	139650	67087	24,4	...
Канада	56000	23880	8,7	7,3
Мексика	7600	6600	2,4	4,1
Перу	10020	6100	2,2	4,4
США	50000	23500	8,6	3,0
ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ	65000	39000	14,2	...
Австралия	65000	39000	14,2	12,8

## Добыча и производство

Мировое производство свинца в концентратах в 1996 г. составляло около 3 млн. т. Основными странами-производителями являлись: Австралия, Китай, США, Перу, Канада, Мексика и Швеция. Они обеспечивали около 73 % мирового производства свинцовых концентратов. В каждой из этих стран выпуск продукции превышал 100 тыс. т. (в Китае 640 тыс. т, Австралии 475 тыс. т и США 435 тыс. т). В

России производство свинцовых концентратов в 1995–2000 гг. составляло 18–25 тыс. т.

Мировое производство цинка в 1996 г. достигло 7,3 млн. т (в пересчете на металл). Основными странами-производителями являлись: Канада, Китай, Австралия, Перу, США, Мексика, Бразилия, Ирландия, Испания, Швеция, Польша, Россия, Индия, Боливия и Казахстан. На долю этих стран приходилось около 88 % мирового производства цинковых концентратов.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

На ранней стадии геосинклинального этапа в связи с базальтоидным вулканизмом формировались преимущественно колчеданные месторождения, а на поздней стадии развития геосинклиналей и в связи с активизацией платформ и древних складчатых областей возникали разнообразные месторождения: скарновые в экзоконтактах гранитоидных интрузий; плутоногенные гидротермальные в карбонатных породах, гранитоидах и в метаморфических толщах; вулканогенные гидротермальные в связи с андезитриолитовыми формациями. На платформенном этапе в карбонатных толщах образовывались крупные стратиформные месторождения свинцово-цинковых руд. Свинцово-цинковые месторождения возникали в различные эпохи рудообразования, начиная с раннего протерозоя и до настоящего времени.

*Докембрийская эпоха рудообразования.* Свинец и цинк в целом не характерны для металлогении докембрия и обычно встречаются (преимущественно цинк) в качестве сопутствующих компонентов в рудах медноколчеданных месторождений. Тем не менее, в эту эпоху образовалось несколько уникальных по запасам и качеству руд месторождений – Брокен-Хилл, Маунт-Айза в Австралии и Салливан в Канаде. В России в Восточной Сибири разведаны Горевское и Холоднинское месторождения. Рудные залежи Горевского месторождения пласто- и линзообразной формы, залегают согласно с доломитизированными и окварцованными известняками, прорванными дайками и штоками оливиновых долеритов. С оливиновыми долеритами парагенетически связано оруденение. Основные руды

дообразующие минералы: галенит, сфалерит и пирротин (среднее содержание сульфидов в рудах 16–20 %).

*Раннепалеозойская (каледонская) эпоха рудообразования.* Промышленные месторождения свинца и цинка раннепалеозойского возраста встречаются редко. В странах дальнего зарубежья заслуживает внимания месторождение Бродвин в Мьянме (Бирме). Оруденение приурочено к толще эффузивных образований (мощность рудного тела около 15 м, рудные минералы — галенит, сфалерит и халькопирит). Разведанные запасы 6,3 млн. т руды, среднее содержание Pb 14,8 %, Zn 8,2 %, Ni 2 % и Co 1 %. В России в раннем палеозое сформировались полиметаллические месторождения Салаирского и Урского рудных районов в Западной Сибири. Руды этих месторождений приурочены к комплексу эффузивно-осадочных пород нижнего кембрия. Колчеданно-полиметаллические месторождения выявлены также в вулканогенно-осадочных комплексах Западного Прибайкалья и в Республике Саха.

*Позднепалеозойская (герцинская) эпоха рудообразования* ознаменовалась формированием крупных месторождений полиметаллических руд в США и Канаде. В США в эту эпоху возникла крупнейшая в мире провинция полиметаллических месторождений долины Миссисипи. Рудная минерализация здесь проявилась в форме замещения карбонатных пластов или выполнения трещин в брекчированных кремнистых породах. Среднее содержание цинка в добываемой руде составляет 3–5 %, свинца 0,4–1 %. В Канаде к позднепалеозойскому возрасту относится одно из крупнейших в мире месторождений Пайн-Пойнт, разведанное близ Большого Невольничьего озера. Полиметаллическое оруденение приурочено к доломитам, в которых рудные минералы (сфалерит, галенит, марказит и пирит) выполняют пустоты. Содержание цинка в рудах составляет 7,4 %, свинца 4 %.

Промышленные месторождения свинца и цинка этого возраста выявлены в Германии, Италии, Франции, Ирландии и других странах. В Ирландии разрабатываются относительно крупные месторождения Тайнах, Сильвермайнз и Нейвен.

*Мезозойская эпоха рудообразования.* Среди полиметаллических месторождений в Европе большой интерес представляют метасоматические свинцово-цинковые месторо-

ждения Польши. Они приурочены к известнякам и доломитам нижнего и среднего триаса. По масштабу минерализации особенно выделяется Бейтенская синклиналь. В Испании к мезозойской эпохе рудообразования относится самое крупное в стране месторождение цинка Реосин, приуроченное к доломитам аптского возраста (содержание в руде Zn 15 % и Pb 2,5 %).

В России мезозойские месторождения полиметаллических руд развиты преимущественно в Забайкалье и Приморском крае. В большинстве разведанных месторождений главными рудными минералами являются: пирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, буланжерит, тетраэдрит, халькопирит и аргентит. Среди забайкальских полиметаллических месторождений различают следующие основные структурные типы рудных тел: 1) трубы в известняках и доломитах на пересечении либо в сочленении сколовых трещин; 2) линзообразные тела в зонах смятия среди углисто-известковисто-глинистых сланцев, сопровождаемые штокверками в апикальных частях небольших интрузивов гранитоидов; 3) рудные штоки в известняках в зонах древних карстов; 4) штокверковые зоны в пластах известняков среди сланцев; 5) линзы и пластовые метасоматические тела в известняках и сланцах, пересеченных разломами. На Дальнем Востоке мезозойский возраст имеют месторождения Тетюхинской группы в Приморском крае, принадлежащие к типу инфильтрационных скарнов.

*Кайнозойская эпоха рудообразования* ознаменовалась формированием месторождений, сосредоточенных преимущественно в странах Западного полушария, особенно в США, Канаде, Мексике и Перу. Для этих рудных районов характерно широкое проявление наряду с цинком и свинцом также серебра. В США большинство месторождений расположено в Кордильерах, где особенно интенсивно проявились тектонические движения и вулканическая деятельность в кайнозое. Большое экономическое значение имеет район Кер д'Ален в штате Айдахо.

Полиметаллические месторождения в Мексике распространены почти повсеместно. Наибольшей продуктивностью отличаются месторождения в пределах Мексиканского плато. Они генетически связаны с третичными, преимущественно миоценовыми аляскитами, диоритами и кварцевыми монзонитами. К этому типу интрузивной деятель-

ности относятся также мощные излияния андезитов и риолитов, к которым приурочены многие месторождения. В Перу большая часть полиметаллических месторождений расположена вдоль главного хребта Высоких Анд, где они прослеживаются на протяжении более 350 км. Месторождения приурочены обычно к вулканогенно-осадочным образованиям третичного возраста и генетически связаны со штоками и дайками монзонит-порфиоров и другими гипабиссальными интрузиями. Большое экономическое значение имеет месторождение Серро де Паско, расположенное в вулканической кальдере на высоте 4500 м. Запасы руд месторождения составляют 45 млн. т при содержании Pb 3 %, Zn 9 %, Cu 0,15 %, Bi 0,23 % и Ag 142 г/т. Крупными являются также месторождения полиметаллических руд Морокоча и Касапалка.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Основными типами промышленных месторождений свинца и цинка являются: 1) скарновые, 2) плутоногенные гидротермальные, 3) вулканогенные гидротермальные, 4) стратиформные, 5) колчеданные, 6) метаморфизованные.

*Скарновые месторождения* приурочены обычно к контактовой или экзоконтактовой зонам интрузивов и вмещающих осадочных или вулканогенно-осадочных толщ, содержащих пласты известняков. Оруденение, как правило, контролируется разрывами, межформационными срывами, зонами трещиноватости и брекчирования. Форма рудных тел пластообразная, линзовидная, жилеобразная. Протяженность их многие сотни метров, мощность — десятки метров.

Минеральный состав руд определяется комбинацией скарнообразующих силикатов и сульфидных минералов (галенит, сфалерит, реже халькопирит, пирротин, арсенопирит, пирит и др.). Кроме свинца и цинка в рудах скарновых месторождений содержится немного меди, висмута, серебра, кадмия и индия. Нерудные минералы представлены чаще всего пироксенами — диопсидом, авгитом, геденбергитом и др.

Минералообразование руд скарновых месторождений было многостадийным, главными являлись следующие стадии: предрудная скарновая (800–600 °С), продуктивная сульфидная или галенит-сфалеритовая (240–150 °С) и послерудная кварц-кальцитовая (80–50 °С).

Скарновые месторождения свинца и цинка известны в России (месторождение Верхнее в Приморском крае), Казахстане (Кызыл-Эспе, Аскоран), Швеции (Аммаберг, Сала), США (Лоуренс, Франклин-Фернас), Мексике (Эль-Потоси), Китае (Тембушань) и других странах.

Характерным представителем этого типа является *месторождение Верхнее*. Оно расположено в пределах Дальнегорского рудного поля в Приморском крае. В районе месторождения развита толща верхнетриасовых известняков, на которую по Главному разлому надвинуты кварцевые порфиры позднемелового возраста (рис. 26). Оруденение приурочено к зоне надвига. Основное рудное тело имеет форму трубообразной залежи, вытянутой вдоль Главного разлома. Вблизи земной поверхности рудное тело расщепляется на три ветви. Длина рудного тела по простиранию

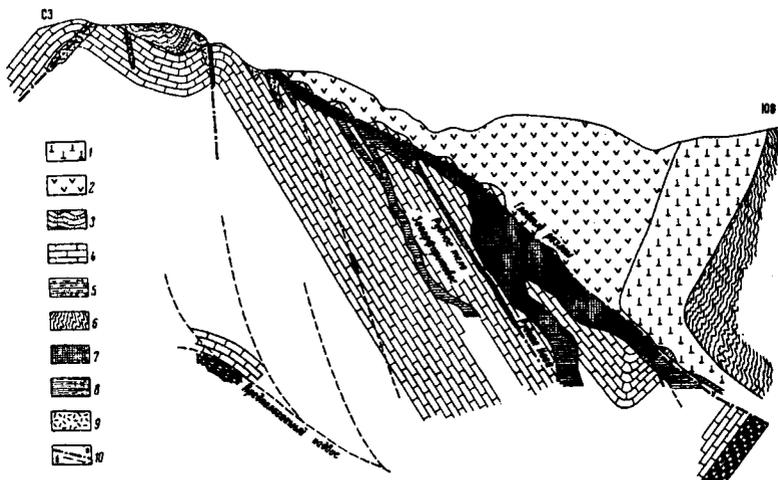


Рис. 26. Схематический геологический разрез месторождения Верхнего (по И. Томсону и Н. Мозговой):

1 – андезиты; 2 – кварцевые порфиры; 3 – кремнистые песчано-сланцевые породы; 4 – известняки; 5 – песчано-сланцевые породы; 6 – кремнистые сланцы; 7 – скарновое рудное тело; 8 – проекция рудного тела; 9 – окисленная руда; 10 – разломы (а – установленные, б – предлагаемые)

на поверхности 250 м; по вертикали основная залежь прослежена на 600 м. На нижнем горизонте в лежащий бок надвига от основного рудного тела отходят два ответвления, так называемые «ноги».

Руды месторождения содержат сфалерит, галенит, халькопирит, пирротин, пирит, немного арсенопирита, кубанита и блеклой руды. Наблюдаются также сульфосоли серебра и висмута. Основные нерудные (жильные) минералы — мангангеденбергит, андрадит, аксинит, датолит, ильваит, местами тремолит, кварц, кальцит, марганосидерит.

Процесс минералообразования на месторождении был длительным и многостадийным. Выделяются четыре главные стадии: 1) прерудная скарновая — волластонит-гранатовая (свыше 600 °С), 2) скарново-сульфидная (600–400 °С), 3) сфалерит-галенитовая (350–120 °С), 4) халцедон-кальцитовая (100–20 °С).

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* имеют большое экономическое значение в мировой добыче свинца и цинка. Они разрабатываются во многих странах: в России (Екатерино-Благодатское, Кадаинское, Згид и др.), США (Тинтик, Кер д'Ален, Ледвилл), Канаде (Кен-Хилл), Болгарии (Руен, Говедарник), Чехии (Пшибрам) и др. Оруденение пространственно и парагенетически связано с интрузиями гранодиорит-порфириров или гранит-порфириров, а также с дайками диорит-порфириров и диабазовых порфириров. Рудные тела имеют пластообразную, линзовидную, штоко-, трубо- и жилообразную форму и прослеживаются на десятки — сотни метров, а отдельные жилы — на 1–2 км по простиранию. Мощность рудных тел варьирует от 0,5 до 200 м. Главные рудные минералы: сфалерит, галенит, пирротин, арсенопирит, марказит, буланжерит, джемсонит; жильные — кварц, кальцит и доломит.

Среди месторождений этого типа выделяют две формации — *метасоматическую пирит-галенит-сфалеритовую в карбонатных породах* (Екатерино-Благодатское, Тинтик и др.) и *жильную галенит-сфалеритовую в гранитоидах и сланцах* (Згид, Садонское). Типичным примером месторождений метасоматической пирит-галенит-сфалеритовой формации в карбонатных породах является *Екатерино-Благодатское месторождение*. Оно находится в Восточном Забайкалье в пределах северо-восточной части полиметаллического пояса. Рудоносная площадь сложена доломити-

зированными известняками нерчинско-заводской свиты, содержащей пачки углисто-глинистых сланцев и полосчатых доломитов. Породы смяты в складки, прорваны дайками порфириров и лампрофириров и разбиты многочисленными разрывами. Трубообразные рудные тела связаны с наиболее трещиноватыми доломитизированными разновидностями карбонатных пород и локализуются на участках пересечения секущих субмеридиональных разрывов с субширотными нарушениями. Основная масса руд сконцентрирована в серых доломитизированных известняках. Руды характеризуются сложным составом и представлены в основном пиритом, сфалеритом, галенитом и сульфосолями. Вмещающие карбонатные породы подвергнуты гидротермальным изменениям и, как правило, окварцованы.

Типичным представителем жильных месторождений галенит-сфалеритовой формации является *месторождение Згид* на Северном Кавказе. Оруденение приурочено к тектоническому нарушению и представлено жилами, в которых встречаются рудные столбы. Главные рудные минералы: галенит, сфалерит и халькопирит; жильные — кварц, манганосидерит, кальцит. Текстуры руд массивные, брекчиевые, полосчатые и крустификационные, структуры — крупнокристаллические, коррозионные и др. Рудовмещающие граниты окварцованы, серицитизированы, местами карбонатизированы и хлоритизированы.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* свинца и цинка, как правило, содержат также серебро. Они известны в России (Новоширокинское в Забайкалье), Армении (Шаумян), Болгарии (Маджарово), Перу (Касапалка), Украине (Береговское, Беганьское) и других странах. Оруденение приурочено к жерловым, экструзивным и субвулканическим фациям вулканитов. Месторождения пространственно связаны с вулканическими структурами, и в частности, с зонами дробления и трещинами-кольцевыми, радиальными и линейными. Рудные тела имеют жильную, линзовидную или штокверковую форму.

Главные рудные минералы: сфалерит, галенит, пирит и халькопирит; жильные — кварц, кальцит, реже барит и флюорит. Второстепенные рудные минералы: арсенопирит, блеклая руда, борнит, пираргирит, аргентит, буланжерит. Текстуры руд — прожилковые, полосчатые брекчиевые и крустификационные, структуры — мелко- и среднезерни-

стые, колломорфные, метаколлоидные. Минералообразование происходило в несколько стадий. Руды сформировались в интервале температур 300–100 °С на глубине от первых сотен метров до 1000 м.

*Месторождение Маджарово* находится в Восточно-Родопском рудном районе в Болгарии. Оно известно с римских времен. Месторождение локализовано в протерозойских метаморфических породах – гнейсах, амфиболитах, мраморах – и в палеозойских диабазах, сланцах и филлитах, прорванных телами ультрабазитов. Эффузивные породы встречаются в центральной и северной частях района и представлены трахиандезитами, андезитами и их туфами (рис. 27). Рудные жилы имеют преимущественно радиальный характер и ответвляются от центральной части месторождения. Они имеют кварцево-сульфидный, кварцево-баритово-сульфидный и кварцево-кальцитово-сульфидный состав. Главными минералами являются галенит, сфалерит, халькопирит, пирит и спекуларит.

*Стратиформные месторождения* связаны обычно с мощными карбонатными толщами преимущественно палеозойского и мезозойского возраста. Для этих месторождений характерен четкий стратиграфический и литофациальный контроль, а также отсутствие в непосредственной близости магматических комплексов. Рудные тела представлены, как правило, согласными пластовыми или лентовидными залежами, которые характеризуются большой протяженностью по простиранию (от сотен метров до первых километров) и значительной мощностью (от 0,5 до 200 м). Главные рудные минералы: сфалерит, галенит, пирит; жильные – кальцит, доломит, реже барит.

Месторождения этого типа широко распространены на Земле: Сардана (Республика Саха), Миргалимсай и Шалгия в Казахстане, Седмочисленицы (Болгария), Окульш и Болеслав (Польша), Бляйберг (Австрия), Малин, Трев и Ларжатьер (Франция), Эль-Абед (Алжир), Бу-Беккер (Марокко), Миссисипи-Миссури (США) и т. д.

Особую известность имеет группа стратиформных месторождений *Миссисипи – Миссури*. Они расположены в долине р. Миссисипи. Здесь в пределах активизированной платформы оруденение развивалось в нижнепалеозойских отложениях, несогласно залегающих на протерозойском кристаллическом основании. Свинцово-цинковая минера-

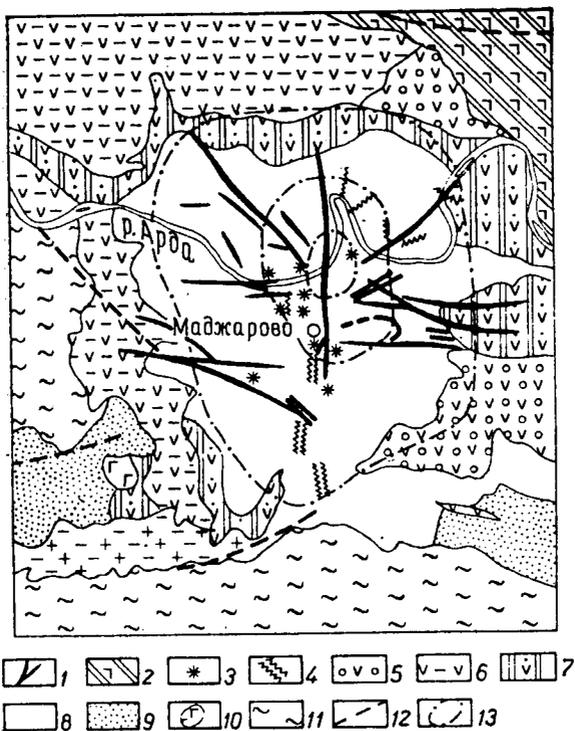


Рис. 27. Геологическая карта рудного поля Маджарово (по Афанасьевой, Черкасову, Маврудчиеву и Гергелчеву):  
 1 – рудные жилы; 2 – верхняя осадочно-туфогенная свита; 3 – гипабиссальные интрузивы; 4 – дайки андезитов; 5 – дациты и их туфы; 6 – андезиты; 7 – андезито-базальты; 8 – трахиандезиты и их туфы; 9 – нижняя осадочно-туфогенная свита; 10 – серпентиниты; 11 – метаморфические породы; 12 – тектонические разрывные нарушения; 13 – контур эксплозивной кальдеры

лизация распространена в вертикальном разрезе на 800 м во всех палеозойских образованиях, начиная от верхнекембрийских песчаников Ламотт и кончая отложениями нижнего ордовика. Главные рудные минералы: галенит и сфалерит; второстепенные – халькопирит, халькозин, энаргит, миллерит, пирит, марказит, иногда зизенит и бравойит. Месторождения разрабатываются более 100 лет, а в юго-восточной части Миссури 250 лет. Главным производителем свинца являются месторождения юго-восточной части Миссури, а цинка – Три-Стейтс (штаты Миссури, Канзас и Оклахома).

*Колчеданные месторождения* известны в России (Холоднинское, Озерное в Забайкалье), Казахстане (Жайрем, Текели и др.), Германии (Раммельсберг), Испании (Рио-Тинто), Норвегии (Блейквассли), Турции Эргани-Маден (Эргани), США (Вест-Шафта), Канаде (Салливан). Крупные месторождения находятся в Рудном Алтае (Риддер-Сокольное, Лениногорское, Зыряновское и др.). Пространственно и генетически они связаны с кислыми производными базальтоидного вулканизма и приурочены к вулканокупольным структурам, жерловым структурам, вулканотектоническим и межвулканическим депрессиям, зонам трещиноватости и разломам кольцевого и линейного типа.

Форма рудных тел чаще всего пластообразная, линзовидная, жильная, иногда наблюдаются рудные штокверки. Размеры пластообразных залежей достигают 0,5–2 км по простиранию и 500–600 м и более по падению при мощности от нескольких до 20 м и более. Руды по составу свинцово-цинковые, медно-свинцово-цинковые и свинцовые. Господствующим минералом является пирит, на долю которого приходится до 80–90 % от всей массы рудных минералов; главные минералы: сфалерит, галенит, иногда халькопирит; второстепенные – пирротин, арсенопирит, бурнонит, блеклые руды и марказит.

Среди колчеданных месторождений выделяются две рудные формации: 1) *халькопирит-галенит-сфалерит-пиритовая* в вулканогенных комплексах (Зыряновское, Риддер-Сокольное, Рио-Тинто, Шаканаи); 2) *галенит-сфалерит-пиритовая* в вулканогенно-терригенных и вулканогенно-карбонатных комплексах (Жайрем, Раммельсберг).

*Зыряновское месторождение.* В геологическом строении его участвуют метаморфические сланцы нижнего палеозоя и среднепалеозойские отложения ( $D_2 + D_3 + C_1$ ). Толща среднего девона (эйфельский ярус) сложена тремя свитами – березовской, таловской и маслянской. Полиметаллическое оруденение локализуется в породах этих свит. Все они смяты в сложную сундучную складку – Ревнюшинскую антиклиналь, разбитую серией разломов северо-западного и субширотного простирания. В районе месторождения развиты интрузивные породы среднего карбона (габбро и габбро-диориты), верхнего карбона (гранитоиды змеиногогорского комплекса), перми (гранитоиды калбинского комплекса и дайки диоритов и лампрофиров). Породы под-

вержены интенсивному рассланцеванию и динамометаморфизму. Крупные рудные тела приурочены к участкам пересечения разрывных нарушений северо-западного и субширотного простирания. Наиболее оптимальны для замещения сульфидными рудами алевролиты и именно в них развиты все полиметаллические залежи, сложенные массивными рудами, и большая часть прожилково-вкрапленных руд. Гидротермальные изменения вмещающих пород выразились в серицитизации, хлоритизации, окварцевании и карбонатизации алевролитов и серицитизации и окварцевании вулканических пород кислого состава. В рудах выделяются пирит-халькопиритовая, существенно сфалеритовая и галенитовая парагенетические ассоциации.

*Метаморфизованные месторождения* свинца и цинка выявлены в России (Горевское и Россохинское в Енисейском крае, Таборное и Таежное в Прибайкалье), США (Юнайтед-Верде), Канаде (Флин-Флон), Индии (Мохна-Магра), Австралии (Брокен-Хилл, Маунт-Айза, Мак-Артур-Ривер). Они приурочены, как правило, к протерозойским и нижнепалеозойским кристаллическим и метаморфическим сланцам и мраморизованным известнякам, слогающим щиты или древние складчатые области. Рудные тела представлены пластовыми и пластообразными залежами большой протяженности (сотни метров — первые километры) при мощности их 10—100 м. Метаморфические изменения вмещающих пород проявились в их перекристаллизации и метаморфизме до эпидот-амфиболитовой, биотит-гранатовой, гранат-амфиболитовой и гранулитовой фаций. Среди метаморфизованных месторождений известны две рудные формации: 1) *пирротин-пирит-сфалерит-галенитовая* в метаморфизованных карбонатных породах (Горевское месторождение и др.); 2) *галенит-сфалерит-пирротин-пиритовая* в метаморфизованных осадочных силикатных породах (Брокен-Хилл, Россохинское и др.).

*Месторождение Брокен-Хилл* (рис. 28) расположено в юго-западной части Нового Южного Уэльса в Австралии и является одним из самых крупных в мире месторождений полиметаллических руд. Открыто в 1883 г. За время эксплуатации на нем добыто более 100 млн. т руды и извлечено свыше 15 млн. т свинца и 10 млн. т цинка. Главные рудные тела месторождения залегают в форме отдельных линз и седловинных залежей, приуроченных к зоне шири-

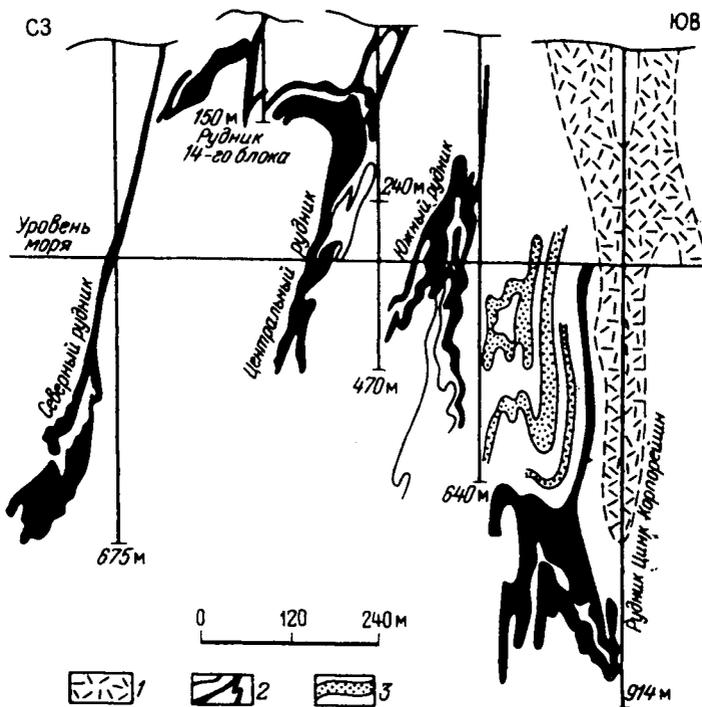


Рис. 28. Разрезы через месторождение Броккен-Хилл (по Э. Эндрюсу):  
 1 — гнейсы; 2 — свинцово-цинковые руды; 3 — цинковые руды

ной 300 м и протяженностью более 7 км. Вмещающими породами являются нижнепротерозойские кварциты, кристаллические сланцы, амфиболиты и силлиманит-гранатовые гнейсы. Минерализация носит отчетливо выраженный высокотемпературный характер. Главные рудные минералы сфалерит, галенит и магнетит, жильные — родонит, флюорит, кварц, кальцит и др. Руды содержат в среднем 10–13% свинца, 11,5% цинка и до 250 г/т серебра.

Рудопроявления в Беларуси. Проявления свинца и цинка имются в породах кристаллического фундамента. *Рубежовичское проявление* связано с колчеданно-полиметаллической формацией. В скв. № 38ж, вскрывшей метасоматически измененные породы в отдельных интервалах выявлена сульфидная минерализация. В интервале глубин 465–505 м сульфидная минерализация представлена вкрапленностью и прожилками сфалери-

та и галенита с примесью халькопирита, пирита, марказита и гематита. Среднее содержание Zn 8 %, максимальное — 10 %, Cu — 0,1 %. С сульфидно-полиметаллической формацией связаны мелкие *рудопоявления Ельня и Ляцкое*, расположенные вблизи Щучинского глубинного разлома. Вмещающие породы подверглись гидротермальной проработке: хлоритизированы, биотитизированы, окварцованы, скаполитизированы и содержат вкрапленность и тонкие прожилки сульфидов. Среди последних выделены: галенит, сфалерит, пирит, пирротин; редко встречаются халькопирит, арсенопирит, молибденит, марказит.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛОВА

### Краткие исторические сведения

Олово принадлежит к числу первых металлов, ставших известных человеку. Широкое его применение в сплавах с медью определило продолжительную и важную эпоху в истории развития материальной культуры человечества — «бронзовый век» (4000–1000 лет до н. э.). Из бронзы тогда изготавливали оружие, посуду, орудия производства, монеты. Добыча его велась в древности еще финикийцами на месторождениях Корнуоллского полуострова (Великобритания). Следы древних разработок оловянных руд известны в Южном Китае, Боливии, Калбо-Нарымском районе (Рудный Алтай). До революции Россия практически не имела собственной сырьевой базы, за исключением мелких месторождений Питкяранта в Карелии и Онон в Забайкалье.

Олово — серебристо-белый металл, имеющий температуру плавления 231,9 °С и высокую температуру кипения 2270 °С, очень мягкий, ковкий, химически устойчив по отношению к воде, кислороду и органическим кислотам. Блестящее олово устойчиво лишь при температуре выше –13,2 °С. При более низких температурах оно переходит в свою темно-серую модификацию, при этом теряет металлические свойства и превращается в порошок. Этот процесс («оловянная чума») особенно интенсивно протекает при температуре –33 °С. В 1912 г. во время экспедиции Роберта Скотта к Южному полюсу на обратном пути «оловянная чума» разрушила оловянный припой в баллонах с керосином и люди остались без тепла и горячей пищи.

### Геохимия

Олово — достаточно распространенный в земной коре элемент, кларк его по А. П. Виноградову составляет  $2,5 \cdot 10^{-4} \%$ .

Повышенные концентрации характерны для кислых гранитов, грейзенов, пегматитов, для терригенных песчано-сланцевых пород. Основными минералами-концентраторами Sn служат аксессуарный касситерит и биотит. Известно десять стабильных изотопов олова с массовыми числами 112, 114–120, 122 и 124, среди которых преобладают  $^{116}\text{Sn}$ ,  $^{118}\text{Sn}$  и  $^{120}\text{Sn}$ .

Олово – элемент с двойственной геохимической природой, преимущественно литофильный и отчасти халькофильный, в зависимости от режима кислорода и серы. В результате у него повышенное химическое сродство, с одной стороны, к кислороду и частично к кремнию, а с другой – к сере. В эндогенных условиях олово образует высоколетучие галоидные соединения, в форме которых оно обычно выносится из магматического очага. В гипергенных условиях касситерит устойчив и может образовывать россыпи, в то время как сульфостаннаты олова окисляются и замещаются колломорфным касситеритом.

## Минералогия

В природе известно около 20 минералов олова. Основное промышленное значение в составе оловянных руд имеют касситерит, станнин, тиллит и франкеит.

*Касситерит*  $\text{SnO}_2$  (содержание Sn 78,6 %), практически всегда наблюдаются примеси Fe, Mn, W, Ta, Nb и Sc. Касситерит кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы призматические, дипирамидальные, игольчатые, характерны агрегаты зернистые, радиально-лучистые, натечные и концентрически-зональные. Твердость 6–7, плотность 6,5–71 г/см<sup>3</sup>.

*Станнин*  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  (содержание Sn 27,5 %) кристаллизуется в тетрагональной сингонии, агрегаты обычно зернистые, цвет оливково-серый, блеск металлический, твердость 3–4, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>. Встречается гораздо реже касситерита, наблюдается в парагенезисе с галенитом, сфалеритом, халькопиритом, игольчатым касситеритом, различными сульфосолями. При выветривании за счет станнина после ряда промежуточных стадий образуется супергенный касситерит в виде порошковатых и землистых агрегатов.

*Тиллит*  $\text{PbSnS}_2$  (Sn 30,4 %) (по фамилии Тилл) кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов таблитчатый, агрегаты листоватые, цвет светло-серый, блеск металлический, твердость 2, плотность 6,4 г/см<sup>3</sup>. Встречается в серебро-оловянных и сульфидно-касситеритовых месторождениях малых глубин.

*Франкеит*  $\text{Pb}_5\text{Sn}_3\text{Sb}_2\text{S}_{14}$  (Sn 17 %) (по фамилии Франк) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы тонко таблитчатые, агрегаты розетковидные и сферические. Цвет и черта серовато-черные, блеск металлический, твердость 1–2, плотность 5,9–6,0 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гидротермальных свинцово-цинковых, оловянных и серебро-оловянных месторождениях малых и средних глубин.

## Применение в промышленности

Олово нашло широкое применение благодаря своей легкоплавкости, ковкости, химической устойчивости и способности давать высококачественные сплавы. С изобретением в начале XIX в. способа изготовления белой жести — тонких листов железа, покрытых с обеих сторон оловом для защиты от коррозии, — эта отрасль промышленности стала важнейшим потребителем металла и до настоящего времени не потеряла своего значения. Для изготовления белой жести, используемой в консервной промышленности, необходимо наиболее чистое олово с минимальным содержанием примесей (Sb, Pb, As). На каждую консервную банку расходуется около 0,5 г олова. Сплав олова с цирконием применяется для покрытия трубок с ураном в атомных реакторах, а с титаном — в самолетостроении и космической технике.

Основными отраслями, потребляющими олово, являются: пищевая (до 40 %), авиа-, авто- и судостроительная, радиотехническая промышленность, а также типографское дело, красильное производство, гальванопластика, стекольная и текстильная промышленность. Структура потребления олова в разных странах весьма различна. Так, в США на производство белой жести приходится примерно половина общего производства олова, на припой — 23 %, бронзу — 8 %, лужение — 4 %.

## Ресурсы и запасы

Минерально-сырьевая база оловодобывающей промышленности мира представлена как собственно оловянными, так и комплексными оловосодержащими месторождениями. Ресурсы олова выявлены в недрах 63 стран и на начало 1997 г. оценивались в 47 млн. т. Наиболее значительными ресурсами олова обладают Бразилия (12,8 % суммарных мировых ресурсов), Китай (12,3 %), Индонезия (10,6 %), Малайзия (9,8 %), Таиланд (9,6 %) и Россия (7,6 %).

Общие запасы олова в недрах 39 стран мира оцениваются в 10,1 млн. т, из них подтвержденные составляют 7,5 млн. т. В географическом распределении общих и подтвержденных запасов олова ведущие позиции занимают месторождения Азии, в которых сосредоточено 48,2 % общих и 59,3 % подтвержденных мировых запасов, в месторождениях Америки заключено, соответственно 35,3 % и 25,2 %, Африки — 6,7 % и 5,6 %, Европы (включая Россию) — 5,8 % и 7,1 %, Австралии — 4 % и 2,8 % (табл. 8).

Минерально-сырьевая база оловодобывающей промышленности мира характеризуется высокой степенью концентрации запасов: в восьми ведущих странах-держателях запасов олова (Китай, Бразилия, Малайзия, Индонезия, Таиланд, Боливия, Россия и Австралия) сосредоточено почти 84,5 % мировых подтвержденных запасов этого металла.

В Китае, занимающем ведущее место в мире по подтвержденным запасам олова, около 75 % их количества заключено в коренных месторождениях. Преобладающее значение имеют месторождения касситерит-сульфидного типа, залегающие в карбонатных толщах. В рудном узле Дачан (Гуанси-Чжуанский автономный район) такие месторождения представлены в основном многочисленными крутопадающими жилами протяженностью 150–450 м, мощностью 0,2–2 м и прослеженными на глубину до 350 м. В оловорудном районе Гэцзю (провинция Юньнань) наиболее крупные месторождения представлены пологозалегающими рудными телами известковых и магниезиальных оловоносных скарнов с наложенным касситерит-сульфидным орудением. Комплексные руды таких месторождений содержат до 5–7 % олова.

Таблица 8

## Запасы олова (тыс. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Из них в россыпях	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Из них в россыпях	Содержание Sn, %	Содержание касситерита, кг/м <sup>3</sup>
Россия	300	...	300	4,0	...	...	...
Европа	285	...	234	3,1	...	...	...
Португалия	85	—	70	0,9	—	2,6	—
Франция	65	—	65	0,9	—	0,13	—
Азия	4850	3347	4432	59,3	3070	...	...
Индонезия	800	800	750	10,0	750	—	0,5
Китай	1800	500	1600	21,4	400	0,5	0,8
Малайзия	1200	1200	1200	16,1	1200	—	0,3
Таиланд	700	700	600	8,0	600	—	0,4
Африка	680	289	415	5,6	136	...	...
Заир	400	190	210	2,8	50	0,2	1,2
Нигерия	110	90	90	1,2	80	0,8	0,35
Америка	3555	815	1880	25,2	615	...	...
Боливия	900	—	450	6,0	—	0,35	—
Канада	155	—	90	1,2	—	0,17	—
Перу	400	—	100	1,3	—	5	—
Океания и Австралия	400	20	210	2,8	20	...	...
Австралия	400	20	210	2,8	20	1,6	0,4

В Бразилии половина всех подтвержденных запасов олова заключена в россыпных месторождениях, сконцентрированных в 15 оловорудных районах. Преобладают аллювиальные россыпи. Наиболее крупными являются два оловорудных района: Мапуэра в штате Амазонас и Рондония в одноименном штате.

При промышленной оценке коренных месторождений олова руды разделяются на богатые (содержание Sn более 1%), среднего качества, содержащие 0,4–1,0 %, и бедные — 0,2–0,4 % Sn. Для россыпных месторождений, разрабатываемых гидравлическим способом, предельное содержание касситерита в песках составляет около 300 г/м<sup>3</sup>, при дражной разработке — около 200 г/м<sup>3</sup>. Россыпи, пригодные к подземной разработке, должны иметь содержание касситерита примерно 800–850 г/м<sup>3</sup> при выемочной мощности продуктивного пласта не менее 1,6 м.

По запасам металла (тыс. т) оловянные месторождения подразделяются на весьма крупные (100), крупные (от 25 до 100), средние (5–25) и мелкие (менее 5).

## **Добыча и производство**

Добыча оловосодержащих руд и производство олова в концентратах осуществляются более чем в двадцати странах. Суммарный объем рудничного производства олова в 1995–2000 гг. составлял 200–220 тыс. т. В мировом рудничном производстве олова в течение последних десяти лет продолжалось постепенное снижение роли россыпных месторождений. На них в 1996 г. было получено уже менее половины оловянных концентратов, против более 60 % в 1992 г. Основными странами-производителями олова в концентратах являются: Китай (28,5 % мирового производства), Индонезия (24,4 %), Перу (12,8 %), Бразилия (9,6 %), Боливия (7,2 %), Австралия (4,3 %) и Россия (3,8 %). Крупнейшими оловодобывающими компаниями являются «*P. T. Tambang Timah*» (Индонезия), «*Minsur*» (Перу), «*Yunnan Tin Corp.*» (Китай), «*Dachang Mining Bureau*» (Китай) и «*Parapaneta*» (Бразилия).

## **Металлогения и эпохи минералообразования**

Эндогенные месторождения олова формировались на средней и поздней стадиях геосинклинального этапа и связаны с кислыми и умеренно-кислыми магмами. Оловоносные районы разведаны также на щитах и древних платформ, окаймленных складчатыми поясами. Особенно продуктивны по олову древние активизированные щиты и платформы Гондваны.

Оловоносные гранитные массивы и отдельные рудные поля оловянных месторождений контролируются в основном шарнирами крупных антиклинальных сооружений и участками изгиба осей складок, осложненных глубинными разломами, особенно в местах их пересечения и изгибов.

Месторождения олова, также как и месторождения большинства других металлов, образовывались в различные эпохи, причем наблюдается закономерное увеличе-

ние числа месторождений и количества запасов от древних эпох к молодым.

В *докембрийскую эпоху* формировались месторождения олова Карелии, а также в Африке и Австралии. Это преимущественно оловоносные пегматиты и грейзены, а также контактово-метасоматические месторождения. Самый крупный район развития докембрийского оловянного оруденения расположен в Заире. Здесь находится месторождение Манано-Китотоло (среднее содержание Sn в руде 0,1—0,13 %, главный рудный минерал торолит). В Австралии с оловоносными пегматитами связано месторождение Вуджина.

Месторождения олова нехарактерны для *раннепалеозойской (каледонской) эпохи* и редко встречаются в породах этого возраста. Промышленная оловоносность, связанная преимущественно с гранитами, известна в России (Дальний Восток), Китае, США (штат Северная Каролина) и Нигерии.

*Позднепалеозойская (герцинская) эпоха.* Промышленные месторождения олова этого возраста также не имеют большого экономического значения, но встречаются более часто, чем раннепалеозойские. В Австралии выявлены месторождения олова в восточной зоне герцинид, протягивающейся через весь континент до о. Тасмания. Наиболее крупным является месторождение Эйберфойл (содержание в руде Sn 0,6 % и W 0,7 %). Небольшие месторождения олова имеются в Великобритании, Португалии и Испании. Относительно крупные месторождения разрабатываются в Германии (Альтенберг) и Чехии (Циновец).

В *мезозойскую эпоху* сформировалась преобладающая часть мировых ресурсов олова, сосредоточенных в Малаккской оловоносной провинции Юго-Восточной Азии. Все коренные месторождения олова генетически связаны с мезозойскими порфирированными биотит-мусковитовыми гранитами. Здесь самое крупное месторождение Сангей-Лембанг. В России большинство месторождений олова этого возраста сосредоточено в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Месторождения олова широко распространены на юго-востоке Китая. Образование их тесно связано с интрузиями яньшаньских гранитов. Из разнообразных типов оловянного оруденения наибольший практический интерес представляют касситерит-сульфидные руды.

Преобладающая часть мировых ресурсов олова заключена в месторождениях, образовавшихся в *кайнозойскую эпоху*. Это в основном россыпные месторождения. Среди них по своим масштабам и запасам выделяются богатейшие россыпные месторождения Малаккской оловоносной провинции. Россыпи, содержащие касситерит, разрабатываются также в Нигерии, Заире, Австралии и других странах. Крупные коренные месторождения третичного возраста сосредоточены в Южно-Американской оловоносной провинции. Особенно большими запасами олова располагает Боливия. Здесь полоса распространения месторождений приурочена к Боливийским Андам. По особенностям геологического строения и характеру оруденения в Боливии выделяются два района: Северный (Кордильера-Реаль) и Южный. Основные запасы олова сосредоточены в Южном районе. Рудная минерализация района отличается большим разнообразием. Среди промышленных руд выделяются богатые оловянные разности преимущественно касситерит-сульфидной формации. По масштабам минерализации и запасам особенно выделяется месторождение Ллалагуа.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Среди промышленных месторождений олова известны: 1) пегматитовые, 2) скарновые, 3) грейзеновые, 4) плутоногенные гидротермальные, 5) вулканогенные гидротермальные, 6) россыпные.

*Пегматитовые месторождения.* Это, как правило, высокотемпературные образования, генетически связанные с интрузивами порфиroidных гранитов с повышенной глиноземистостью и с преобладанием натрия над калием. В пределах интрузивных массивов тела оловоносных пегматитов представлены линзами, трубообразными залежами и шлировыми образованиями. Размеры рудных тел небольшие, но в отдельных случаях могут достигать сотен метров по простиранию и десятки метров по мощности. Главным рудным минералом является касситерит, который распределен в рудных телах весьма неравномерно и приурочен к зонам альбитизации и грейзенизации. Руды

комплексные: касситерит ассоциирует с мусковитом, топазом, турмалином, флюоритом, кварцем, колумбитом, вольфрамитом и др. Месторождения этого типа отличаются низким средним содержанием Sn (не выше 0,1–0,2 %) и в целом их роль в добыче олова невелика. Пегматитовые месторождения олова известны в России (Забайкалье), в Центральной Африке, США (Сильвер-Хилл), Канаде (Берд-Ривер).

*Скарновые месторождения* олова выявлены в России в Забайкалье (Ярославское) и в Карелии (Кителя, Питкяранта), а также в Китае (Лаочан), Малайзии (Беатрис), Индонезии (Кампит, Клаппа), Мексике. Оруденение приурочено, как правило, к известковым скарнам. Рудные тела образуют круто- и пологозалегающие залежи на контакте гранитоидов и известняков, трубы на пересечении разрывов, их сопряжениях и искривлениях. Олово заключено в основном в касситерите, который находится в тесной парагенетической ассоциации с другими рудными минералами — магнетитом и различными сульфидами (арсенопирит, пирротин и др.).

Е. А. Радкевич среди касситерит-скарновых месторождений выделил магнетитовые и сульфидные. Первые характеризуются резким преобладанием среди рудных минералов магнетита. В касситерит-скарновых сульфидных месторождениях широко развиты пирротин, сфалерит, халькопирит, станнин, борнит, кубанит, а также разнообразны бораты, в том числе данбурит, датолит и др.

Наиболее характерным представителем этого типа является *месторождение Кителя*. Район месторождения сложен гранито-гнейсами, метаморфическими сланцами и мраморизованными известняками питкярантской свиты докембрия. Породы образуют куполовидную структуру, прорванную Самгинским интрузивом. Главная скарново-рудная залежь пластообразной формы имеет крутое падение и приурочена к нижнему горизонту карбонатных пород (мощность 10–50 м). В ней выделяются рудные столбы. Руды комплексные — олово-цинково-медные. Главные рудные минералы: магнетит, сфалерит, халькопирит и касситерит; нерудные — диопсид, геденбергит, андрадит-гроссуляр, актинолит, везувиан, кварц, кальцит и флюорит.

*Грейзеновые месторождения* олова широко распространены в России — на Чукотке (месторождение Экуг), в За-



кварц (60 %), слюды (30–35 %), топаз (5–7 %). Основными рудными минералами являются циннвальдит (литиевая слюда) и касситерит, второстепенными – висмутин, самородный висмут, арсенопирит, халькопирит и пирит. Центральная зона месторождения сложена богатыми рудами, а периферические участки менее богаты оловом и содержат относительно повышенное количество сульфидов.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения.* Этот генетический тип среди месторождений олова имеет достаточно широкое распространение. Они известны в России – на Чукотке (Валькумей), в Приморье (Хрустальное), Забайкалье (Хапчеранга, Шерлова Гора), Республике Саха (Эге-Хая, Депутатское), а также в Великобритании (Крофти, Долкоатс), Австралии (Маунт-Бишоф), Канаде (Маунт-Плезант) и других странах. Месторождения связаны в основном с малыми интрузиями гранитоидов повышенной основности, реже с плутонами нормальных гранитоидов. Рудные тела представлены жилами и штокверками. Главными рудными минералами являются касситерит и пирротин.

С. С. Смирнов среди плутоногенных гидротермальных месторождений выделил две рудные формации – *касситерит-силикатно-сульфидную* (Валькумей, Депутатское, Хрустальное, Хапчеранга, Крофти, Долкоатс, Маунт-Плезант) и *касситерит-сульфидную* (Дальнее, Смирновское в Приморье, Ренисон-Белл в Австралии, Менсон-Лод в Малайзии).

*Вулканогенные гидротермальные месторождения известны* в России на Малом Хингане (Хинганское, Джалинда), Боливии (Ллалагуа, Оуро, Потоси), Мексике (Дуранга, Эль-Сантин), Японии (Акенабе). Месторождения этого типа связаны с богатыми калием кислыми риолитами и умеренно-кислыми образованиями андезит-риолитовой формации (дациты и др.). Располагаются они среди вулканических образований и находятся в тесной ассоциации с субвулканическими, жерловыми, экструзивными, реже эффузивными фациями.

Рудные тела представлены ветвящимися жилами, реже штокверками. Мощность рудных жил изменяется от 0,1 до 2–3 м (чаще составляет около 1 м). Они прослеживаются по простиранию на десятки и сотни метров, а на глубину до 700–800 м. Руды оловянные, часто комплексные (Sn–

Ag; Sn—Pb—Zn). Минеральный состав их сложный. Главные рудные минералы: касситерит, станнин, висмутин, арсенопирит, пирротин; нерудные (жильные) — кварц, турмалин, серицит.

*Россыпные месторождения* имеют важное экономическое значение. Они широко распространены в Малайзии, Индонезии, Таиланде, Китае, а также в России — на Чукотке (Пырқыкай), в Приморье (Воскресенское), Республике Саха (Депутатское). Оловоносные россыпи возникают за счет разрушения коренных месторождений — касситерит-пегматитовых, кварц-касситеритовых, оловоносных грейзенов, оловоносных скарнов и др.

Наиболее крупные месторождения россыпного олова находятся на Малайском архипелаге (Малайзия, Индонезия). В Малайзии известно около 500 приисков и рудников (рис. 30). Наиболее важные из них Перак, Селангор, Сембилан, Негрри и др. Основные месторождения сосредоточены в долине р. Кинта. Здесь разрабатываются преимущественно аллювиальные россыпи. Плотик россыпных месторождений сложен известняками, кристаллическими сланцами, перекрытых мощным латеритным покровом. Касситерит вначале накапливался в результате разрушения оловоносных грейзенов и кварц-касситеритовых жил

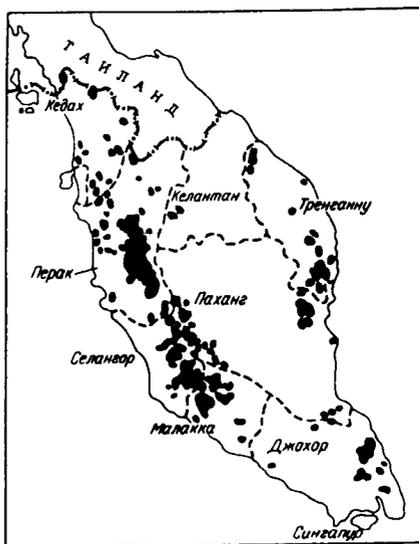


Рис. 30. Схема размещения месторождений олова в Малайзии (по Дж. Скривенору)

в элювии, а затем сносился в долину. В других районах Малайзии плотиком является гранит, причем местами оловоносные грейзенизированные граниты интенсивно выветрены и разрушены на большую глубину. В таких случаях отрабатывается и кора выветривания гранитов.

В Индонезии месторождения сосредоточены преимущественно на трех островах – Банка, Биллитон и Сингкип. Главным районом добычи касситерита являются россыпи о. Банка. Здесь в результате выветривания послетриасовых гранитов, содержащих оловоносные штокверки, образовались остаточные элювиальные россыпи. Часть этих россыпей была смыта в прилегающие долины и перекрыта аллювиальными песчаными наносами. Происшедшее в четвертичный период погружение местности привело к затоплению нижних участков речных долин, которые вместе с подстилающим плотиком погрузились на глубину до 30 м ниже современного уровня моря. Затопленные россыпи в настоящее время разрабатываются морскими драгами.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВИСМУТА

### Краткие исторические сведения

Первые сведения о висмуте появились в начале XVI в. в трудах минералога и металлурга Георга Бауэра (Агриколы). В 1739 г. немецкий химик Погг установил самостоятельность элемента висмута (раньше его считали разновидностью других элементов – свинца, олова или сурьмы). Окончательно как элемент он был открыт в 1799 г. шведским химиком Т. Бергманом.

Висмут – белый металл с розоватым оттенком. Он обладает диамагнитностью, плохой теплопроводностью, низкой температурой плавления ( $271,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), высокой температурой кипения ( $1560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и способностью расширяться в объеме при затвердевании. Висмут и его соединения обладают дезинфицирующими и антисептическими свойствами.

### Геохимия

Висмут является последним членом подгруппы мышьяка. Относится к халькофильным элементам. Ближайшие аналоги висмута – сурьма и свинец. Кларк его по А. П. Виноградову составляет  $9 \cdot 10^{-7}\%$ . Содержание висмута повышается от ультраосновных магматических пород ( $1 \cdot 10^{-7}\%$ ) к кислым ( $1 \cdot 10^{-6}\%$ ). Он представлен одним изотопом с массовым числом 209. Характеризуется переменной валентностью, в природных условиях преобладает  $\text{Bi}^{3+}$ . Высокое сродство к сере, способность существовать в свободном состоянии и склонность к образованию основных солей определяют важнейшие формы нахождения висмута в природе.

На магматическом этапе висмут не концентрируется. Его накопление связано с постмагматическими процессами гранитоидных магм. Из магматических очагов он выносит-

ся в хлоркомплексах ( $\text{BiCl}^{2+}$ ,  $\text{BiCl}^0$ ) и гидрооксокомплексах ( $\text{Bi}(\text{OH})_3^0$ ,  $\text{Bi}(\text{OH})_2^{-1}$ ). При экзогенных процессах первичные сульфидные висмута окисляются (образуются оксидные и карбонатные соединения). При слабом проявлении процессов окисления висмутин и самородный висмут могут образовать россыпи.

## Минералогия

Висмут в том или ином количестве в виде изоморфной примеси входит в состав некоторых сульфидов, а также образует самостоятельные минералы. Известно около 90 минералов висмута, но промышленное значение имеют немногие из них: самородный висмут, висмутин, виттихенит, тетрадимит, галеновисмутит, козалит, айкинит, бисмит, бисмутит.

*Самородный висмут* (содержание  $\text{Bi}$  99,9 %) кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы ромбоэдрические, псевдокубические, агрегаты зернистые, листоватые, перистые, дендриты. Цвет желтовато-белый, блеск металлический, твердость 2–2,5, плотность 9,8 г/см<sup>3</sup>.

*Висмутин*  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  ( $\text{Bi}$  81,3 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы призматические и игольчатые, цвет свинцово-серый, белый с желтоватой и синей побелостью, блеск металлический, твердость 2–2,5, плотность 6,8 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гидротермальных месторождениях жильного типа в ассоциации с топазом, бериллом, в золото-кварцевых жилах и медно-висмутовых месторождениях.

*Виттихенит*  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$  ( $\text{Bi}$  42,15 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы тетраэдрические, агрегаты зернистые, цвет темно-серый до светло-серого, черта черная, блеск металлический, твердость 2–3, плотность 6,3 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гидротермальных жилах богатых медью и висмутом.

*Тетрадимит*  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$  ( $\text{Bi}$  59,27 %) кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы ромбоэдрические, агрегаты листоватые и зернистые. Цвет стально-серый, блеск металлический, твердость 1,5–2, плотность 7,3 г/см<sup>3</sup>. Распространен в гидротермальных и контактово-метасоматических месторождениях.

*Галеновисмутит*  $\text{PbBi}_2\text{S}_4$  (Bi 55,48 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы игольчатые, столбчатые пластинчатые, агрегаты зернистые. Цвет минерала оловянно-белый до светло-серого, черта светло-серая, блестящая, твердость 2,5–3,5, плотность 7,1 г/см<sup>3</sup>. Встречается в высокотемпературных месторождениях висмута, скарнах и золото-кварцевых жилах.

*Козалит*  $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$  (Bi 42,10%) (по руднику Козала в Мексике) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы призматические, игольчатые, агрегаты шестоватые, лучистые, зернистые, цвет свинцово-серый, черта черная, твердость 2,5–3, плотность 6,7–7,0 г/см<sup>3</sup>.

*Айкинит*  $\text{CuPbBiS}_3$  (Bi 36,29 %) (по фамилии Айкин) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы длинностолбчатые до игольчатых, агрегаты зернистые и друзы. Цвет минерала серый с цветной побежалостью, черта серовато-черная, блестящая, твердость 2–2,5, плотность 7,1 г/см<sup>3</sup>.

*Бисмит*  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (Bi 89,6 %) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы псевдоромбические, агрегаты тонкозернистые и порошокватые, цвет серовато-зеленый, желтый, блеск полуалмазный, матовый, твердость 4,5, плотность 9,2 г/см<sup>3</sup>. Развита в зоне окисления.

## Применение в промышленности

Висмут входит в разнообразные сплавы со свинцом, оловом, кадмием и мышьяком. Их особенность состоит в том, что они плавятся при температурах, гораздо менее высоких, чем точка плавления отдельных входящих в их состав металлов. В связи с этим они применяются для автоматических огнетушителей, а также для электрических предохранителей, предохранительных пробок паровых котлов. Благодаря способности висмута расширяться при затвердевании он используется для изготовления линейных форм, для производства отливок изящных предметов и для гальваноластики.

В металлургии висмут применяется как добавка к нержавеющей стали. Он широко используется также в производстве оптических стекол и стекол с защитными свойствами против радиации, в химической промышленности (в качестве катализатора), в керамике (изготовление цвет-

ных эмалей и глазури), в электронике, ядерной технике, а также в фармацевтической промышленности.

## **Ресурсы и запасы**

Минерально-сырьевая база висмутодобывающей промышленности представлена как собственно висмутовыми, так и комплексными висмутсодержащими месторождениями.

Общие запасы висмута в мире (без учета стран СНГ) составляют около 130 тыс. т. Ведущими странами-держателями запасов висмута являются: Япония (более 40 тыс. т), США (30 тыс. т) и Австралия (20 тыс. т). Значительные запасы этого металла сосредоточены в Боливии, Мексике, Перу, Канаде, Китае, России и других странах.

Уникальные месторождения висмута встречаются редко (месторождение Теннант-Крик в Австралии). Богатые руды содержат  $\text{Bi}$  более 1 %, рядовые — 1–0,2 %, бедные — менее 0,2 % (в комплексных рудах).

## **Добыча и производство**

В мировой практике висмут в основном добывается в качестве попутного компонента из комплексных руд:  $\text{Co-Ni-Bi-Ag-U}$ ,  $\text{As-Bi}$ ,  $\text{Cu-Bi}$ , а также из висмутсодержащих свинцовых и медных руд. Общая добыча и производство висмута составляла: в 1937 г. — 600–700 т, в 1960 г. — 2600 т, в 1975 г. — 5380 т и в 2000 г. — более 10000 т. Главными производителями висмута в настоящее время являются Боливия, Перу, Мексика, Австралия и США.

## **Металлогения и эпохи минералообразования**

Эндогенные месторождения висмута формировались на средней и поздней стадиях геосинклинального этапа, а также в процессе тектономагматической активизации консолидированных участков складчатых областей и платформ. Собственно висмутовые месторождения не имеют широкого распространения и обычно этот металл образует комплексные руды с другими металлами в ряде рудных формаций.

Месторождения висмута и висмутсодержащих руд формировались в различные эпохи рудообразования. В *докембрийскую эпоху* образовались месторождения висмутсодержащих руд в Канаде (Большое Медвежье озеро, Эльдorado и др.), в *позднепалеозойскую (герцинскую)* — месторождения в Рудных горах (Яхимов в Чехии), Средней Азии (Адрасман в Таджикистане, Брич-Мулла и Устарасай в Узбекистане), в *мезозойскую эпоху* — месторождения в Южной Корее (Санг-Донг и др.). Значительное количество месторождений висмутсодержащих руд принадлежит *альпийской металлогенической эпохе* (Тасна в Боливии, Сан-Грегори в Перу).

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Известны следующие типы месторождений висмутовых и висмутсодержащих руд: 1) грейзеновые, 2) скарновые, 3) плутоногенные гидротермальные, 4) вулканогенные гидротермальные.

*Грейзеновые месторождения* представлены комплексными W—Sn—Bi рудами. Формирование их связано с аляскиновыми гранитами. Рудные тела имеют форму штокверков, труб и жил, приуроченных к трещинам скола. Наиболее характерным и хорошо изученным представителем этого типа является месторождение Альтенберг в Германии. В рудах месторождения помимо олова и вольфрама содержится висмут в виде висмутина и самородного висмута.

*Скарновые месторождения* пространственно связаны с гранат-пироксеновыми и другими известковистыми скарнами. Они формируются на контакте гранитоидов с карбонатными породами или на некотором удалении от этого контакта и реже в гранитоидах. Это, как правило, комплексные W—Mo—Bi месторождения. Главными рудными минералами являются шеелит, молибденит, висмутин, второстепенными — касситерит, магнетит, пирротин, пирит, арсенопирит, вольфрамит, халькопирит, сфалерит и галенит. Месторождения этого типа выявлены в России (Восток-II в Приморье, Тырныаузское на Северном Кавказе), Южной Корее (Санг-Донг), Канаде (Эмеральд-Фини) и других странах.

. *Плутоногенные гидротермальные месторождения* известны в Узбекистане (Брич-Мулла, Устарасай), Германии (Нейбулак, Шнееберг), Перу (Сан-Грегори), США (Монте-Кристо), Канаде (Эльдорадо). Оруденение связано с гранитоидными интрузиями. Рудные тела представлены в основном жилами и линзами. Среди месторождений этого типа выделяются две формации — *арсенопирит-висмутовая* и *пятиэлементная* (Co—Ni—Ag—Bi—U).

В качестве примера месторождений арсенопирит-висмутовой формации охарактеризуем *месторождение Устарасай*. Оно расположено в Узбекистане в пределах Брич-Муллинского рудного поля (Чаткальский хребет). Участок месторождения сложен кварцитами, песчаниками, известняками и доломитами верхнего девона. Интрузивные породы представлены штоком монзонитов, дайками сиенит-аплитов, а также гранодиоритами и дайками диабазов и диабазовых порфиров. Верхнедевонские отложения слагают юго-восточное крыло Коксуйской антиклинали, осложненной продольными разломами, надвигами и крутыми сбросами. Оруденение развито в известняках в виде секущих кварц-висмутовых жил, пластообразных рудных залежей и столбообразных мышьяк-висмутовых метасоматических тел.

Формирование месторождения протекало в течение трех стадий: мышьяковую, свинцово-висмутовую и свинцово-сурьмяную. Первая стадия проявлена слабо и представлена метасоматическими пластообразными телами, сложенными арсенопиритом (70—80 %) и кварцем (20—30 %). Вторая стадия характеризовалась образованием разнообразных рудных минералов — пирита, пирротина, висмутина, самородного висмута, висмутовых сульфосолей и жильных минералов (кварц, доломит, кальцит). Третья стадия минерализации развита незначительно в виде маломощных (до 2—7 см) крутопадающих жил. На этой стадии выделялись кварц и ассоциирующие с ним сфалерит, галенит, буланжерит, бурнонит, арсенопирит.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* висмута встречаются относительно редко. Они известны в Таджикистане (Адрасман), Швейцарии (Аннивере), Германии (Шварцвальд), Италии (Бочегиано), Боливии (Тасна). Генетически тесно связаны с вулканогенными комплексами дацит-риолитовой формации, а пространствен-

но — с субвулканическими дайками, жерловинами и неками и локализуются в вулканических структурах, синвулканических разломах и трещинах. Рудные тела представлены ветвящимися жилами, линзами, штокверками, реже трубами. Глубина формирования месторождения 0,5—1,0 км. Среди них выделяются *халькопирит-висмутовая* и *касситерит-вольфрамит-висмутовая* рудные формации.

Типичным представителем халькопирит-висмутовой рудной формации является *месторождение Адрасман*. Оно расположено в Восточном Кармазаре (Таджикистан). Участок сложен верхнепалеозойской эффузивной толщей. Собственно месторождение приурочено к некку кварцевых порфиров и контролируется пересечением разломов субширотного и субмеридионального направлений (рис. 31).

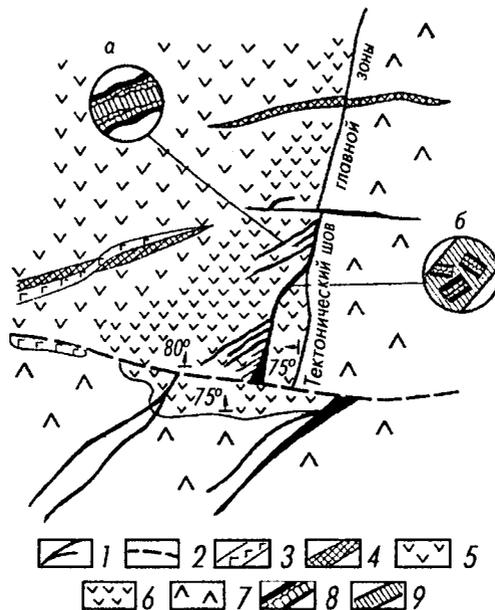


Рис. 31. Схема геологического строения медно-висмутового месторождения Адрасман (по Ф. Вольфсону и А. Дружинину): *a* — схема строения рудоносной жилы, приуроченной к оперяющей трещине отрыва; *b* — схема строения рудоносной жилы, приуроченной к тектоническому шву Главной зоны; 1 — рудоносные трещины; 2 — Свинцовый разлом; дайки: 3 — диабазового порфирита; 4 — кварцевого сиенит-порфира; туфолавы кварцевого порфира: 5 — покровные; 6 — образующие некк; 7 — верхнепалеозойские кварцевые порфиры; 8 — минералы 1-ой стадии; 9 — минералы 2-й стадии

Главное рудное тело имеет трубообразную форму и прослеживается на глубину более 200 м от земной поверхности. Другие рудные тела представлены линзами, штокверками и жилами.

Разрывные нарушения, определяющие положение Главной зоны и Свинцового разлома, являются наиболее древними. В последующее время движения по Свинцовому разлому возобновлялись. Они фиксируются приуроченностью к нему на отдельных участках даек кварцевого сиенит-порфира и диабазового порфирита, более молодых, чем туфолавы, слагающие некк. Дальнейшее развитие месторождения связано с проявлением гидротермальной деятельности. Наиболее ранние гидротермальные образования представлены кварц-сульфидно-висмутовыми метасоматическими телами и рудными жилами, сложенными кварцем, халькопиритом, висмутом и другими медно-висмутовыми минералами. Вторая стадия характеризовалась развитием кварцевых жил и метасоматических тел тонкозернистого халцедоновидного кварца с галенитом и халькопиритом.

Главная рудоносная зона представляет собой минерализованный тектонический разрыв, висячем боку которого развиты многочисленные рудоносные жилы северо-восточного простирания. Главные рудные минералы: пирит, гематит, арсенопирит, висмутин, самородный висмут, борнит, сфалерит.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУРЬМЫ

### Краткие исторические сведения

Сурьма принадлежит к металлам, известным человеку с глубокой древности. Более 5 тыс. лет тому назад в Вавилоне из сурьмы изготавливали сосуды. Уже в те времена мастера «золотых дел» очень боялись этого металла, так как даже незначительная примесь сурьмы в золоте обуславливала хрупкость изделий. Латинское название сурьмы «антимонимум» (дословно цветок: игольчатые кристаллы минерала антимонита напоминают цветок), другое латинское название ее — «стибиум» (связано с арабским «стиби»). Сначала это название было дано минералу, а уже позднее самому металлу. Русское название сурьмы происходит от турецкого «сюрме» и означает натирать, краситься (на Руси сурьма использовалась для чернения бровей).

Описание свойств и способа получения сурьмы было дано немецким алхимиком В. Валентином в 1604 г. Освоение месторождений сурьмяных руд в промышленных масштабах началось в XX веке.

Сурьма — твердый и хрупкий серебристо-белый с синеватым оттенком металл, который при обычной температуре на воздухе не окисляется, но при нагревании сгорает, образуя оксид в виде белого дыма.

### Геохимия

Кларк сурьмы  $5 \cdot 10^{-5} \%$ . Величина кларка мало изменяется для магматических пород, несколько увеличиваясь в производных базальтоидной магмы. В осадочных породах наиболее высокие концентрации Sb отличаются в сланцах ( $1,2 \cdot 10^{-4} \%$ ), бокситах и фосфоритах ( $2 \cdot 10^{-5} \%$ ). Сурьма представлена двумя стабильными изотопами с массовыми числами 121 и 123.

Сурьма, с одной стороны, в природных соединениях имеет свойства металла и является типичным халькофильным элементом, образуя антимонит, а с другой стороны, ей свойственны черты металлоида, проявляющиеся в образовании различных сульфосолей – буланжерита, бурнонита, джемсонита и др. В этих минералах четко проявляется изоморфизм сурьмы, мышьяка, висмута и др. Источник сурьмы, по мнению большинства исследователей, ювенильный – подкорковый. В гидротермальных растворах сурьма переносилась в комплексных соединениях в виде тиоокислот типа  $\text{Na}_3\text{SbS}_3$ ; возможен также перенос в галогенидах типа  $\text{SbCl}_3$ , обладающих высокой летучестью. Минералы сурьмы осаждались в интервале температур 400–50 °С. В экзогенных условиях первичные сульфидные минералы подвергаются окислению, возникающий при этом сульфат сурьмы очень неустойчив, быстро гидролизуеться и переходит в оксиды и гидроксиды – сурьмяные охры (сервантит, стибноконит, валентинит и др.).

## Минералогия

Известно 75 минералов, содержащих сурьму. В первичных рудах главнейшим минералом является антимонит, на долю которого приходится не менее 85 % производства сурьмы. Меньшее значение имеют: в первичных рудах ливингстонит, бертьерит, гудмундит, тетраэдрит, джемсонит, буланжерит, надорит; в оксидных рудах – валентинит, сенармонтит, сервантит, кермезит, стибноконит.

*Антимонит* (синоним: *стибнит, сурьмяной блеск*)  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  (содержание Sb 71,4 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов столбчатый, игольчатый, агрегаты зернистые, спутанно-волокнистые, веерообразные. Цвет минерала серый до черного с синей или радужной побелалостью, черта черная, твердость 2, плотность 4,66 г/см<sup>3</sup>. Распространен в низкотемпературных, гидротермальных сурьмяно-ртутных месторождениях, реже в свинцово-цинковых, в отложениях горячих источников и возгонах вулканов.

*Ливингстонит*  $\text{HgSb}_4\text{S}_8$  (Sb 51,6 %) (по фамилии Ливингстон) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы столбчатые или игольчатые, агрегаты волокни-

стые и лучистые. Цвет свинцово-серый, черта красная, блеск полуметаллический, твердость 2, плотность 4,8–5,0 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гидротермальных месторождениях в парагенезисе с киноварью, антимонитом, валентинитом, гипсом и серой.

*Бертьерит* FeSb<sub>2</sub>S<sub>4</sub> (Sb 57,0 %) (по фамилии Бертье) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы игольчатые или призматические, агрегаты зернистые, волокнистые, перистые. Цвет минерала темно-серый, часто с пестрой побежалостью, черта буро-серая, твердость 2–3, плотность 4,64 г/см<sup>3</sup>.

*Гудмундит* FeSbS (Sb 57,8 %) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы призматические, агрегаты зернистые, цвет серебристо-белый, блеск металлический.

*Валентинит* Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sb 83,5 %) (по фамилии Валентин) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы призматические, таблитчатые, агрегаты сплошные с пластинчатой, столбчатой или зернистой структурой, блеск алмазный, твердость 2,5–3, плотность 5,76 г/см<sup>3</sup>.

*Сенармонит* Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sb 83,5 %) (по фамилии Сенармон), кристаллизуется в кубической сингонии, габитус октаэдрический, агрегаты землистые и в виде корочек, бесцветный или сероватый, твердость 2–2,5, плотность 5,5 г/см<sup>3</sup>.

*Сервантит* Sb<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Sb 79,2 %) (по фамилии Сервантес) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы игольчатые, агрегаты порошковатые, плотные, цвет белый, желтый, твердость 4–5, плотность 5 г/см<sup>3</sup>.

## Применение в промышленности

Металлическая сурьма вследствие своей хрупкости применяется очень редко. Она используется в основном в качестве составной части сплавов. Сурьма придает прочность, твердость и коррозионную устойчивость сплавам со свинцом, медью, цинком. На производство 1 т баббитового сплава расходуется от 30 до 200 кг сурьмы. Она широко применяется для изготовления «британского металла» (олово, сурьма и медь), идущего для производства посуды и утвари. Наиболее емкими и традиционными потребителями сурьмы и ее сплавов являются автомобильная, поли-

графическая, химическая и стекльно-керамическая промышленность. Кроме того, сурьма применяется для воронения стали, в пиротехнике, медицине, для изготовления полупроводников.

Особенно ценятся в промышленности богатые антимонитовые руды ( $Sb_2S_3$ ), именуемые крудум. Они применяются непосредственно в ряде отраслей промышленности и для выплавки регулюса — металлической сурьмы. Сурьму получают из сурьмяных, ртутно-сурьмяных и золото-сурьмяных руд, попутно из полиметаллических, оловянных и вольфрамовых руд. Минимальное содержание Sb в рудах для рентабельной переработки должно быть не менее 1,5–2 %, а в комплексных рудах более 0,5 %.

## Ресурсы и запасы

Ресурсы сурьмы оценены в 33 странах. По данным ГНПП «Аэрогеология» Министерства природных ресурсов РФ они составляют 7,4 млн. т. Основная часть их сосредоточена в Китае (43 %), России (12 %), а также в Таджикистане, Таиланде, Боливии, ЮАР, Мексике и Киргизии (27 % суммарно). Общие мировые запасы сурьмы составляют 6,3 млн. т, а подтвержденные — 4,6 млн. т. Доминирующая роль принадлежит Китаю — 50 % общих и 49 % подтвержденных мировых запасов. Доля России в общих запасах — 7 % (2-е место в мире), в подтвержденных — 4 % (6-е место).

Высоким качеством руд отличаются жильные месторождения. Среди них по содержанию металла (более 20 % Sb) выделяются месторождения Сарылах и Сентачан в Республике Саха. Крупнейшее в мире месторождение Сингуаньшань, расположенное в провинции Хунань (Китай), представлено пластообразной рудной залежью.

Геологоразведочные работы на сурьму в 1995–2000 гг. проводились в ограниченных масштабах, что связано с падением с 1995 г. цен на этот металл. В Канаде компанией «Roycefield Resources» уточнены запасы месторождения Бивербрук (о. Ньюфаундленд). В России проводилась доразведка запасов сурьмы Олимпиадинского месторождения, ранее разведанного на золото.

По запасам металла месторождения сурьмы подразделяются на уникальные (более 100 тыс. т; Гравеллот в ЮАР,

Сингуаньшань в Китае), крупные — 100–30 тыс. т, средние — 30–10 тыс. т, и мелкие — менее 10 тыс. т.

## **Добыча и производство**

В 1995–2000 гг. добыча и производство сурьмы осуществлялась в 17 странах. Мировое производство сурьмы в концентратах составляло 125–160 тыс. т. Основная часть мирового производства сурьмы в концентратах сосредоточена в Китае (74 %), которому значительно уступают Россия (5,7 %), Боливия (5,4 %) и ЮАР (3,9 %).

В 1984 г. в Китае действовало около 20 рудников и примерно столько же металлургических предприятий, производящих сурьмяную продукцию. В середине 1980-х годов производство концентратов составляло 15–20 тыс. т. В 1985–1995 гг. в связи с реформами и либеризацией внешней торговли наблюдалось бурное развитие сурьмяной промышленности. Действовало около 600 мелких рудников, из них около 200 в провинции Хунань в окрестностях крупнейшего Сингуаньшаньского комбината.

В России производство сурьмы в концентратах в 1997 г. осуществлялось только в Республике Саха. Добытая руда частично обогащается гравитационно-флотационным методом на Сарылахской фабрике. Ежегодно на этой фабрике перерабатывается около 19 тыс. т руды, содержащей 15 % Sb.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Месторождения сурьмы формировались из низкотемпературных гидротермальных растворов, имевших парагенетическую связь с производными базальтоидной магмы. Все известные месторождения развиты, как правило, в складчатых областях и на активизированных платформах. Наиболее крупные из них связаны со складчатыми структурами и размещаются в зонах окварцованных брекчий, залегающих на контактах пород с различными физико-механическими свойствами. Рудоносные площади обычно разбиты крутопадающими разрывными нарушениями, которые являлись рудоподводящими каналами для поднимавшихся снизу растворов, содержащих сурьму. Превали-

рующее большинство месторождений расположено в трех глобальных рудных поясах: Тихоокеанском, Средиземноморском и Центральном-Азиатском.

*Докембрийская и раннепалеозойские эпохи* являлись неблагоприятными для образования сурьмяных месторождений.

В *позднепалеозойскую (герцинскую) эпоху* возникли относительно небольшие месторождения и рудопроявления в Киргизии, Казахстане, России (Западная Сибирь). В Канаде с герцинским магматизмом связан ряд небольших месторождений сурьмы в провинции Квебек.

Основная масса сурьмяных месторождений образовалась в мезозойскую и кайнозойскую эпохи рудообразования. В *мезозойскую эпоху* сформировались крупнейшие в мире сурьмяные месторождения Китая и ЮАР. В Китае они генетически связаны с магматизмом и тектоническими движениями яньшанской (предпозднемеловой) фазы складчатости. Основные месторождения расположены в южных и юго-западных районах страны. Среди них наиболее крупным является месторождение Сингуаньшань. В ЮАР крупные сурьмяные месторождения сосредоточены в горном хребте Мерчисон (северо-восточная часть провинции Трансвааль). Руды комплексные, кроме антимонита содержат киноварь и самородное золото. Наиболее крупным является месторождение Гравеллот (запасы сурьмы более 100 тыс. т). Месторождения этого возраста имеются в Канаде, России (Сарылах) и некоторых других странах.

В *кайнозойскую эпоху* образовалась большая часть известных в мире сурьмяных месторождений. Они часто пространственно ассоциируются с месторождениями ртути. В Италии наиболее крупным является месторождение Перетта, на Балканах — Костайник-Крупани. Многочисленные сурьмяные месторождения сосредоточены в альпийских складчатых областях Западного полушария. В США самый крупный источник получения сурьмы — золото-сурьмяные месторождения штата Айдахо (Йеллоу-Пайн и др.). В Мексике известно около 30 сурьмяных месторождений. В Боливии они сосредоточены преимущественно в департаментах Потоси и Оруро и приурочены к Боливийскому оловянному поясу. Руды комплексные, помимо антимонита содержат золото, блеклые руды, киноварь. В Турции наиболее крупным является месторождение Эздемир (содержание Sb в рудах достигает 10–14 %), в Северной Афри-

ке — Хаммимат, Хамман Н-Байль, Сенза, Тайа, Айн-Керна и др.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Промышленные месторождения сурьмы представлены: 1) стратиформными, 2) плутоногенными гидротермальными, 3) вулканогенными гидротермальными генетическими типами.

*Стратиформные месторождения* известны в Киргизии (Кадамжай), Китае (Сингуаньшань), Болгарии (Рыбново), Мексике (Сан-Хозе), Италии (Перетта). Они формировались в миогеосинклинальных зонах и на платформах. Рудные тела обычно пластообразные или линзовидные, залегают согласно со смятыми в складки вмещающими породами. Оруднение локализуется в брекчированных и окварцованных породах (роговиках) на контакте малопроницаемых сланцев в висячем боку и в известняках в лежащем. Вмещающие породы обычно пересечены крутопадающими разрывными нарушениями. Рудные залежи простираются от сотен метров до нескольких километров, прослеживаясь по падению до 1000 м при мощности от 1–3 до 40–50 м. В составе руд преобладают кварц и антимонит. В некоторых случаях из жильных минералов широко распространены флюорит, карбонаты, а из рудных — киноварь.

К рассматриваемому типу относится крупнейшее в мире *месторождение Сингуаньшань*. Оно расположено в южном Китае и приурочено к северной окраине Цзянси-Хунаньского прогиба (платформенного синклиория) в зоне сочленения его с выступом докембрийских пород. Месторождение сложено верхнедевонскими массивными известняками, которые через горизонт силифицированных сланцев (мощностью 20 м) перекрывается толщей слоистых доломитовых известняков нижнего карбона с пластами песчаников, прослоями гематитовых руд и углей. Мощность этой толщи около 400 м; она смята в пологие складки. Оруденение развито в кварцитовидных породах — джаспероидах, образовавшихся в процессе замещения известняков под горизонтом сланцев. В джаспероидах наблюдается сложная сеть кварц-антимонитовых и антимонитовых

жил и прожилков мощностью 10–15 см, иногда до 80 см. Состав руд простой: главный рудный минерал — антимонит, второстепенные — пирит, арсенопирит и киноварь. Жильные минералы — кварц, кальцит, барит, серицит и каолинит. Вторичные рудные минералы — валентинит и сервантит (на их долю приходится до 20 % добычи сурьмы).

*Месторождение Сан-Хозе* находится в Мексике в штате Сан-Луис-Потоси. Рудоносная площадь сложена четырьмя верхнеюрскими карбонатными формациями (снизу вверх): 1) Кализа-дел-Фондо; 2) Санта-Эмилия; 3) Сан-Хозе; 4) Корона. Мощность этих формаций колеблется от 60 до 250 м. Все формации смяты в асимметричные складки с осями, вытянутыми в субмеридиональном и северо-восточном направлении, разбиты разломами и зонами трещиноватости северо-западного простирания. Сурьмяное оруденение приурочено к верхней части формации Санта-Эмилия. Здесь выделяются четыре горизонта сурьмяных руд, расположенных по вертикали через 8–10 м друг от друга (рис. 32). Они получили название манто. Мощность их варьируется от 0,5 до 1,5 м. Основные запасы и наиболее богатые руды сосредоточены в самом верхнем горизонте. Наблюдается приуроченность обогащенных участков к местам пересечения манто шарнирными сбросо-сдвигами с

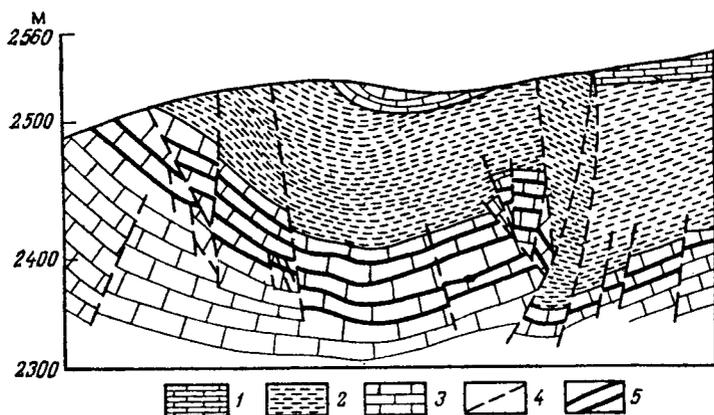


Рис. 32. Схематический разрез месторождения Сан-Хозе (по Уайту и Гонзалесу):

1 — слоистые известняки; 2 — черные известняковистые сланцы; 3 — массивные и грубослоистые известняки формации Санта-Эмилия; 4 — сбросы; 5 — пластообразные рудные залежи (манто)

амплитудами смещения от 3 до 7 м. Антимонитовые рудные залежи развиты на площади  $2 \times 1$  км, вытянутой в субмеридиональном направлении. На выходах рудных горизонтов на земную поверхность распространены окисленные руды, сложенные сервантитом, валентинитом, стибиконитом и содержащие небольшое количество кристаллов антимонита, сохранившихся от окисления.

При формировании месторождения роль экрана играли известковистые сланцы формации Сан-Хозе. Антимонит отлагался в основном в порах, кавернах и трещинах, а также развивался метасоматически по известнякам. Часть сурьмяных руд ассоциирует с халцедоном, восполняющим пустоты и развившимся метасоматически по известнякам. Местами наблюдается киноварь в виде тонких пленок в окисленных сурьмяных рудах.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* представлены двумя рудными формациями: 1) *кварц-антимонитовой* и 2) *комплексных руд*, содержащих Sb, As, Ag, Au, W, Cu, Pb и Zn.

*Месторождения кварц-антимонитовой формации* известны в России в Красноярском крае (Удережское, Раздольнинское) и в Республике Саха (Сарылах), ЮАР (Гравеллот), Турции (Эздемир), Таиланде (Ратбури), Австралии (Блю-Спек), Боливии (Чилкобия) и других странах. Они пространственно связаны с породами алюмосиликатного состава — песчаниками, глинистыми сланцами и гнейсами. Приурочены, как правило, к разломам, зонам дробления и брекчирования. Форма рудных тел жильная. Отдельные жилы прослеживаются в длину и на глубину до 300—500 м. Мощность их варьирует от 0,1 до 5—6 м (в раздувах до 20 м). Богатые руды содержат от 2—3 до 40 % Sb (в среднем 10 %), минеральный состав относительно простой: главный рудный минерал: антимонит; второстепенные — бертьерит, гудмундит, пирит и арсенопирит.

Типичным представителем этой рудной формации является *месторождение Сарылах* (рис. 33). Оно расположено в пределах Яно-Колымского пояса и приурочено к одной из ветвей крупного Ядыча-Тарынского разлома в месте его пересечения Верхнеиндигирским поперечным разломом. Рудовмещающая толща сложена крутопадающими верхнетриасовыми песчаниками и алевролитами. Изверженные породы представлены штоками кварцевых диорит-порфи-

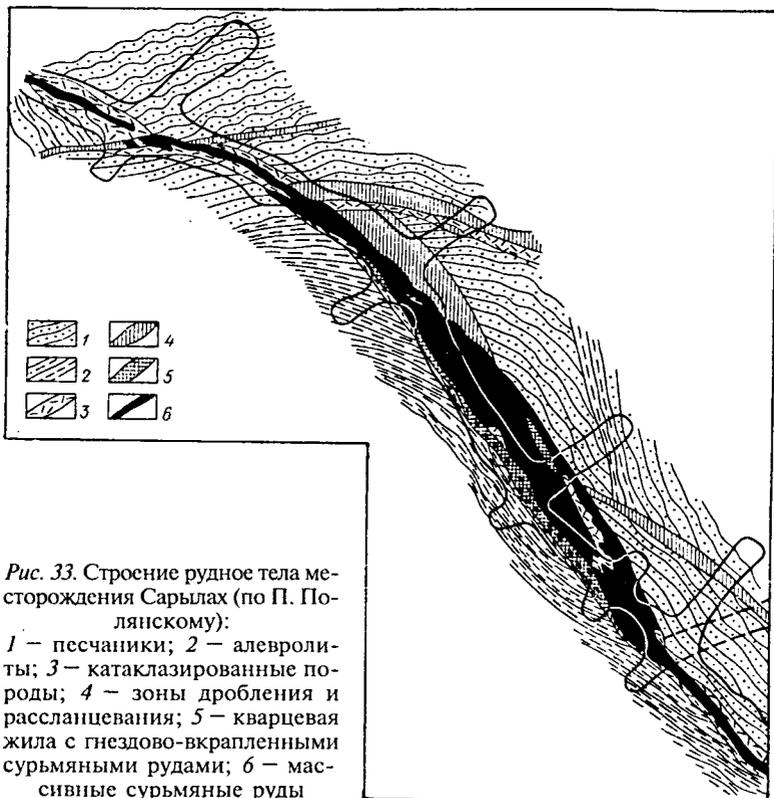


Рис. 33. Строение рудного тела месторождения Сарылах (по П. Полянскому):

1 — песчаники; 2 — алевролиты; 3 — катаклазированные породы; 4 — зоны дробления и рассланцевания; 5 — кварцевая жила с гнездово-вкрапленными сурьмяными рудами; 6 — массивные сурьмяные руды

ритов позднеюрского возраста. Рудное тело — это по существу одна крупная жила с серией более мелких жил в зоне рассланцевания и перемятых пород. Мощность ее местами достигает 3 м и более, протяженность по простиранию и падению составляет сотни метров. Текстуры руд в раздувах жилы асимметрично-полосчатые и друзовые, на участках пережима обычно брекчиевидные. Минеральный состав: кварц и антимонит; в небольших количествах присутствуют также пирит, арсенопирит, бертьерит, анкерит, серицит, графит, сфалерит, галенит, самородное золото и серебро.

Месторождения формации комплексных руд известны в Китае (Воси, Сиань), России (Барун-Шивеев в Забайкалье), США (Саншайн), в странах Среднеазиатского ре-

гиона (Сары-Булак и др.). Это, как правило, месторождения среднего и небольшого масштаба. Рудовмещающие породы представлены терригенными и карбонатными отложениями, реже гранитоидами. Месторождения контролируются складчатыми структурами, разломами и трещиноватыми зонами. Форма рудных тел преимущественно жильная, штокверковая, реже трубообразная и линзовидная. По простиранию они прослеживаются на десятки — первые сотни метров, по падению до 200—300 м при мощности 0,1—3,0 м.

Минеральный состав руд достаточно сложный: главный рудный минерал — антимонит; второстепенные — гудмундит, бертьерит, пирит, арсенопирит, шеелит, ферберит, халькопирит, галенит, сфалерит, самородная сурьма, буланжерит, джемсонит.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* распространены в Турции (Текгер, Дер), Румынии (Бая-Маре, Бая-Сприе), Алжире (Хаммимат), США (Йеллоу-Пайн). Они сосредоточены в областях молодого и современного вулканизма. Обычно приурочены к породам жерловой и субвулканической фаций, иногда известны среди карбонатно-глинистых отложений. Рудовмещающие структуры — некки, кольцевые и радиальные трещины, зоны дробления. Рудные тела представлены жилами, трубами, штокверками. Размеры их небольшие — от 20—30 до 200—250 м при мощности 0,1—10 м. Руды сурьмяные и комплексные — мышьяково-сурьмяные, сурьмяно-серебряные и сурьмяно-оловянные. Главный рудный минерал — антимонит, реже встречаются надорит, сервантит, ливингстонит, блеклые руды, галенит и сфалерит.

*Месторождения Бая-Сприе* (рис. 34) находится в Румынии и контролируется субширотной андезитовой дайкой, погружающейся к востоку и относящейся к западной части структуры Бая-Сприе. Рудоотложение происходило в двух параллельных системах трещин на южном и северном контактах андезитового тела. Здесь установлены два типа руд: медно-пиритовые и золото-полиметаллические. Сурьма присутствует в золото-полиметаллических рудах, состав которых довольно сложный (пирит, сфалерит, антимонит, сульфосоли, золото, серебро, андорит и др.)

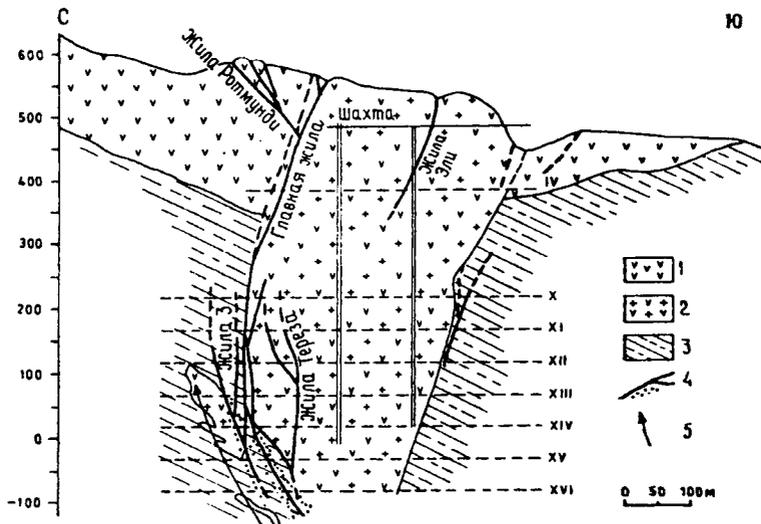


Рис. 34. Геологический разрез через месторождение Бая-Сприе (по М. Боркошу и др.):  
 1 — андезитовые лавы; 2 — дайки; 3 — осадочные пород паннона; 4 — рудные жилы, сопровождающиеся зонами вкрапленного оруденения; 5 — скважины алмазного бурения

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ РТУТИ

### Краткие исторические сведения

Ртуть известна с древнейших времен: она упоминалась Аристотелем и Теофрастом в 315 г. до н. э.; на древней рельефной карте Китая (210 г. до н. э.) океан и реки были залиты ртутью. Греческий врач Диоскорид более 2000 лет тому назад дал этому металлу латинское название «гидраргиум» («серебряная вода»). В СНГ следы разработки ртутных руд выявлены на руднике Хайдаркан (Великий рудник), расположенном в Ферганской долине в Киргизии. Археологические раскопки показали, что ртуть добывали в течение многих столетий до XIII в. (вплоть до нашествия Чингизхана). Здесь сохранились древние горные выработки, инструменты, реторты для обжига киновари и даже найдены специальные бутылки, наполненные ртутью.

Ртуть в обычных условиях — это серебристо-белый блестящий жидкий металл. При температуре около  $-38,86\text{ }^{\circ}\text{C}$  она твердеет, а при температуре  $+353,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  кипит. В твердом состоянии она впервые была получена в 1759 г.

### Геохимия

Кларк ртути  $8,3 \cdot 10^{-6}\text{ }%$ . В природе она находится в рассеянном состоянии и только  $0,02\text{ }%$  ее сосредоточено в месторождениях. В магматических породах различного состава содержание ртути близко к кларковому, увеличиваясь в щелочных породах до  $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}\text{ }%$ . Среди осадочных пород максимальные концентрации ртути установлены в глинистых сланцах (до  $2 \cdot 10^{-5}\text{ }%$ ). В водах Мирового океана содержание ртути составляет  $1 \cdot 10^{-6}\text{ г/л}$ . Известно семь стабильных изотопов ртути с массовыми числами 196, 198–202 и 204, среди которых преобладает  $^{202}\text{Hg}$ . Важной геохимической особенностью ртути являет-

ся то, что в ряду других халькофильных элементов она характеризуется самым высоким потенциалом ионизации. Это определяет такие свойства ртути, как способность восстанавливаться до атомарной формы (самородной ртути), значительную химическую стойкость к кислороду и кислотам.

По мнению многих геологов, источник ртути ювенильный — подкорковый. Из мантии гидротермальные растворы, содержащие Hg, Sb и As, поступали по глубинным разломам. Перенос ртути в них осуществлялся в виде сульфидных комплексов ( $\text{HgS}_2^{2-}$ ), устойчивых в щелочных растворах при низком окислительном потенциале Eh. В действующих вулканах и термальных источниках ртуть может мигрировать в газовом состоянии и в газовой фазе гидротерм.

В зоне гипергенеза киноварь и металлическая ртуть растворимы в воде даже при отсутствии сильных окислителей. Особенно хорошо растворяется ртуть в сульфидах едких щелочей с образованием, например, комплекса  $\text{HgS} \cdot n\text{Na}_2\text{S}$ . Она легко сорбируется глинами, гидроксидами железа и марганца, глинистыми сланцами и углями.

## Минералогия

Известно 25 минералов, содержащих ртуть, но промышленное значение имеют киноварь, метациннабарит, самородная ртуть, блеклая руда (шватцит), кордероит, ливингстонит и каломель.

*Киноварь* HgS (содержание Hg 86,2 %) кристаллизуется в тригональной сингонии, габитус кристаллов ромбоэдрический, агрегаты зернистые, вкрапленные, порошкообразные. Цвет минерала ярко- и коричневатокрасный, блеск алмазный, матовый, твердость 2–2,5, плотность 8 г/см<sup>3</sup>. Встречается в ртутных, ртутно-сурьмяных месторождениях, реже в золотоносных кварцевых жилах.

*Метациннабарит* HgS (Hg 86,2 %) кристаллизуется в кубической сингонии.

*Ртуть самородная* Hg. Часто содержит примеси Ag, Au. Образует агрегаты в виде мелких капель, цвет серебристо-белый, блеск металлический, плотность при температуре 0 °C 13,59 г/см<sup>3</sup>.

*Каломель*  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  (Hg 85 %) кристаллизуется в тетрагональной сингонии, габитус кристаллов таблитчатый. Цвет минерала бесцветный, белый до коричневого, твердость 1,5, плотность 7,27 г/см<sup>3</sup>.

## **Применение в промышленности**

Применение ртути основано на ее специфических свойствах: при обыкновенной температуре она летуча; интенсивно расширяется при нагревании; способна растворять другие металлы, образуя амальгамы с Au, Ag, Pb, Zn, Al, Bi, а также излучать в парообразном состоянии ультрафиолетовые лучи.

В электро- и радиотехнической промышленности ртуть используется при изготовлении выпрямителей, ртутных прерывателей, осцилляторов, ртутно-кварцевых ламп, ламп дневного освещения и т. д. В медицине ртуть, ее оксиды и хлористые соли, являются составными частями различных мазей, зубоврачебных амальгам и т. д. В химической промышленности ртуть применяется в производстве хлора и каустической соды, при получении уксусной кислоты из ацетиленна, в качестве катализатора при производстве пластмасс. В энергетике она используется в ртутно-паровых котлах и турбинах, в ядерных реакторах (как поглотитель тепла), в золотодобывающей промышленности — для улавливания золота. В небольших количествах она применяется в судостроении в виде специальных красок, в военной промышленности и горном деле, в сельском хозяйстве для протравки семян и т. д.

## **Ресурсы и запасы**

Ресурсы ртути известны в 40 странах, в 32 из них оценены количественно и составляют 715 тыс. т. Более половины мировых ресурсов ртути сосредоточено в Европе, в том числе 29 % — в Испании и 10 % — в Италии.

По данным ГНПП «Аэрогеология» *Министерства природных ресурсов РФ* общие запасы ртути учтены в 18 странах и составляли в 1997 г. 324 тыс. т, из которых 26 % было сосредоточено в Испании, 13,5 % — в Киргизии и 13 % — в России.

Ртуть добывают из ртутных, ртутно-сурьмяных, ртутно-мышьяковых и ртутно-золотых, а также попутно из полиметаллических, вольфрамовых и оловянных руд. Богатые руды содержат ртути более 1 %, рядовые 1–0,2 % и бедные менее 0,2 %. В настоящее время качественное состояние минерально-сырьевой базы мировой ртутной промышленности неудовлетворительное. В первую очередь это касается качества руд, которые лишь в Испании и Алжире содержат в среднем более 1,5 % Hg. Во всех остальных странах этот показатель не превышает 0,55 %. Подобное качество руд при сложившемся уровне цен не обеспечивает их рентабельную отработку, что послужило главной причиной закрытия многих рудников в 1990-х годах в России, Словении, Турции, Словакии и других странах.

По запасам металла выделяются месторождения уникальные – более 100 тыс. т, очень крупные 100–25 тыс. т, крупные 25–10 тыс. т, средние 10–3 тыс. т и мелкие менее 3 тыс. т.

## Добыча и производство

Добыча руды и производство первичной ртути в 1995–2000 гг. осуществлялось в 10 странах. Производство первичной ртути составляло 2,5–3,5 тыс. т. Основная часть мирового производства ртути была сосредоточена в четырех странах: в Испании – 27 %, Китае – 19 %, Киргизии – 15 % и Алжире – 15%. Эти страны располагают самыми большими мощностями по производству первичного металла, за счет которых его уровень при необходимости может быть удвоен.

В Испании государственная компания «*Minas de Almaden y Arrayanes S. A.*» (MAYASA) сознательно ограничивает выпуск ртути для поддержания на мировых рынках приемлемого уровня цен. Сведения о производстве ртути в Китае, крайне ограничены. Производственные мощности в стране оцениваются в 1,2–1,4 тыс. т ртути в год. В Киргизии разрабатывается несколько участков Хайдарканского месторождения, а также менее крупное Чонкойское месторождение. За свою более чем полувековую историю Хайдарканский горно-металлургический комбинат выпустил более 30 тыс. т ртути. В 1995 г. этот комбинат был преобра-

зован в государственную акционерную компанию «*Khaidarkan Mercury State Joint Stock Co.*» В России в 1970—1980 гг. Действовало четыре — пять небольших рудников на Северном Кавказе, Алтае и Чукотке. В настоящее время все они закрыты.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Месторождения ртути являются постмагматическими низкотемпературными гидротермальными образованиями, имеющими отдаленную парагенетическую связь с производными глубинных подкоровых очагов базальтоидного магматизма.

Среди главнейших ртутоносных провинций наиболее продуктивной является Средиземноморская, в которую входят известные месторождения Испании, Италии, Словении, Алжира и других странах. Ртутные месторождения появляются в позднеорогенные стадии развития регионов и в периоды тектономагматической активизации разновозрастных консолидированных геотектонических сооружений. Они локализуются вдоль региональных зон разломов, прослеживающихся в периферических частях платформ и древних срединных массивов (Колымский, Зeya-Буреинский и др.), а также в краевых частях прилегающих складчатых зон. Для краевых частей платформ характерно развитие пологих согласных рудных залежей в толщах карбонатных пород, а для оруденевшей части складчатых зон более типичны секущие тела и седловинные залежи в ядрах антиклинальных складок, сложенных песчаниками и сланцами.

В *докембрийскую* и *раннепалеозойскую (каледонскую)* эпохи промышленные месторождения ртути не образовывались. К *позднепалеозойской (герцинской)* эпохе относятся ртутные месторождения Киргизии и Горного Алтая. Спорным до настоящего времени остается вопрос о возрасте ртутного оруденения Никитовского месторождения на Украине. Одни исследователи считают его позднепалеозойским, другие — мезозойским. Достоверно установлена лишь нижняя возрастная граница оруденения, поскольку оно приурочено к песчаникам среднего карбона, залегающим в осевой части Донецкой антиклинали. В США в позднем

палеозое сформировался ряд относительно небольших месторождений ртути в штате Арканзас. Все они расположены вдоль южной границы рудной провинции долины Миссисипи.

В *мезозойскую эпоху* образовались значительные по масштабам месторождения ртути в различных регионах мира. В Китае большинство месторождений ртути приурочено к протяженному поясу, расположенному на границе провинций Хунань и Гуйчжоу. Ртутная и сурьмяная минерализация находится вне видимой связи с яньшаньскими гранитами и контролируется крупными разломными зонами. Месторождения ртути в отличие от сурьмяных имеют более скромные размеры. Кроме киновари, руды содержат самородную ртуть, антимонит, реже метациннабарит, реальгар, аурипигмент, пирит, галенит. Мезозойский возраст, по-видимому, имеют многочисленные месторождения и рудопроявления ртути в Канаде, сосредоточенные в северо-западной части Британской Колумбии. Ртутная минерализация генетически связана с крупными гранодиоритовыми батолитами Берегового хребта тихоокеанского побережья, внедрившимися в послелюрское или раннемеловое время. Месторождения приурочены к крупному сбросу, прослеженному по простиранию на 200–250 км, который сопровождается брекчированной зоной шириной до 1,5 км. В США ряд сравнительно небольших месторождений ртути, приуроченных к триасовым и юрским породам, известен в районах Гумбольдт и Першинг (штат Невада).

В России месторождения ртутных руд выявлены на Чукотке, в Западном Верхоянье, в восточных районах Республики Саха. На Чукотке разведано Западно-Палянское месторождение. Ртутное штокообразное оруденение локализуется в зонах пересечений двух систем нарушений и представлено тремя залежами. В Западном Верхоянье имеется ряд месторождений, среди которых наиболее изученными является Звездочка.

В *кайнозойскую эпоху* сформировалась большая часть известных в мире месторождений ртути. Среди них встречаются и месторождения четвертичного возраста (Монте-Амиата в Италии; Сульфур-Бенк в США; термальные источники Камчатки и др.). На Балканах с третичным вулканизмом связано месторождение Идрия, которое разрабатывается

более 450 лет. В США выявлено около 500 относительно небольших месторождений ртути, сосредоточенных в пределах Тихоокеанского рудного пояса. Оруденение контролируется тектоническими нарушениями. Наиболее крупные среди них — Нью-Альмаден и Нью-Идрия. Руды отличаются высоким содержанием киновари, иногда достигающим 10 %. Месторождения ртути имеются в Мексике, Перу, Боливии. В Северной Африке многочисленные месторождения приурочены к протяженному разлому вдоль склона Нумидийского хребта (Рас-эль-Ма, Мра-Сма и др.).

### **Генетические типы промышленных месторождений**

Среди промышленных месторождений ртути выделяют: 1) стратиформные, 2) плутоногенные гидротермальные, 3) вулканогенные гидротермальные.

*Стратиформные месторождения.* Они известны в Киргизии (Хайдаркан), Республике Саха (Левосакунджин), Испании (Альмаден), Перу (Хуанкавелика), Китае (Ваньшань), на Украине (Никитовское). Распространены в основном в областях стабилизации геосинклиналей или в зонах активизации платформ. Эти месторождения приурочены к терригенным или карбонатным комплексам пород, собранных в складки, которые осложнены разрывными нарушениями. Рудные тела представлены согласными пластообразными залежами и линзами среди пористых песчаников или брекчиевидных окварцованных известняков. Содержание ртути варьирует от 0,5–1 до 10–15 %. Главный рудный минерал — киноварь, второстепенные — метациннабарит, антимонит, реальгар, аурипигмент, марказит, пирит, ливингстонит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит. Процесс минералообразования длительный и протекал в течение трех — пяти стадий.

Наиболее характерным представителем этого типа является *месторождение Альмаден* (рис. 35). Оно находится в Испании в горах Сьерра-Морена, в 200 км к юго-западу от г. Мадрида. Рудоносная площадь сложена песчано-сланцевыми отложениями, известняками и вулканическими туфами силура и девона, смятыми в серию антиклинальных и синклинальных складок. Они разбиты разломами,

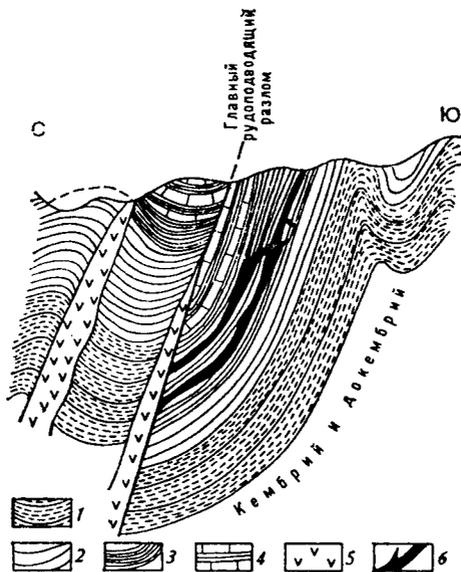


Рис. 35. Геологический разрез месторождения Альмаден (по В. Смирнову): 1–3 – отложения нижнего силура: 1 – песчаники, 2 – глинистые сланцы, 3 – углистые сланцы; 4 – пиритизированные графитовые сланцы с прослоями известняков верхнего силура; 5 – дайки диабазового порфирита; 6 – рудоносные кварциты

по отдельным из которых внедрились дайки диабазов. Ртутное оруденение приурочено к трем крутопадающим пластам кварцитов, заключенных в глинистых сланцах. Мощность терригенной пачки с рудоносными кварцитами составляет 70 м, длина рудных тел по простиранию 250–300 м при мощности 2–14 м (в среднем 10 м). По вертикали оруденение прослежено до глубины 400 м. Главный рудный минерал – киноварь, второстепенные – самородная ртуть, пирит, халькопирит, метациннабарит и др. Содержание ртути в рудах высокое (6–15 %). Месторождение эксплуатируется более 2000 лет. В настоящее время руды разрабатываются на глубине более 300 м. Мощность предприятия Альмаден, в которое входят несколько рудников и металлургический завод составляет 3,45–3,5 тыс. т ртути в год. Общее количество ртути, выпущенной на Альмаден за весь период эксплуатации месторождения, оценивается в 260 тыс. т.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* известны в России (Барун-Шивея и Ильдикан в Забайкалье), Ирландии (Гортдрам), Турции (Гюмюслер), Китае (Воси), Тунисе (Джабель-Аджа), США (Нью-Альмаден, Нью-Идрия). Залегают они среди терригенных, карбонатных, магматических (гранитоиды, гипербазиты) и метаморфических пород. Пространственно связаны с региональными разломами и трещиноватыми зонами. Рудные тела обладают жильной, линзовидной, трубообразной, штокверковой и гнездообразной формой.

Плутоногенные гидротермальные месторождения представлены двумя рудными формациями: 1) *кварц-хлорит-серпичит-киноварной* (Гюмюслер, Барун-Шивея) и 2) *магнетизально-карбонатно-киноварной* (Нью-Альмаден и Нью-Идрия в США, Чоган-Узун в Горном Алтае).

*Месторождение Нью-Альмаден* расположено в горах Берегового хребта в 80 км к северо-востоку от г. Сан-Франциско. Оно приурочено к контакту серпентинизированных перидотитов с интенсивно дислоцированными юрскими песчаниками, содержащими линзы известняков и сланцев (рис. 36). Оруденение приурочено к апикальным частям раздробленных серпентинитовых массивов, претерпевших гидротермальное метасоматическое изменение, в результате которого серпентиниты превращены в силикатно-карбонатную породу. Рудные тела развиты вдоль разрывов, зон трещиноватости и участков дробления. Они бессистемно распределены по апикальной части изменен-

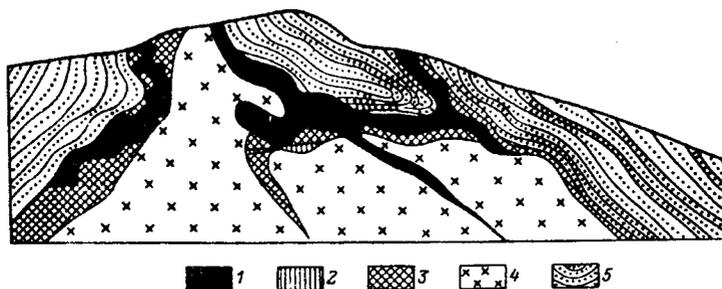


Рис. 36. Схематический разрез месторождения Нью-Альмаден (по С. Тютту):

1 — ртутная руда; 2 — глина трения; 3 — брекчия; 4 — серпентиниты; 5 — песчаники и сланцы

ных серпентинизированных массивов. Размеры рудных тел колеблются от мелких гнезд до сравнительно крупных залежей, вытянутых до 300 м и имеющих ширину 50–70 м при мощности 5 м. Минеральный состав руд относительно простой. Промышленное значение имеет только киноварь. Кроме того, в небольшом количестве встречаются пирит, халькопирит, антимонит, сфалерит, галенит и борнит. Жильные минералы представлены кварцем и доломитом с выделениями битумов шарообразной формы. Среднее содержание ртути в руде составляет около 1 %.

Месторождение разрабатывалось с 1824 г. По количеству добытого металла (с 1845 г. по 1926 г. — 34,5 тыс. т) она уступает только месторождениям Альмаден, Идрия и Хуанкавелика. В связи с истощением запасов эксплуатация его была прекращена. Глубина отработки месторождения достигла 820 м, где руды оказались бедными.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* распространены в областях современного или молодого вулканизма и в районах развития термальных источников. Они известны в России на Чукотке (Пламенное), Камчатке (Апапель, Чемпура, Белое, Алнейское), Италии (Монте-Амиата), Алжире (Ислаим), Турции (Казызмах), Японии (Итокума), США (Опалит, Мак-Дермит, Сульфур-Бенк, Кордеро) и в других странах. Месторождения тесно связаны с андезитовыми, трахириолитовыми и риолитовыми формациями и обычно приурочены к лавам, туфам, туффитам, экструзивным, субвулканическим и жерловым фациям, реже к терригенно-карбонатным породам. Они часто контролируются вулканогенными структурами — кальдерами, вулканотектоническими депрессиями, вулканическими куполами, некками, синвулканическими кольцевыми разломами, сбросами, надвигами и зонами трещиноватости. Состав руд относительно сложный. Кроме киновари присутствуют метациннабарит, самородная ртуть, каломель, кордероит, реальгар, аурипигмент, антимонит, пирит, марказит, аргентит, пираргирит, сфалерит, халькопирит, самородное золото и серебро. Из нерудных минералов развиты опал, сера, каолинит, алунит, гипс, барит, реже цеолиты, карбонаты, галлуазит.

*Месторождение Монте-Амиата.* Это одно из наиболее крупных месторождений, принадлежащих к рассматриваемому генетическому типу. Находится в Италии в провин-

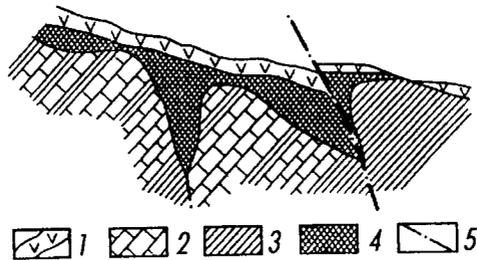


Рис. 37. Схематический геологический разрез месторождения Монте-Амиата (по В. Смирнову и др.):  
 1 — четвертичный покров трахитов; 2—3 — отложения мела: 2 — известняки, 3 — сланцы; 4 — рудное тело (оруденелые брекчии); 5 — разломы

ции Тоскана. Участок месторождения сложен верхнемеловыми известняками и сланцами, которые перекрыты трахитами четвертичного вулкана Монте-Амиата (рис. 37). Оно приурочено к сбросо-сдвигу северо-восточного простирания. Рудоносная зона сложена тектонической брекчией, находящейся на контакте осадочных пород и четвертичного потока трахитов. Залежь брекчий прослежена в длину на 30 км при ширине 10 км. Она имеет плащеобразную форму и состоит из минерализованных блоков раздробленных сланцев и известняков, цементированных глинистым материалом. В рудоносной зоне выделяются рудные тела в виде линз (мощностью до 5—10 м), гнезд и трубообразных тел, прослеживающихся на глубину до 100—150 м. Содержание ртути в верхних горизонтах составляет 3—4 %, в нижних — 1,5—2,0 %. Главный рудный минерал — киноварь, второстепенные — реальгар, аурипигмент, самородная сера и флюорит. За время эксплуатации на месторождении извлечено более 100 тыс. т ртути.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

### Краткие исторические сведения

Около 1900 лет назад Плиний Старший впервые назвал квасцы, применявшиеся для протравки при окраске тканей «алумен». Спустя 1500 лет швейцарский натуралист Парацельс установил, что в состав квасцов входит оксид алюминия. Впервые чистый алюминий был извлечен из боксита датским ученым Г. Эрстедом в 1825 г. В 1865 г. русский химик Н. Бекетов получил алюминий путем вытеснения его магнием из расплавленного криолита ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Этот способ нашел промышленное применение в Германии и Франции в конце XIX в. В середине XIX в. алюминий причислялся к редким и даже драгоценным металлам. В настоящее время по объему мирового производства алюминий уступает только железу.

### Геохимия

Алюминий относится к числу элементов, наиболее распространенных в земной коре. Его кларк равен 8,05 %. В природных условиях он представлен только одним изотопом  $^{27}\text{Al}$ .

В эндогенных условиях алюминий концентрируется преимущественно в щелочных нефелин- и лейцитсодержащих породах, а также в некоторых разновидностях основных пород (анортозитах и др.). Значительные массы алюминия накапливаются в связи с процессами алунитизации, связанными с гидротермальной переработкой кислых вулкано-генных образований. Наибольшие скопления алюминия наблюдаются в остаточных и переотложенных корах выветривания кислых, щелочных и основных пород.

В осадочном процессе глинозем растворяется и переносится только в кислых ( $\text{pH} < 4$ ) или сильно щелочных ( $\text{pH} > 9,5$ ) растворах. Осаждение гидроксидов алюминия

начинается при  $\text{pH} = 4,1$ . В присутствии  $\text{SiO}_2$  растворимость  $\text{Al}_2\text{O}_3$  возрастает, а при наличии  $\text{CO}_2$  снижается. Коллоидный  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по сравнению с коллоидным  $\text{SiO}_2$  менее устойчив и быстрее коагулирует. Поэтому в процессе их совместной миграции происходит разделение этих элементов. В связи с различной геохимической подвижностью соединений алюминия, железа и марганца происходит их дифференциация в прибрежной зоне седиментационных бассейнов. Ближе к берегу накапливаются бокситы, в верхней части шельфа — железные руды, а внизу шельфа — марганцевые руды. Гидроксиды алюминия обладают значительной адсорбционной способностью. В минералах, слагающих бокситы, постоянно в переменных количествах присутствуют Fe, V, Cr, Zn, Mn, Cu, Sn, Ti, B, Mg, Zr, P и др.

## Минералогия

Алюминий входит в состав около 250 минералов. Однако промышленное значение имеют лишь некоторые из них: диаспор и бёмит, гиббсит (гидраргиллит), нефелин, лейцит, алунит, андалузит, кианит, силлиманит и др.

*Диаспор*  $\text{HAlO}_2$  (содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  85 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов пластинчатый, таблитчатый, игольчатый, агрегаты листоватые, скрытокристаллические, сталактитообразные. Цвет минерала белый, сероватый, с примесью Mn или Fe — серый, розовый, коричневый, блеск стеклянный до алмазного, твердость 6,5–7, плотность 3,36 г/см<sup>3</sup>.

*Бёмит*  $\text{AlOОН}$  — полиморфная модификация диаспора (по фамилии Бём), кристаллы пластинчатые, агрегаты скрытокристаллические, бобообразные, цвет белый, твердость 3,5–4, плотность ~3 г/см<sup>3</sup>. Образуется при гидротермальном изменении нефелина.

*Гиббсит (гидраргиллит)*  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  64,7 %) кристаллизуется в моноклиальной, реже в триклинной сингонии, кристаллы псевдогексагональные, пластинчатые и столбчатые, агрегаты фарфоровидные, землистые, натечные, червеобразные, сфероидальные конкреции, твердость 2,5–3, плотность 2,4 г/см<sup>3</sup>.

*Нефелин*  $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  34 %) кристаллизуется в гексагональной сингонии, кристаллы призматические, ко-

роткостолбчатые, толстотаблитчатые, бесцветный, серый, мясо-красный, блеск от стеклянного до жирного, твердость 5,5–6, плотность 2,6 г/см<sup>3</sup>.

*Лейцит*  $K[AlSi_2O_6]$  ( $Al_2O_3$  23,5 %) – каркасный силикат, изоструктурный с анальцимом; кристаллы – тетрагонтриоктаэдры, додекаэдры. Цвет минерала белый, серый, твердость 5,5–6, плотность 2,5 г/см<sup>3</sup>.

*Алунит*  $KAl_3(OH)_6[SiO_4]_2$  ( $Al_2O_3$  37 %) кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы таблитчатые, ромбоэдрические или чечевицеобразные, агрегаты плотные и зернистые. Цвет минерала белый, сероватый, желтоватый, бурый, блеск стеклянный до перламутрового, твердость 3,5–4, плотность 2,9 г/см<sup>3</sup>. Встречается в коре выветривания, где обильна  $H_2SO_4$ .

*Андалузит*  $Al_2[SiO_4]O$  (по провинции Андалузия, Испания) – одна из трех полиморфных модификаций силиката алюминия (андалузит, кианит и силлиманит), образующаяся при наименьших давлении и температуре. Алюминий незначительно замещается Fe и Mn. Кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы столбчатые, волокнистые, агрегаты зернистые и лучисто-шестоватые, цвет розовый, блеск стеклянный, твердость 6,5–7, плотность 3,1 г/см<sup>3</sup>.

Важнейшими рудами алюминия являются бокситы – горная порода, состоящая из гидроксидов алюминия, оксидов и гидроксидов железа и марганца, кварца, опала, алюмосиликатов и др. По минеральному составу различают бокситы диаспоровые, бёмитовые, гиббситовые, а также комплексные, состоящие из двух или трех перечисленных минералов. Аморфный глинозем, входящий в состав промышленных минералов алюминия, со временем испытывает старение, в результате чего он преобразуется в бёмит, а последний переходит в гиббсит.

## Применение в промышленности

Алюминий благодаря своей легкости (плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>), высокой электропроводности, большой коррозионной устойчивости и достаточной механической прочности (особенно в сплавах с Cu, Mg, Si, Mn, Ni, Zn и др.) нашел широкое использование в различных отраслях промыш-

ленности. Основными областями применения алюминия и его сплавов являются: автомобиле-, судо-, самолето- и машиностроение; строительство (несущие конструкции); производство упаковочных материалов (контейнеры, фольга); электротехника (провода, кабель); производство предметов быта; оборонная промышленность.

## Ресурсы и запасы

Основным сырьем мировой алюминиевой промышленности являются бокситы. К собственно бокситам относятся глиноземистые породы, содержащие не менее 28 %  $Al_2O_3$ . Алюминий получают также из нефелиновых и алунитовых руд. Разработан электротехнический способ получения алюминия из силлиманитовых, андалузитовых, кианитовых кристаллических сланцев и гнейсов и других небокситовых источников глинозема. Бокситы, как правило, образуют площадные залежи, выходящие на поверхность либо лишь незначительно перекрытые, вследствие чего их обнаружение и установление промышленных характеристик месторождений представляет собой сравнительно несложную задачу.

Мировые ресурсы бокситов оцениваются в 55–75 млрд. т. Около 33 % их сосредоточено в Южной и Центральной Америке, 27 % – в Африке, 17 % – в Азии, 13 % – в Австралии и Океании и лишь 10 % – в Европе и Северной Америке.

Общие запасы бокситов в мире составляют 62,2 млрд. т, а запасы подтвержденные – 31,4 млрд. т. В первую шестерку стран, обладающих наибольшими запасами, входят Гвинея, Австралия, Бразилия, Ямайка, Индия и Индонезия (табл. 9). Эти страны являются основными поставщиками гиббситовых бокситов на мировой рынок. Другие бокситодобывающие страны, как, например, Китай и Греция, используют бёмит-диаспоровые бокситы. Россия не обладает достаточными для внутреннего потребления запасами бокситов, а ее доля в мировом балансе этого сырья составляет менее 1 %.

К уникальным относятся месторождения с запасами бокситов более 500 млн. т, к крупным – 500–50 млн. т, средним – 50–15 млн. т и мелким – менее 15 млн. т.

Таблица 9

## Запасы бокситов в некоторых странах (млн. т)

Страна, часть света	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание $Al_2O_3$ , %
Россия	674	250	0,8	50
ЕВРОПА	2098	1483	4,7	...
Венгрия	350	300	1	55
Греция	1000	650	2,1	55
АЗИЯ	8284	4390	14	...
Индия	2650	1500	4,8	47
Индонезия	2127	927	3	47
Китай	1420	1500	4,8	61
Турция	490	310	1	51
АФРИКА	26459	10379	33,1	...
Гана	800	510	1,6	47
Гвинея	20000	5900	18,8	52
Камерун		1628	5,2	47
Кот-д'Ивуар	1210	812	2,6	43
Мали	2000	1200	3,8	44
АМЕРИКА	14802	6881	21,9	...
Бразилия	6110	2900	9,2	51
Венесуэла	964	350	1,1	50
Гайана	1800	900	2,9	57
Колумбия	775	380	1,2	40
Ямайка	2016	2000	6,4	50
ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ	9903	7987	25,5	...
Австралия	9750	7900	25,2	48

## Добыча и производство

Мировая добыча бокситов в 1995–2000 гг. составляла 110–120 млн. т. Главными продуцентами бокситов были Австралия, Гвинея, Ямайка, Бразилия и Китай. Объем добычи этого вида минерального сырья в России составлял около 4–5 млн. т, в то время как в Австралии 43 млн. т. В Австралии крупнейшей горнорудной компанией является «*Alcan Aluminium*».

В России разработку и добычу бокситов ведут на месторождениях Урала ОАО «*Севуралбокситруда*» (СУБР) и

ОАО «Южно-Уральские бокситовые рудники» (ЮБР), где разведанные запасы могут обеспечить работу рудников на протяжении 25–40 лет. Добыча бокситов осуществляется шахтным методом с больших глубин.

Производство глинозема в мире из различных источников минерального сырья в 1995–2000 гг. составило 43–45 млн. т. В Австралии, являющейся несомненным мировым лидером, основные производители глинозема – компании «Alcoa», «Reynolds Metals» и «Comalco».

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Наиболее благоприятные условия для образования бокситовых месторождений возникали на ранней стадии геосинклинального этапа, когда формировались геосинклинальные месторождения глиноземного минерального сырья, а также на платформенном этапе, когда появились латеритные и осадочные месторождения.

Месторождения бокситов докембрийского возраста неизвестны. Однако в докембрийскую эпоху в различных регионах мира сформировались небокситовые источники глиноземного сырья – силлиманитовые, андалузитовые и кианитовые кристаллические сланцы и гнейсы.

*Раннепалеозойская эпоха* также была неблагоприятной для образования месторождений бокситов. Наиболее значительное месторождение этого возраста (Боксонское) известно в Восточной Сибири. Оно приурочено к доломитовой свите рифей-раннекембрийского возраста. Пласт бокситов простирается на десятки километров, залегает на неровной карманообразной поверхности доломитов и перекрывается сланцами, песчаниками и доломитами. Около половины всего глинозема, заключенного в бокситах, находится в форме моногидратов – диаспора и бёмита. По мнению Е. П. Бессолицына, эти бокситы образовались в раннем кембрии в окраинной зоне геосинклинали, окаймлявшей Сибирскую платформу.

В *позднепалеозойскую эпоху* месторождения бокситов формировались преимущественно в Северном полушарии. В девоне образовались месторождения геосинклинального типа Урала и Салаира, в карбоне – бокситы на Восточно-Европейской, Китайской и Северо-Американской плат-

формах. Преобладают бокситы морского генезиса, которые, по-видимому, сформировались за счет перемыва и переотложения продуктов кор выветривания. В России наиболее крупные месторождения залегают среди известняков, в Китае и США — приурочены к угленосным отложениям и ассоциируют с плотными маложелезистыми каолиновыми породами. Разрабатываются преимущественно бокситы, в которых содержание  $Al_2O_3$  превышает 50 %.

*Мезозойская эпоха* была благоприятной для формирования промышленных месторождений в Южной Европе, в пределах Средиземноморской геосинклинали. Здесь они образуют два протяженных пояса. Один из них простирается от северо-восточных районов Испании, через южные части Франции и Италии до восточного берега Адриатического моря и далее через Грецию и Эгейские острова в Турцию. Другой пояс расположен севернее и включает месторождения бокситов Австрии, Венгрии и Румынии. В Европе все мезозойские месторождения бокситов ассоциируют с известняками и доломитами. Иногда они окаймлены и отделены от известняков красноватым землистым материалом, известным под названием *terra rossa* (*terra rossa*).

Бокситовые залежи диаспорового типа известны в Индии в Западных Гимаялах. Бокситы мезозойского возраста имеются также в Казахстане, где выделяется Северо-Казахстанская бокситовая провинция.

*Кайнозойская эпоха* — выдающаяся для бокситообразования (более 90 % всех мировых ресурсов). Крупнейшие месторождения третичных бокситов сосредоточены в странах Западной Африки, Австралии, Южной Америки и Карибского бассейна. Значительные месторождения известны также в Азии.

В странах Карибского бассейна — Ямайке, Гаити и Доминиканской Республике — бокситы являются переотложенными латеритами. Они залегают на эродированной поверхности эоценовых и олигоценых известняков и перекрываются осадочными породами. Наиболее крупными месторождениями этого типа располагает Ямайка, занимающая одно из ведущих мест в мире по добыче бокситов. Залежи распространены на огромной площади. Так, в мульде Вильямсфильд залежь бокситов прослежена на протяжении 32 км при средней мощности ее 7,5 м. Бокситы состоят в основном из гиббсита с подчиненным количеством бёмита.

В Южной Америке месторождения бокситов расположены в северной и восточной частях материка, где они приурочены к окраинам Бразильского плато. Бокситоносная полоса начинается в Венесуэле и прослеживается через Гайану, Суринам и Гвиану вплоть до северо-восточной части Бразилии. В Африке крупные месторождения бокситов выявлены в Гане, Камеруне, Сьерра-Леоне, Мали, Анголе и других странах. Все месторождения образовались в результате латеритного выветривания различных магматических пород (сиенитов, габбро и др.), а также сланцев и аргиллитов. В Индии важнейшие месторождения бокситов расположены в штатах Мадхья-Прадеш, Бихар, Мадрас и Бомбей, где они связаны преимущественно с корой выветривания декканских траппов и их туфов.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Все известные на земном шаре месторождения бокситов относятся к экзогенным образованиям. Они разделяются на *месторождения выветривания и осадочные*.

*Месторождения выветривания.* Среди них выделяются *остаточные и переотложенные*. *Остаточные латеритные месторождения* образуются при выветривании горных пород, протекавшем в особых условиях. Благоприятными факторами бокситообразования являются: 1) наличие пород с относительно легко растворимыми порообразующими минералами, нерастворимый остаток которых богат глиноземом; 2) тропический или жаркий климат; 3) высокая пористость или нарушенность пород; 4) равнинный или слабохолмистый рельеф поверхности; 5) длительные периоды покоя в развитии конкретных регионов Земли; 6) наличие растительного и бактериального мира.

Бокситовые остаточные месторождения возникают за счет выветривания и разложения щелочных (нефелиновые сиениты), осадочных (глины), изверженных (габбро, диабаз, базальт) и метаморфических пород. Наиболее благоприятными материнскими породами для формирования остаточных месторождений служат алюмосиликатные породы, содержащие не менее 15–20 % глинозема, мало железа и не более 15 % крупнозернистого кварца. Форма

бокситовых месторождений — плащеобразные покровы, образовавшиеся на месте (*in situ*) за счет подстилающих материнских высокоглиноземистых пород.

Бокситовые остаточные месторождения имеют большое экономическое значение во многих странах дальнего зарубежья. На их долю приходится более половины всех мировых запасов бокситовых руд. Крупные месторождения остаточных бокситов известны в Африке, Латинской Америке, странах Карибского бассейна, Австралии, Индии. В России они выявлены в Белгородском бокситоносном районе КМА (Висловское, Беленихинское месторождения) и на Среднем Тимане (Вежаю-Ворыквинское месторождение).

Остаточные месторождения широко распространены в Гвинее, которая по запасам высококачественных бокситов занимает первое место в мире. Здесь наиболее крупным является месторождение Боке. Оно расположено в 135 км от побережья Атлантического океана в северо-западной части Гвинеи. Бокситовые залежи месторождения приурочены к холмистым возвышенностям (бовалям), окаймленным долинам рек, из которых наиболее крупной является река Когон. Бокситовые латериты образовались в результате выветривания силурийских граптолитовых сланцев в палеоген-неогене в условиях слабо расчлененной пенеппенизированной равнины. Мощность латеритной коры выветривания составляет 5–15 м. Бокситы выходят на поверхность (рис. 38). На месторождении выявлено более 100 бокситовых бовалей. По условиям формирования, залегания и структурно-текстурным особенностям выде-

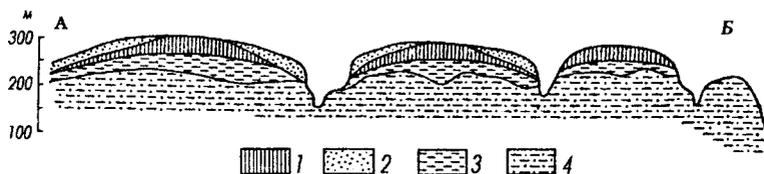


Рис. 38. Схематический разрез бокситорудных залежей месторождения Боке (по И. Дубовской и Б. Одокию):

1 — бокситы структурные; 2 — бокситы обломочные; 3 — аллиты, каолиновые глины; 4 — граптолитовые сланцы и другие терригенные породы силура

ляются две разновидности бокситов: элювиальные и делювиальные. Первые представлены плотными каменистыми рудами, с массивной, полосчатой и сланцеватой текстурой (развиты в верхней части латеритной коры выветривания), вторые — это угловатые или слегка округлые обломки элювиальных бокситов размером от нескольких до 10–15 см, сцементированных пелитовым, алевритовым или псаммитовым материалом.

Основными рудообразующими минералами бокситов являются гиббсит и гематит, с примесью в верхних частях залежей бёмита (до 10 %), каолинита (2–3 %) и титановых минералов. В целом в рудах содержание  $Al_2O_3$  колеблется от 35,7 до 62,9 % (чаще от 45 до 50 %), содержание  $Fe_2O_3$  от 8 до 38 % (в среднем 16–22 %),  $SiO_2$  от 0,7 до 3–4 % (в среднем 2 %),  $TiO_2$  от 0,7 до 3,7 %. В небольших количествах присутствуют Mn, Ni, Co, V, Cr, Mo, Cu, Pb, Sn, Ga, Be. При бортовом содержании глинозема 50 % общие запасы, доступные для открытой разработки, составляют более 3 млрд. т.

*Переотложенные месторождения* образовались в результате частичного размыва и переотложения бокситов среди песчано-глинистых отложений. К этому типу относятся месторождения в штате Арканзас (США), отдельные месторождения Австралии, Гвианы, Гайаны, Суринама. В пределах СНГ они пока не выявлены.

Бокситовые *месторождения штата Арканзас* залегают на неравномерно эродированной поверхности интрузии нефелиновых сиенитов. Многочисленные и сложные по форме залежи бокситов приурочены к холмам нефелиновых сиенитов и располагаются на их вершинах, склонах и у подножий (рис. 39). Размеры залежей небольшие от долей гектара до нескольких сот гектаров. По мнению американских геологов, образование бокситов происходило в дотретичное время. В третичное время они частично подверглись размыву и были переотложены среди песчано-глинистых эоценовых отложений, перекрывающих массив нефелиновых сиенитов. Мощность пластов и линз бокситов 3–4 м, максимум 6–10 м.

Остаточные (латеритные) бокситы приурочены к вершинам или средним частям холмов. Делювиальные залежи располагаются у подножия и в нижних частях склонов холмов под пластами каолиновой глины. Аллювиальные бок-

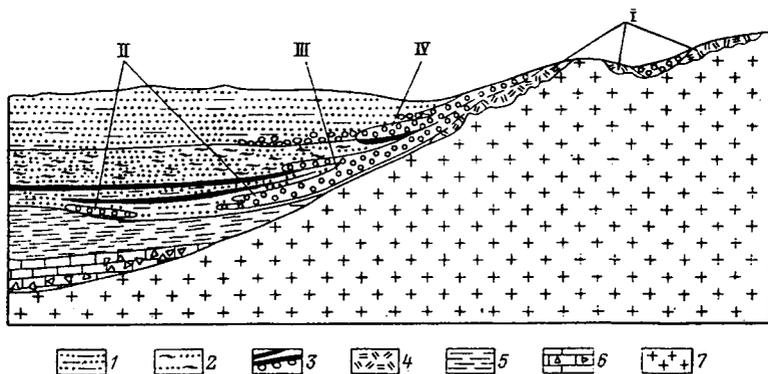


Рис. 39. Обобщенный профиль важнейших типов залежей бокситов Арканзасских месторождений (США) (по М. Гордону):

1–4 – отложения нижнего эоцена: 1 – кварцевые глины, 2 – каолини-  
 товые глины с прослоями лигнита и линзами кварцевого песка, 3 –  
 бокситы, 4 – каолинистые глины; 5 – каолинистые глины и кварце-  
 вые алевролиты палеоцена; 6 – известняки, пески и песчаники палео-  
 цена; 7 – нефелиновые сиениты верхнего мела. Типы залежей бокситов:  
 I – латеритные, II – делювиально-пролювиальные, III – аллювиаль-  
 ные (слоистые), IV – конгломератовые

ситы образованы галькой и обломками бокситов, облада-  
 ют косою и горизонтальной слоистостью.

По минеральному составу бокситовые залежи относятся  
 к гиббситовому типу. В них присутствуют также каолин-  
 ит, гематит, гётит, сидерит, магнетит, пирит, ильменит.  
 Химический состав бокситов(%):  $Al_2O_3$  32–62,  $SiO_2$  2–12,  
 $Fe_2O_3 + FeO$  1–9, п. п. п. (потери при прокаливании) 15–32.

*Осадочные месторождения* по условиям образования и  
 составу разделяются на платформенные и геосинклинальные.

*Платформенные бокситовые месторождения* связаны с  
 континентальными отложениями преимущественно озер-  
 но-болотной фации. Они обычно приурочены к перифе-  
 рическим частям обширных платформенных синеклиз,  
 впадинам в пределах отдельных платформенных выступов,  
 эрозионно-тектоническим котловинам (в зонах сочлене-  
 ния платформ со складчатым обрамлением). К платфор-  
 менному типу относятся также бокситовые месторожде-  
 ния, пространственно связанные с платформенными уг-  
 леносными формациями. Месторождения платформенно-  
 го типа обычно характеризуются почти горизонтальным

залеганием и пластово-линзообразной формой рудных тел. В составе бокситовых руд преобладает гиббсит (гидрагиллит). Платформенные бокситовые месторождения широко распространены в России в пределах Восточно-Европейской платформы (Тихвинский, Средне-Тиманский, Южно-Тиманский, Северо-Онежский бокситовые районы), в Енисейском кряже (Чадобецкая, Татарская и Приангарская группы месторождений), в Казахстане (Тургайский прогиб).

Примером подобных месторождений является *Тихвинский бокситоносный район*. Он расположен в Ленинградской области (центр г. Бокситогорск) и приурочен к полюсе нижнекаменноугольных отложений северо-западного крыла Московской синеклизы (рис. 40). Бокситоносная зона вытянута в субмеридиональном направлении на 250 км. В пределах ее выявлено более 30 месторождений. Залежи бокситов образуют так называемый «рудный горизонт» мощностью 15–30 м. Выше в разрезе «рудный горизонт» сменяется сначала озерно-болотными, а затем прибрежно-морскими песчано-глинистыми отложениями.

Бокситовые залежи имеют форму узких вытянутых линз, залегающих субгоризонтально. Их размеры: длина 800–2200 м, ширина 50–250 м, мощность 2–12 м. Окраска бокситов от светло-серой до красно-бурой. Минеральный состав: гиббсит, бёмит, каолинит, гематит, гидрогётит, кальцит. Бокситовая руда содержит (%):  $\text{Al}_2\text{O}_3$  36–49,  $\text{SiO}_2$  11–18,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  10–19,  $\text{TiO}_2$  2–3,  $\text{CaO}$  1–10.

*Геосинклинальные бокситовые месторождения*. Пространственно они связаны с карбонатными и карбонатно-сланцевыми формациями, развитыми в окраинных частях геосинклинальных прогибов в зонах их примыкания к консолидированным участкам земной коры, а также встречаются в срединных частях геосинклиналей. Бокситы залегают на неровной поверхности подстилающих известняков, обычно закарстованных и перекрытых несогласно залегающими более молодыми карбонатными толщами. Карстовые образования представляют собой ловушки, благоприятные для накопления бокситов и для сохранения их от последующего размыва. Бокситовые пласты и вмещающие породы обычно смяты в складки и метаморфизованы. Источником для образования бокситов были коры выветривания основных эффузивов, сланцев и других пород, рас-

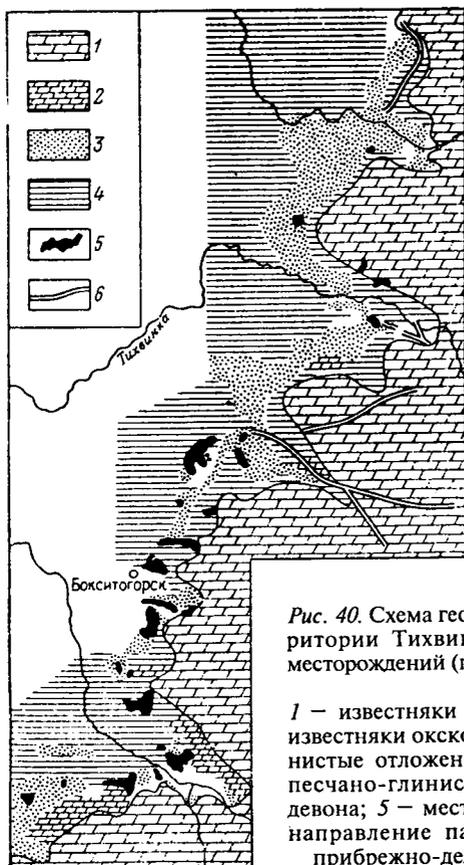


Рис. 40. Схема геологического строения территории Тихвинской групп бокситовых месторождений (по С. Вишнякову и Л. Кальнину):

1 — известняки серпуховской свиты; 2 — известняки окской свиты; 3 — песчано-глинистые отложения нижнего карбона; 4 — песчано-глинистые отложения верхнего девона; 5 — месторождения бокситов; 6 — направление палеодолин, заполненных прибрежно-дельтовыми отложениями

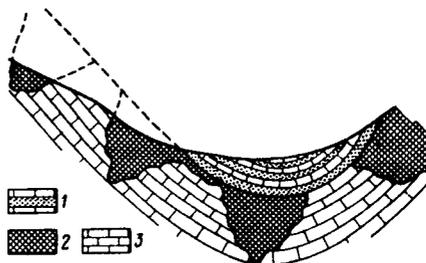
положенных вблизи карстовых полостей. По мнению некоторых исследователей (С. Гольдич, А. Калугин и др.) в прибрежно-морских районах эксплозивной вулканической деятельности карстовые полости на рифовых плато заполнялись вулканическим пеплом, за счет выветривания которого происходило бокситообразование.

Бокситовые месторождения геосинклинального типа широко развиты на Северном и Южном Урале, в Салаирском кряже, в странах Средиземноморского бассейна (Франция, Венгрия, Хорватия, Турция).

Месторождения Южной Франции имеют осадочное происхождение и возникли в геосинклинальных условиях. Бок-

Рис. 41. Месторождение бокситов в форме карманов (департамент Вар, Франция) (по И. Валетон):

1 — пески и известняки верхнего мела (континентальные);  
2 — бокситы; 3 — известняки верхней юры



ситоносная полоса протягивается вдоль побережья Средиземного моря на 400 км при ширине 60 км. Бокситы залегают в понижениях закарстованной поверхности известняков нижнего мела и перекрыты песчано-глинистыми отложениями верхнего мела (сеноман-дат) (рис. 41). Возраст бокситов альб-аптский. Рудные тела обычно залегают в форме пластообразных залежей мощностью от 5–6 до 15–20 м (в карстовых полостях до 100 м) и протяженностью до 10–30 км. Нижняя часть залежей сложена железистыми красными бокситами, вверх по разрезу постепенно переходящими в бокситы розового, серого и белого цвета. Руды бёмитовые, диаспоровые или гиббсит-бёмитовые. Структура их афанитовая, пизолитовая, бобово-оолитовая; текстура полосчатая. Бокситы характеризуются высоким качеством и содержат:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  50–70 % и более,  $\text{SiO}_2$  обычно 7–10 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 25–30 %,  $\text{TiO}_2$  2–3 %.

Месторождения и рудопроявления в Беларуси. В Беларуси выявлены боксит-давсонитовые руды — минеральное сырье, перспективное как для производства металлического алюминия, так и природной соды. Давсонит  $[\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2]$  впервые был обнаружен в начале 1970-х годов А. С. Махначом и В. П. Курочкой в разрезе Осташковичской скв. 11-к в интервале глубин 1192,1–1198,9 м, а несколько позже — на Заозерной площади. На Осташковичской площади давсонит встречается в ассоциации преимущественно с доломитом, ангидритом, гематитом, сидеритом, каолинитом (гиббсит и бёмит отсутствуют), а на Заозерной — в парагенезисе с гиббситом, бёмитом, каолинитом, сидеритом, кальцитом и гематитом.

Заозерное месторождение боксит-давсонитовых руд. Оно расположено в Ельском районе Гомельской области и охватывает площадь  $8 \times 12$  км. Продуктивными являются нижнекаменноугольные отложения бобрицкого горизонта визейского яруса. Месторождение

рождение приурочено к антиклинальной структуре, ось которой вытянута в северо-восточном направлении (рис. 42). В наиболее приподнятой сводовой части кровля горизонта залегает на глубине 290–300 м. Северное крыло структуры погружается под углом 15°, а южное – 12–20°.

Боксит-давсонитовое оруденение приурочено к верхам горизонта с характерным циклическим строением. Каждый цикл состоит из двух элементов: нижнего – песчаников и песчано-алевритовых пород, верхнего – каолинитов. Рудоносной породой является верхняя каолинитовая часть последнего цикла. При подсчете прогнозных ресурсов минимальная мощность рудных тел принималась 1 м при минимальном содержании давсонита 5%. При этих условиях на Заозерном месторождении выделены Северная и Южная рудные зоны, вытянутые вдоль склонов структуры. Каждая из зон в своем составе имеет западную и восточную линзы.

Минеральный состав руд и вмещающих пород довольно прост: основным компонентом вмещающих пород является каолинит, главным рудным минералом – давсонит, его среднее содержание в главном рудном теле составляет 25%, в отдельных пересечениях достигает 40–45%, а максимальное – 63%. Давсонит образует глобулы игольчатого строения, гнездовые и послонные скопления глобулей, сплошную массу лучистых сростков тончайших белых кристаллов. Иногда он в виде чешуйчатой массы заполняет промежутки между нитями и струями гематита, образующего метаморфозы по растительной ткани, и промежутки в фюзенизированных растительных тканях.

Бокситовые минералы на Заозерном месторождении представлены гиббситом, нордстрандитом и бёмитом. Гиббсит встречается в тесной ассоциации с каолинитом; нордстрандит образует различного рода друзовые сростки, сложенные хорошо ограниченными лучевидно расходящимися кристаллами, а также скопления неправильной формы. Бёмит присутствует в породе в микрозернистой и скрытокристаллической формах. Сопутствующие минералы представлены сидеритом, кальцитом, доломитом, гематитом и кварцем. Для руд Заозерного месторождения характерно повышенное содержание галлия, лития, ниобия и титана. Ресурсы давсонитовых и боксит-давсонитовых руд категории  $P_1$  составляют 181,7 млн. т при среднем содержании давсонита 21%.

Технико-экономическая оценка месторождения показала, что при шахтной добыче давсонита для производства глинозема и кальцинированной соды с попутным получением сырья для производства цемента рентабельность при годовом производстве глинозема 0,7 млн. т составит 3,8%, срок окупаемости капитальных вложений – 26 лет; при годовом производстве глинозе-

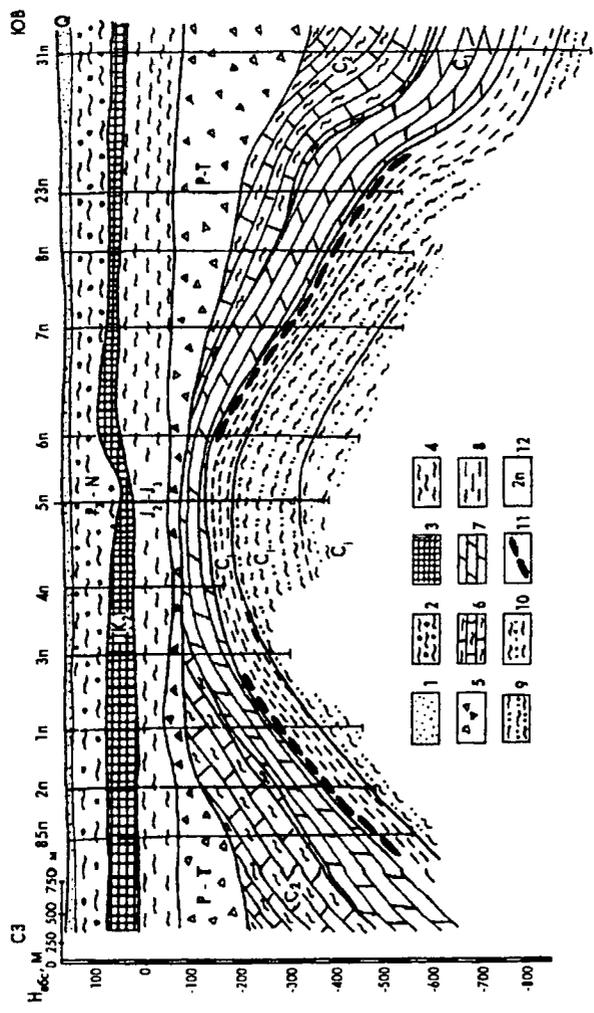


Рис. 42. Заозерное месторождение бauxонита. Геологический разрез (по Н. Савченко):

Отложения: 1 – четвертичные; 2 – палеогеновые и неогеновые; 3 – верхнего мела; 4 – средней и верхней юры; 5 – перми и триаса; 6 – среднего карбона; 7 – нижнего карбона (визейский ярус – известняки тульского, алексинского, михайловского горизонтов); 8 – нижнего карбона (визейский ярус – каолиновые глины, пески бобриковского горизонта); 9 – нижнего карбона (турнейский ярус – песчаники, пески, каолиновые глины кизеловского горизонта); 10 – нижнего карбона (турнейский ярус – глины, пески, песчаники, черепетского горизонта); 11 – боксит-даунсонитовая минерализация в бобриковских отложениях; 12 – скважины

ма 1 млн. т рентабельность достигнет 5,5 %, а срок окупаемости сократится до 17 лет. Эффективность освоения месторождения может быть повышена при комплексном использовании не только давсонитовых руд, но и собственно бокситов и каолинитов с извлечением из них редких металлов. Перспективно применение геотехнологического метода подземного выщелачивания давсонита и глиноземных минералов группы боксита.

Ресурсы давсонитовых и боксит-давсонитовых руд Беларуси могут быть существенно расширены за счет доизучения известных перспективных площадей (Наровлянская, Северо-Карповичская, Мытвинская, Осташковичская) и выявления новых. Прогнозные ресурсы этого вида минерального сырья в Припятском прогибе по данным РУП «Белгеология» составляют около 2,6 млрд. т.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА

### Краткие исторические сведения

Золото наряду с серебром, платиной и металлами ее группы (палладий, иридий, родий и др.) относится к благородным металлам. Золото было одним из первых металлов, который стал известен человеку. Изделия из золота найдены в Египте в культурных слоях эпохи Амра (неолит-медный век, 5000–4500 лет до н. э.). Из него выковывали иглы, зубильца, небольшие ножички, бусинки и прочие предметы. Происхождение слова «золото» истерлось из памяти человечества вследствие его древности, но, скорее всего, оно имеет общее происхождение с корнем «сол» – Солнце. Из египетских папирусов известно, что еще в медном веке золото в Египте добывалось в значительных объемах. Первое добытое золото было россыпное. Его получали при промывке золотоносных песков в долине Нила. Важным событием было составление фараоном XIX династии Сети I (1313 по 1292 г. до н. э.) первой «топографо-геологической карты» золоторудного месторождения Дэрехиб. Насколько систематически велись поиски золота, видно из того, что в течение царствования Сети I и его сына Рамзеса II почти весь Египет и Нубия были разведаны шурфами.

Бурные события сопровождали исторический путь добычи и использования золота. «Золотые лихорадки», вспыхивавшие в середине XIX века на Аляске, в Австралии, Калифорнии, слухи о центнерах золота, намываемых старателями за сутки, о гигантских самородках десятки лет волновали мир. Джек Лондон, Брет-Гарт и другие писатели посвятили золоту свои увлекательные повести и романы.

История развития золотодобывающей промышленности в России представляет исключительный интерес уже

потому, что еще в VI в до н. э. Аристей упоминал о грифах, которые стерегут золото в Рифейских горах, т. е. на Урале. «На севере Европы, несомненно, находится золото в огромном количестве», — писал Геродот в V в. до н. э., также имея в виду Уральские горы. Громадное количество золота, которым располагали скифы, настолько поражало воображение греков, что возникло множество легенд, иногда совершенно фантастических.

В России коренное месторождение золота было открыто на Урале в 1745 г. раскольником Ерофеем Марковым, который обнаружил «наверху земли светлые камешки, подобных хрустало и тут же между камешками нашел таких же особливо похожих на золото крупинки три или четыре» (В. В. Данилевский. Русское золото). Так было сделано открытие, послужившее основой для возникновения «родоначальника русской золотопромышленности» — Березовских золотых промыслов. Впоследствии россыпные и коренные месторождения были выявлены на Енисее, Лене, Алдане, Колыме и в бассейнах других крупных рек Сибири.

При разработке месторождений нередко находили крупные самородки золота весом десятки килограммов. Многие из них были переработаны и до наших дней не дошло ни хороших слепков с них, ни рисунков, ни даже грамотных описаний. Примером огромных скоплений золота является знаменитая «плита Холтермана», обнаруженная в Австралии в 100 км к северо-западу от г. Сиднея. После удаления вмещающей породы ее длина равнялась 144 см, а масса 275 кг (чистого золота было почти 100 кг). Крупнейшими из зарегистрированных самородков были: 1) «Япо-нец», найденный на о. Хоккайдо в 1901 г. (масса 71 кг); 2) «Желанный незнакомец», найденный в Австралии в 1869 г. (масса 70,9 кг); 3) «Желанный самородок» (Австралия, 1858 г., масса 68,8 кг). В России были обнаружены редкие, по своей красоте самородки («Большой треугольник», «Зачьчи уши», «Кальцитовый» и др.).

Золото — очень тяжелый металл. Его плотность  $19,32 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $1063 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это очень мягкий, самый тягучий и ковкий из всех известных металлов (легко расплющивается в тончайшие пластинки, например, золотую горошину можно расплющить в прозрачный лист площадью  $50 \text{ м}^2$ ).

## Геохимия

Золото весьма распространенный элемент, его кларк в земной коре  $4,5 \cdot 10^{-7} \%$ . Относительно повышенные концентрации Au наблюдаются в кислых магматических породах. Известно 14 изотопов золота с массовыми числами от 192 до 206, но стабилен лишь один  $^{197}\text{Au}$ . По мнению большинства геологов, золото поступает из подкорового основания верхних оболочек Земли. Оно образует промышленные концентрации в постмагматических, главным образом, гидротермальных месторождениях. Золото переносится в форме тиосульфидных и хлоридных ( $\text{AuCl}_2^-$  и  $\text{AuCl}^{2-}$ ) комплексных водных растворов. В экзогенных условиях золото, освобождаясь от ассоциированных с ним эндогенных минералов, образует вторичные залежи в россыпях, а также в железных шляпах сульфидных месторождений, где связано с гидроксидами железа.

## Минералогия

Минералогия золота простая. Важнейшим промышленным минералом золотых месторождений является *самородное золото*. В нем содержится до 40 элементов-примесей, среди которых основные — Ag, Cu, Fe, Pt, Pb, Bi и др. В связи с тем, что самородное золото содержит примеси других металлов, введено понятие «проба золота», означающее содержание золота в 1000 единицах по массе и в процентах для изделий из золота. Золото в рудах существует в виде неправильных обособлений (зерна, пленки, дендриты, нити), реже — в виде кристаллов и их агрегатов. Выделения золота по размеру подразделяются на дисперсные (до 10 мкм), мелкие (до 0,1 мм), средние (до 1 мм), крупные (до 5 мм) и самородки (более 5 мм или 10 г по массе). Кроме самородного золота известно еще около 20 золотосодержащих минералов, не играющих заметной роли в производстве золота.

*Электрум* является промежуточным минеральным видом в ряду Au—Ag. Содержание в нем серебра достигает обычно 30, иногда 40 и даже 50 %, цвет желтовато-белый. Встречается в низкотемпературных гидротермальных ме-

сторождениях. Среди интерметаллических соединений кроме электрума известны *кюстелит* Ag (Au), *аурикуприд* Au<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>, *ауростибит* AuSb<sub>2</sub>, *родит* Au (Pt, Rh, Ir, Pd) и др.

## Применение в промышленности

Золото как химически стойкий и ковкий металл, обладающий красивым цветом и сильным блеском, с давних времен использовалось для чеканки монет и в ювелирных целях. Значительная часть добываемого золота оседает в виде слитков и монет в сейфах национальных банков, составляя золотой запас.

В небольших количествах золото применяется для золочения металлических предметов, изготовления химически стойкой аппаратуры, в фотографии для вирурования, в медицине и т. п. В последние 50 лет оно нашло широкое применение в ракетной и космической технике (для отражения радиации и тепловых лучей в космосе). Археологами в Южной Америке найден череп вождя инков со следами хорошо выполненной трепанации. Отверстие черепа древний хирург закрыл тонкой пластинкой из золота.

## Ресурсы и запасы

Месторождения и проявления золота известны в 120 странах мира. В 40 основных из них оценены прогнозные ресурсы золота (без учета запасов), которые в 1995–2000 гг. составляли 105–180 тыс. т. Основная часть этих ресурсов (40–60 тыс. т) сосредоточена на флангах и глубоких горизонтах (3–4 км), разрабатывающихся более 100 лет месторождений золотоносных конгломератов района Витватерсранд в ЮАР. Мировые подтвержденные запасы золота (без учета запасов России) на начало 1997 г. составляли 50840 т, а общие запасы – 91350 т. Преобладающая часть мировых подтвержденных запасов сосредоточена в месторождениях ЮАР (43,3 %), США (9,9 %), Канады (6,5 %), Австралии (4,9 %) и Индонезии (4,7 %) (табл. 10).

По данным ГНПП «Аэрогеология» Министерства природных ресурсов РФ в России с 1993 г. наблюдалось уменьшение запасов золота в связи с сокращением ассигнова-

Таблица 10

## Запасы золота в некоторых странах (в т)

Страна, часть света	Запасы общие	Запасы под- тверж- денные	Их % от мира	Содержа- ние Au в коренных месторож- дениях, г/т	Содержание Au в рос- сыпных месторож- дениях, г/м <sup>3</sup>
Россия	...	...	0	4,7	1,2
<b>ЕВРОПА</b>	2532	1034	2	...	...
Болгария	265	180	0,4	3,6	0,2
Югославия	1240	390	0,8	5	...
<b>АЗИЯ</b>	14212	8480	16,7	...	...
Армения	312	220	0,4	5,2	...
Индонезия	3100	2400	4,7	3	0,4
Казахстан	1040	770	1,5	4,2	0,7
Киргизия	1050	350	0,7	4,1	1,2
Китай	2100	810	1,6	4	1,3
Узбекистан	2770	2000	3,9	2,3	0,25
Филиппины	1850	1060	2,1	3,4	0,6
Япония	585	250	0,5	9	...
<b>АФРИКА</b>	43328	23977	47,2	...	...
Гана	1453	820	1,6	3,1	0,6
Зимбабве	640	290	0,6	2,59	...
Мали	615	350	0,7	3,2	1,05
ЮАР	39000	22000	43,3	4,91	0,3
<b>АМЕРИКА</b>	24913	12842	25,3	...	...
Аргентина	980	425	0,8	4,2	0,95
Боливия	310	228	0,4	3,5	1,1
Бразилия	3825	625	1,2	5	2,6
Венесуэла	480	280	0,6	9	1,4
Доминиканска я респ.	373	335	0,7	4	...
Канада	4500	3280	6,5	2,9	0,4
Мексика	1170	590	1,2	2,5	...
Перу	790	280	0,6	2,4	0,3
США	9200	5050	9,9	1,65	0,3
Чили	1715	1088	2,1	4,5	0,7
<b>ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ</b>	6365	4507	8,9	...	...
Австралия	3030	2500	4,9	2,1	0,7
П.-Новая Гвинея	3050	1870	3,7	3,2	0,3

ний на геологоразведочные работы. Положительные сдвиги наметились с 1996 г. в связи с заметным притоком иностранных инвестиций. Наиболее важные результаты были получены на Новотасеевском месторождении в Восточном Забайкалье, в разведке которого принимала участие канадская компания «*Armada Gold Corp.*». К уникальным месторождениям золота принадлежит Витватерсранд — пока единственное в мире с запасами 25 тыс. т. К весьма крупным относятся месторождения коренного золота с разведанными запасами свыше 100 т и россыпи, содержащие более 50 т металла, к крупным — соответственно от 50 до 100 и от 25 до 50 т, к средним — от 10 до 50 и от 1 до 25 т и к мелким — месторождения с запасами менее 10 т для коренных и менее 1 т золота — для россыпных месторождений.

## **Добыча и производство**

Во всем мире до XV в. включительно было добыто 12 тыс. т золота, в XVI в. было произведено 760 т, в XVII в. — 900 т, в XVIII в. — 1900 т, в XIX в. — 11600 т. В настоящее время золото добывается более чем в 50 странах. В 1990—2000 гг. мировая добыча этого металла составляла 2,1—2,3 тыс. т ежегодно. На долю шести главных золотодобывающих стран (ЮАР, США, Австралия, Канада, Китай и Россия) приходится основной объем мировой добычи — 65—67 %. В 1995 г. в ЮАР было добыто 522,4 т золота, в России 127,8 т. В ЮАР главным продуцентом является консорциум «*Free State Consolidated Gold Mines*». В США золотые и золотосодержащие руды добывались на 71 руднике в 11 штатах. В 1996 г. на золоторудных месторождениях было добыто 308,9 т металла. Основными продуцентами золота являются рудники штата Невада. В этом штате функционируют два крупных горно-обогачительных комплекса — Голд-страйк (принадлежит компании «*Barrick Gold*») и Лон-Три («*Santa Fe Pacific Gold*»).

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Металлогения золота различна для архея и послеоархейской истории развития Земли. В архее месторождения зо-

лота формировались в связи с подкоровой базальтовой магмой, обусловившей возникновение протогеосинклинальных зеленокаменных поясов. Начиная с протерозоя более существенное значение в образовании месторождений золота стала играть коровая гранитная магма.

Золоторудные месторождения развиты: 1) на активизированных древних щитах и платформах; 2) в складчатых областях с различным режимом тектонического развития (миogeосинклинали, эвгеосинклинали); 3) в зонах активизации областей завершённой складчатости; 4) в вулканогенных поясах.

На древних щитах золоторудные месторождения связаны в основном с гранитоидным магматизмом древних складчатых систем и размещаются в узких грабенах и трогах, а также в пределах синеклиз. В платформенных чехлах месторождения локализируются в зонах сочленения антеклиз и синеклиз, а также в пределах участков сочленения платформ со складчатыми поясами. В складчатых областях золоторудные месторождения представлены различными формациями, но главное значение имеют среднеглубинные золото-кварцевые и золото-кварц-сульфидные. В вулканогенных поясах (Россия, США, Мексика и др.) преобладают месторождения золото-серебряной формации, связанные с андезит-дацитовыми вулканитами и тесно ассоциированными с ними малыми телами монцонитов, граносиенитов и сиенитов.

*Докембрийская эпоха* была исключительно благоприятной для формирования крупных и уникальных месторождений золота зеленокаменных поясов в Канаде, Южной Африке, Западной Австралии, Индии, а также на Урале. В протерозое (2,2–1,8 млрд. лет) возникли крупнейшие стратиформные месторождения, в том числе уникальные золотоносные конгломераты Витватерсранда.

В *раннепалеозойскую эпоху* образовывались сравнительно редкие месторождения золота, преимущественно гидротермальной группы. В России в течение этой эпохи сформировалась преобладающая часть золоторудных проявлений и месторождений Кузнецкого Алатау, Западного и Восточного Саяна, Горной Шории и Южного Урала.

*Позднепалеозойская эпоха* в сравнении с раннепалеозойской ознаменовалась несколько более широким распространением месторождений золота. Однако удельный вес

их в мировых запасах и добыче весьма незначителен. С девонскими гранитами генетически связана золотоносность Аппалачского рудного пояса Северной Америки, протягивающегося от Новой Шотландии в Канаде до штатов Джорджия и Алабама в США. Многочисленные месторождения золота, также связаны с гранитными интрузиями, разрабатываются в Австралии в штатах Виктория и Новый Южный Уэльс. Среди них наиболее крупные — Бендиго, Балларат, Дейлсфорд и Каствлмен. В России с гранитоидами девонского возраста связано оруденение миасской формации на Урале.

В *мезозойскую эпоху* относительно широкое развитие получили вулканогенные гидротермальные месторождения. Крупнейшие районы распространения месторождений золота этого возраста расположены в Северной Америке, вдоль тихоокеанского побережья (от Аляски на севере до Калифорнии на юге). К мезозойской эпохе рудообразования относится ряд месторождений в Северной Корее, Японии, Таиланде и Китае. В России в это время образовались золоторудные месторождения Северо-восточного пояса, который в структурном отношении представляет собой интрагеосинклиналь.

*Кайнозойская эпоха* была исключительно оптимальной для образования золотоносных россыпей, которые широко распространены и, как правило, сопутствуют коренным месторождениям золота всех эпох рудообразования. Наибольшую промышленную ценность представляют аллювиальные россыпи, в том числе современные русловые, долинные и террасовые, а также древние погребенные. Крупные россыпные месторождения имеются в Австралии, Африке и России. В России они сосредоточены в основном в бассейнах рек Енисея, Лены, Бодайбо, Витима, Алдана, Колымы, Яны и Индигирки. К кайнозойской эпохе рудообразования относятся также коренные месторождения золота, разрабатываемые в ряде стран (США, Мексика, Гондурас, Колумбия, Япония, Индонезия и др.). Среди них выделяются многочисленные месторождения Америки, приуроченные к третичному вулканическому поясу, протягивающемуся от Аризоны через Неваду и Южную Калифорнию до Центральной Мексики.

## Генетические типы промышленных месторождений

Среди промышленных месторождений золота выделяются: 1) скарновые, 2) плутоногенные гидротермальные, 3) вулканогенные гидротермальные, 4) метаморфогенные, 5) россыпные.

*Скарновые месторождения* известны в Канаде (Никел-Плейт), США (Оурей, Кейбл), Мексике (Санта-Фе), России (Ольховское и Чибижекское в Западной Сибири). Обычно золото связано с сульфидами (пиритом, пирротинном), наложенными на известковые скарны гранат-пироксенового состава. Наиболее характерным представителем этой группы является *Ольховское месторождение*. Слагающие его ниже- и среднекембрийские карбонатные и песчано-туфогенные породы смяты в складки и разбиты разломами (рис. 43). Они прорваны гранитоидами ордовикского возраста, а также дайками диабазов, кварцевых порфиров и аплитов. В зоне контакта с гранитоидами карбонатные породы преобразованы в гранат-пироксеновые скарны, на которые наложено золото-сульфидное оруденение. Рудные

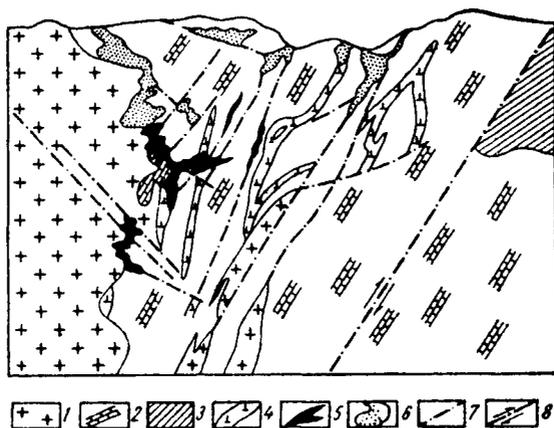


Рис. 43. Схематический разрез центральной части Ольховского месторождения (по А. Хазагарову):

1 — граниты, гранодиориты; 2 — известняки, доломиты; 3 — сланцы, роговики; 4 — древние дайки; 5 — рудные тела; 6 — окисленные руды; 7 — тектонические нарушения; 8 — направление движений по разрывам

тела имеют форму линз, труб и жил. Золото ассоциируется преимущественно с минералами полиметаллической стадии — халькопиритом, сфалеритом, галенитом.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* золота достаточно широко распространены в различных регионах мира. Все они, как правило, полистадийные. Причем в истории их формирования ранние стадии являются убогими по содержанию золота, средние золотоносными (продуктивными); поздние стадии также не имеют существенного значения для накопления золота. Для месторождений этого типа характерны две рудные формации: *золото-кварцевая* и *золото-кварц-сульфидная*.

В качестве характерного представителя золото-кварцевой формации рассмотрим *месторождение Бендиго*. Оно расположено в Австралии в штате Виктория. Район месторождения сложен нижнепалеозойскими сланцами и песчаниками с прослоями карбонатных пород. Породы смяты в складки, которые осложнены надвигами и поперечными сбросами (рис. 44). В окрестностях известны массивы позднедевонских гранитоидов, с которыми связывается оруденение. На месторождении выделяется серия субпараллельных складок (до тринадцати). Рудные тела выполняют шарниры складок, образуя седловинные жилы. Руда состоит из золотоносного кварца, присутствуют также сульфиды (арсенопирит, пирит, пирротин, галенит, сфалерит, антимонит). На месторождении добыто более 600 т золота при содержании его в руде 5–25 г/т.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения*. Среди них выделяются две группы. Первая связана с архейскими офиолитовыми поясами в пределах платформ, а вторая — с позднегеосинклинальными андезит-риолитовыми поясами, среди которых особенно выделяются рудоносные области Тихоокеанского пояса и внутренней дуги Карпат. Для вулканогенных гидротермальных месторождений характерны три рудные формации: 1) *золото-кварц-халцедон-сульфидная*; 2) *золото-серебро-кварц-адуляровая*; 3) *золото-сульфидная*.

Типичным представителем золото-кварц-халцедон-сульфидной формации является *месторождение Балей*. Оно расположено в пределах Ундинско-Даинской депрессии Восточного Забайкалья, выполненной верхнеюрскими конгломератами, а также озерно-делювиальными отложениями.

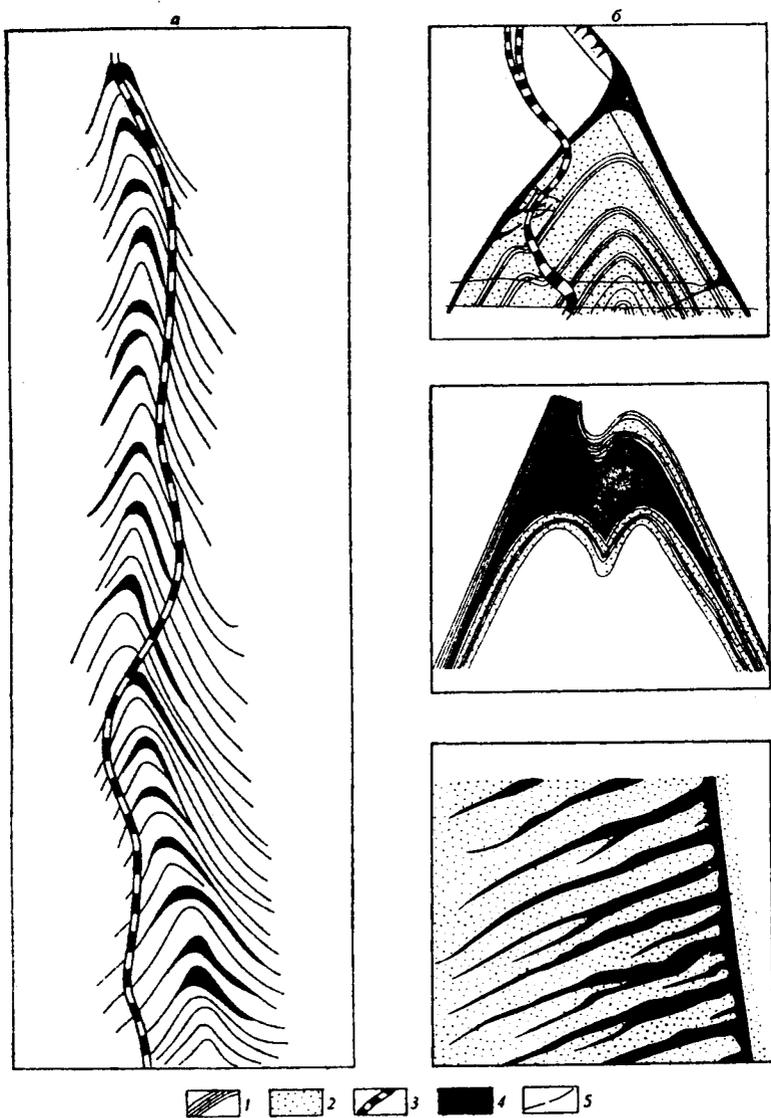


Рис. 44. Поперечные разрезы жильной системы (а) и отдельных жил (б) месторождения Бендиго (по Д. Томасу):  
 1 – сланцы; 2 – песчаники; 3 – дайки мончикитов; 4 – рудные тела;  
 5 – тектонические нарушения

ми верхней юры – нижнего мела и перекрывающими их третичными конгломератами. Собственно месторождение приурочено к северному борту небольшого грабена, где развита система субширотных пологих и крутых трещин, выполненных золотоносной рудой (рис. 45). Выделяются рудные штокверки, линейные жильные зоны и отдельные жилы, сопровождаемые ореолами вкрапленного оруденения. В истории развития месторождения выделяется шесть стадий, из которых наиболее продуктивной являлась пятая (золото-пираргиритовая). Кварц и халцедон составляют около 95 % состава руд месторождения.

*Метаморфогенные месторождения.* Среди них выделяются две группы: метаморфизованная, представленная древними рудоносными конгломератами, и метаморфическая, образованная древними золотосодержащими черными сланцами. Исключительно важное экономическое значение имеют древние метаморфизованные золотосодержащие конгломераты. К этой группе относится уникальное месторождение *Витватерсранд*, расположенное в ЮАР к югу от г. Йоганнесбурга. Рудоносная площадь составляет около 35 тыс. км<sup>2</sup>. Оруденение связано с конгломератами и отчас-

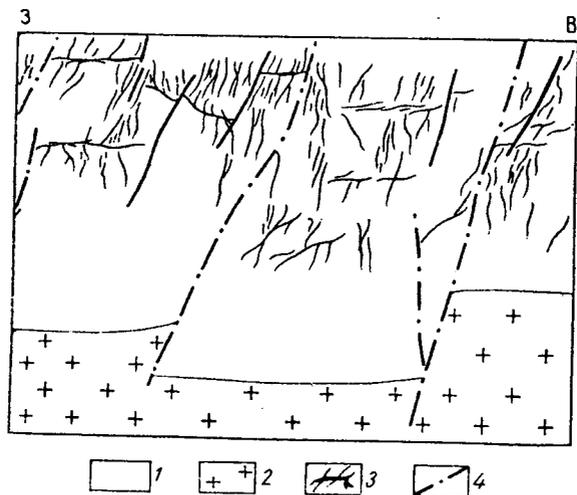


Рис. 45. Фрагмент строения месторождения Балей в разрезе (по П. Бернштейну):

1 – меловые конгломераты; 2 – гранодиориты; 3 – рудные жилы; 4 – сбросы

ти с кварцитами системы витватерсранд (нижний протерозой), сложенной нормальными осадочными породами. В Трансваале отложения системы витватерсранд несогласно залегают на архейских кристаллических сланцах, гранитах и гранито-гнейсах и представлены плотными сланцами, кварцитами и конгломератами общей мощностью около 7800 м. Перекрываются они вулканогенными и осадочными породами системы вентерсдорп также докембрийского возраста. Осадочные породы системы витватерсранд пересечены дайками различного состава, а также многочисленными кварцевыми жилами.

Происхождение конгломератов точно не установлено. Протерозойские отложения представляют собой серию вложенных и наложенных вееров дельтового выноса, преобразованных в слои конгломератов, кварцитов и сланцев (рис. 46).

Рудные тела Витватерсранда состоят из пачек золотоносных конгломератов, разделенных прослоями кварци-

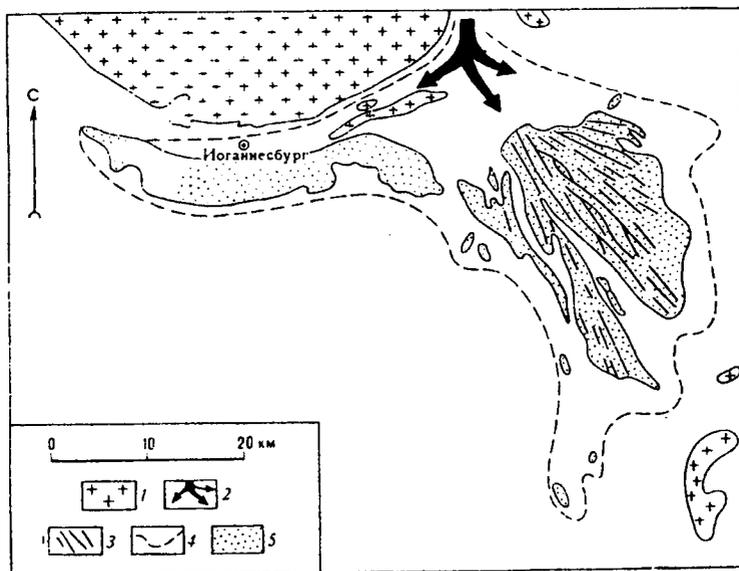


Рис. 46. Веерообразный бассейн Витватерсранда (По Д. Преториусу): 1 - граниты основания; 2 - направление привноса рудоносного материала; 3 - струи, обогащенные золотом вдоль древних потоков; 4 - граница рифа Лидер; 5 - отработка в пределах рифа Лидер

тов, образующих так называемые «риффы» (рис. 47). Промышленные разновидности «риффов» называются «банкетами». Преобладающая часть их сосредоточена в верхнем отделе витватерсрандского комплекса мощностью 2000–4000 м, где развито 16 рифов. Важнейшими среди них являются (сверху вниз): Блэк, Кимберли, Берд, Лидер и Мейн. Мощность рифов колеблется от 30 до 400 м, пластов рудоносных конгломератов — от нескольких сантиметров до 3 м. Эти пласты прослеживаются по простиранию до 70 км, а по падению до 8 км. Золотоносные пласты вскрыты в шахтах на глубине до 3,0 км и более, а буровыми скважинами до 4,6 км.

Золотоносные конгломераты сложены на 80 % окатанной галькой светлого кварца, реже галькой кварцита и сланцев размером 3–6 см, цемент представлен кварцем, хлоритом, серицитом, биотитом, эпидотом, карбонатами, углистым веществом и рудными минералами. В составе руд выявлено до 78 минералов. На долю сульфидов приходится до 5–10 % рудной массы. Среди них наиболее распространен пирит, в подчиненном количестве встречаются марказит, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, пентландит, кобальтин и др. В обломочной фракции присутствуют циркон, шпинель, гранат, рутил, алмаз, монацит, турмалин и другие минералы. Из руд извлекают золото, серебро, платиноиды, уран и алмазы. Концентрация золота варьирует от 8 до 20 г/т (в среднем 10 г/т). Уран распространен в форме уранинита, тухолита, браннерита и ураноторита. Среднее содержание  $U_3O_8$  0,028 %.

Месторождение эксплуатируется с 1885 г. Из его недр извлечено более 35 тыс. т золота. Максимальный уровень добычи золота (около 1 тыс. т) был достигнут в 1970 г., затем началось постепенное снижение (до 522,4 т в 1995 г.). В настоящее время глубина разработок местами превышает 3,1 км.

*Россыпные месторождения.* Среди них известны аллювиальные, элювиальные, делювиальные пролювиальные и латеральные, как современные, так и древние. Однако основное экономическое значение имеют главным образом аллювиальные россыпи. Они возникают при разрушении коренных месторождений золота в процессе физического и химического выветривания и переотложения его реками и ручьями. При этом крупные зерна золота (размером бо-



лее 0,3–0,5 мм) фиксируется вблизи коренного источника в донной части аллювиальных отложений, а более тонкое золото сносится вниз по течению (до 15 км) от коренного источника. Аллювиальные россыпные месторождения золота весьма широко распространены в Восточной Сибири и Северной Америке.

Рудопроявления в Беларуси. Попутная оценка золотоносности пород кристаллического фундамента и платформенного чехла с большим объемом аналитических определений свидетельствует о нередкой встречаемости повышенных и высоких содержаниях золота в новообразованиях различных формационно-генетических типов. Золотоносность дорифейских пород установлена на Скидельской площади, в зоне Щучинского разлома, в полосе распространения поречанских кварцитов и кварцевых метасоматитов, на площадях Униховского и Рубежевичского колчеданных проявлений, на Слонимской, Выгоновской, Бобовнянской, Деревнянской и других площадях.

По данным Ю. А. Деревянкина в кристаллическом фундаменте выделяются три основных типа проявлений золота: *золото-сульфидный, золотоносных железистых кварцитов и золотокварцевый*. К первому типу относятся зоны развития сульфидной минерализации в измененных гнейсах, амфиболитах, нередко графитсодержащих. Сульфиды представлены пиритом, пирротином, халькопиритом, арсенопиритом и леллингитом. Проявления второго типа связаны с железистыми кварцитами, иногда преобразованными в магнетитовые амфиболиты и содержащие тонкую вкрапленность и маломощные прожилки сульфидов (пирит, халькопирит, арсенопирит). Проявления третьего типа приурочены к сильно окварцованным гнейсам, амфиболитам, не содержащим видимую рудную минерализацию, или к зонам развития кварцевых и сульфидно-кварцевых прожилков.

Мощность золотоносных зон в пределах этих проявлений варьирует от нескольких сантиметров до первых метров. Содержание золота обычно составляет сотые – десятые грамма на тонну, в некоторых случаях достигает 1 г/т или несколько больше (Околовская, Рубежевическая, Униховская площади).

В платформенном чехле выделяются три основных типа проявлений золота: *аллювиальных, погребенных ледниковых и прибрежно-морских россыпей*. Достоверные данные о наличии россыпного золота в четвертичных отложениях появились в начале 1990-х годов. Изучение проявлений россыпного золота проводилось НИГРУП «БелГЕО» (Ю. А. Деревянкин и др.). Было установлено, что россыпное золото встречается во всех геоморфологических областях республики, но главным образом во флювиогляциальных и аллювиальных отложениях. Преобладающая часть выде-

ленных золотинок (93 %) имеет размер от 0,03 до 0,25 мм. Более крупные выделения металла размером до 1,0 мм составляют около 4 %. В единичных случаях фиксируются золотины размером до 3–6 мм. Масса наиболее крупных единичных зерен достигает 70–175 мг. Формы выделений металла разнообразны, но чаще всего наблюдаются пластинчатые, таблитчатые и комковидные зерна. Рельеф их поверхности шагреневый; цвет золотисто-желтый, иногда с зеленоватым, красноватым или серебристым оттенком. Иногда встречаются золотины в «рубашке» или с налетом гидроксидов железа. В зернах золота наблюдается примесь серебра и меди.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕРЕБРА

### Краткие исторические сведения

Серебро позже, чем золото стало использоваться человеком. Наиболее древние серебряные изделия — ожерелья, бусы, мелкие украшения — были встречены в захоронениях, относящихся ко второй эпохе Герзе, т. е. 3600–3000 лет до н. э. Серебро в древнем Египте высоко ценилось, что доказывает его наименование «нуб хэдж», т. е. «белое золото». Еще с глубокой древности металл серебро обозначался символическим знаком лунного серпа; этот символ приняли и алхимики, поскольку серебро было посвящено богине Луны, и изображалось диском с точкой в центре. М. В. Ломоносов в своем замечательном труде «Первые основания металлургии или рудных дел» писал, что: «серебро от химиков называется Луною и имеет знак серпа».

Древние греки добывали серебро из свинцовых руд Лауриона и называли его «аргирон», т. е. блестящий, сверкающий. Отсюда же и пошло латинское «argentum». В Европе в XII–XV вв. серебро добывали в Рудных горах. На территории стран СНГ этот металл был известен в Средней Азии, Закавказье и Карпатах уже в VIII–IX вв. В 1676 г. была найдена серебряная руда на о. Медвежем в Кандалакшской губе Белого моря, в 1678 г. были открыты Нерчинские рудники в Забайкалье, а в 1730 г. — Колыванские рудники на Алтае.

Серебро — тяжелый металл, его удельная масса  $10,5 \text{ г/см}^3$ , твердость 2,5–3, температура плавления  $960,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , а кипения —  $2212 \text{ }^\circ\text{C}$ . Оно легко растворяется в азотной кислоте и кипящей серной, но не в царской водке, в которой образуется защитная пленка хлористого серебра.

### Геохимия

Среднее содержание серебра в земной коре составляет  $7 \cdot 10^{-6} \%$  (по А. П. Виноградову). Кларк его для кислых,

средних и основных пород изменяется незначительно и обычно составляет  $5-7 \cdot 10^{-6} \%$ . В осадочных породах максимальные концентрации серебра устанавливаются в глинистых сланцах, где достигают  $7 \cdot 10^{-6} \%$ . В природных условиях известны два стабильных изотопа  $^{107}\text{Ag}$  и  $^{109}\text{Ag}$ . В химических реакциях серебро образует характерные одновалентные ионы типа купро с относительно сильной поляризацией. Ионный радиус  $\text{Ag}^+$  равен 0,113 нм. Серебро характеризуется относительно низким энергетическим показателем ионов, что обуславливает незначительное проявление изоморфизма этого элемента и сравнительно трудное его вхождение в решетку других минералов. Наблюдается лишь постоянный изоморфизм ионов серебра и свинца.

Серебро не образует промышленных концентраций на магматическом этапе, а накапливается в постмагматических продуктах в форме тиосульфатных и хлоридных комплексов. В экзогенных условиях при окислении сульфидных месторождений серебро в виде сульфата или тиосульфата переходит в раствор и перераспределяется в зоне вторичного сульфидного обогащения в самородной форме или в форме галлоидов. В незначительном количестве в виде самородного серебра может встречаться в элювиальных и делювиальных россыпях.

## Минералогия

В настоящее время известно около 60 серебряных и серебросодержащих минералов, входящих в состав сульфидов, серебряных сульфосолей, теллуридов, селенидов, галлоидов и самородных элементов. Из них основное промышленное значение имеют: самородное серебро, аргентит, пираргирит, прустит, стефанит, полибазит и кераргирит.

*Самородное серебро.* Содержит примеси Au, Hg, Sb, Bi, Cu, As, Fe; цвет серебряно-белый, твердость 2,5–3, плотность 10,1–11,1 г/см<sup>3</sup>, излом крючковатый. Самородки серебра очень редки. Самый крупный самородок, найденный в Рудных горах, имел массу около 20 т. В Чили нашли пластину серебра массой 1420 кг.

*Аргентит (серебряный блеск)*  $\text{Ag}_2\text{S}$  (содержание Ag 87,1 %), кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов кубический, октаэдрический, додекаэдрический, цвет

свинцово-серый до железно-черного, черта серая со слабым блеском, твердость 2–2,5, плотность 7,2–7,4 г/см<sup>3</sup>, излом раковистый, спайность несовершенная. Встречается в гидротермальных низкотемпературных свинцово-цинковых и серебряных месторождениях.

*Пираргирит (сурьмяное серебро)*  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$  (Ag 59,8 %) кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы призматические, цвет черный до темно-серого, черта темно-пурпурно-красная, блеск алмазный, твердость 2–2,5, плотность 5,7–5,8 г/см<sup>3</sup>, излом раковистый.

*Прустит* ( $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ ) (Ag 65,4 %) (по фамилии Пруст) кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы призматические, часто ромбические или скаленоэдрические, агрегаты зернистые. Цвет минерала ярко-красный, черта кирпичная до ярко-красный, блеск алмазный, твердость 2–2,5, плотность 5,5–5,7 г/см<sup>3</sup>, излом раковистым до неровного, хрупкий, полупрозрачный.

*Полибазит* ( $\text{Ag,Cu}_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ ) (Ag 62,1–84,9 %) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы таблитчатые, агрегаты зернистые и листоватые, цвет железно-черный (в тонких осколках темно-красный), черта черная, блеск металлический, алмазовидный, твердость 2–3, плотность 6,2–6,3 г/см<sup>3</sup>, спайность несовершенная.

*Стефанит*  $\text{Ag}_5\text{SbS}_4$  (Ag 68,3 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов короткопризматический, таблитчатый, пирамидальный, цвет сероватый до железно-черного, черта железно-черная, блеск металлический, твердость 2,5–2, плотность 6,2–6,3 г/см<sup>3</sup>, излом неровный до полураковистого.

*Кераргирит (хлораргирит)*  $\text{AgCl}$  (Ag 75,3%) кристаллизуется в кубической сингонии, кристаллы кубические, агрегаты зернистые, корочки, восковидные пленки. Цвет сероватый, желтоватый, блеск смоляной до алмазного, твердость 1–1,5, плотность 5,55 г/см<sup>3</sup>. Встречается в зоне окисления серебряных месторождений в засушливых районах.

## Применение в промышленности

Серебро широко используется как в металлическом состоянии, так и в виде различных соединений. Области применения чистого серебра весьма разнообразны. Для прида-

ния ему большей твердости и крепости, повышения сопротивления изнашиваемости применяют сплавы серебра с различными металлами.

Значительная часть серебра используется в производстве серебряных и посеребренных изделий, а также при чеканке монет и медалей. Оно находит применение в фото- и кинопромышленности для получения светочувствительных эмульсий, в химической промышленности для изготовления лабораторных принадлежностей (тиглей, проволоки и т. д.). Азотнокислое серебро (ляпис) и коллоидные растворы серебра применяются в медицине как бактерицидные средства. Серебро широко используется в ракетостроении и самолетостроении, в производстве управляемых снарядов и ракет, для атомных установок, электронного оборудования, для изготовления серебро-кадмиевых батарей и т. д.

## **Ресурсы и запасы**

Мировые ресурсы серебра оцениваются в 1,3–1,4 млн. т. Общие запасы серебра в мире (без России) на начало 1997 г. составляли 798,8 тыс. т, а подтвержденные — 523,3 тыс. т. К основным странам-держателям запасов серебра принадлежат Польша, США, Канада, Мексика, Австралия, Казахстан, Таджикистан, Перу и Боливия (табл. 11). В недрах этих стран сконцентрировано 63,5 % мировых (без России) подтвержденных запасов.

В России основные запасы серебра сосредоточены в серебросодержащих комплексных рудах месторождений цветных металлов и золота (73 %). Собственно серебряные месторождения заключают в себе 27 % запасов.

## **Добыча и производство**

Преобладающую часть серебра в мире извлекают попутно при разработке комплексных серебросодержащих руд. При переделе руд цветных металлов получают около 70 %, при переработке руд золото-серебряных месторождений около 10–15 %, а из руд собственно серебряных месторождений — 15–20 % этого металла. Содержание Ag в рудах цветных металлов обычно составляет 10–100 г/т, в золо-

Таблица 11

## Запасы серебра в некоторых странах на (в т)

Страна, часть света	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание в рудах, г/т
<b>ЕВРОПА</b>	156700	114090	21,8	...
Испания	15000	14000	2,7	40
Польша	81000	66000	12,6	50
Португалия	8000	6500	1,2	40
Швеция	10000	9000	1,7	180
<b>АЗИЯ</b>	194100	136500	26,1	...
Индия	9000	8000	1,5	120
Индонезия	7200	6500	1,2	30
Иран	14600	6500	1,2	300
Казахстан	38000	29000	5,5	80
Китай	10000	6000	1,1	300
Монголия	9000	6000	1,1	150
Таджикистан	32000	24000	4,6	80
Турция	7000	5500	1,1	200
Узбекистан	22900	10000	1,9	190
Япония	17500	16000	3,1	150
<b>АФРИКА</b>	53600	27900	5,3	...
Марокко	9000	8000	1,5	250
ЮАР	31000	13000	2,5	100
<b>АМЕРИКА</b>	339000	207430	39,6	...
Аргентина	15800	8900	1,7	240
Боливия	47400	20900	4	180
Канада	58270	40000	7,6	400
Мексика	58530	38600	7,4	320
Перу	39120	22960	4,4	140
США	82500	52200	10	190
Чили	21000	16000	3,1	100
<b>ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ</b>	55400	37360	7,1	...
Австралия	47500	30860	5,9	190
Папуа-Нов. Гвинея	6600	5600	1,1	50

то-серебряных – 200–1000 г/т, а в рудах собственно серебряных месторождений 900–2000 г/т, иногда и более.

За всю историю добычи серебра, по 1975 г. включительно, из земных недр было извлечено 650 тыс. т этого металла. В 1995 г. производство серебра в концентратах составило

14,5 тыс. т. Основными продуцентами серебра в мире являются Мексика, Перу, США, Канада, Польша, Чили, Австралия, Китай, Казахстан и Боливия. Доля этих 10 стран в мировом производстве серебра в концентратах составила около 77 %. В 1996 г. было произведено серебра в концентратах (тыс. т): в Мексике – 2,5, Перу – 2,0, США – 1,6, Канаде – 1,2, в то время как в России всего лишь 250 т. В Польше, добывающей почти 60 % европейского серебра основным производителем его является компания «*KGHM Polska Miedz*», эксплуатирующая горно-технический комплекс Легница-Глогов, где добывается медь, а благородные металлы извлекаются попутно. Ведущими компаниями по производству серебра в мире являются: «*Pecoles*» (Мексика), «*KGHM Polska Miedz*» (Польша), «*Centromin*» (Перу), «*Noranda*» (Канада), «*Cominco*» (Канада) и «*MIM Holding*» (Австралия).

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Основная масса серебросодержащих гидротермальных месторождений цветных металлов возникла в связи с формациями малых гипабиссальных интрузий, внедрившихся на поздней стадии геосинклинального этапа, а преобладающая часть золото-серебряных и собственно серебряных месторождений принадлежит вулканогенной формации этой же стадии развития геосинклиналей. На платформенном этапе оруденение развивалось в зонах активизации, преимущественно в платформенных образованиях над породами фундамента, разбитыми глубинными разломами. В этом случае возникали пластообразные и секущие рудные тела, верхняя часть которых формировалась в интервале глубин 500–700 м от бывшей поверхности.

Поскольку серебросодержащие месторождения входят в широкий круг гидротермальных месторождений цветных металлов, им свойственны соответствующие эпохи рудообразования. В *докембрийскую эпоху рудообразования* сформировались крупные месторождения полиметаллических руд в Австралии (Брокен-Хилл, Мак-Артур-Ривер и Маунт-Айза), в которых наряду со свинцом и цинком содержится серебро (до 447 г/т). Добыча серебра на каждом из этих месторождений составляет 200–250 т ежегодно. В Ка-

наде в провинции Онтарио известно свинцово-цинковое месторождение Кидд-Крик, в рудах которого содержание серебра достигает 100–150 г/т.

В *раннепалеозойскую эпоху* рудообразования серебро также было тесно связано с полиметаллическими рудами. Крупные промышленные месторождения этого возраста встречаются редко. В Мьянме (Бирме) известно месторождение Боудвин. Руды отличаются комплексным составом и высоким содержанием металлов (Pb 14,8 %, Zn 8,2 %, Cu 1,0 % и Ag 490 г/т). В России раннепалеозойский возраст имеют полиметаллические месторождения Салаирского и Урского районов в Западной Сибири.

В *позднепалеозойскую эпоху* рудообразования сформировался ряд полиметаллических серебряносодержащих месторождений, расположенных в основном в США и Канаде. Из них наиболее крупным является месторождение Пайн-Пойнт, разведанное близ Большого Невольничьего озера. Месторождения такого типа имеются в Ирландии (Тайнах, содержание в свинцово-цинковых рудах Ag составляет около 100 г/т), Испании (Линарис и Ла Каролина, с содержанием в рудах Ag до 300 г/т).

*Мезозойская эпоха* рудообразования ознаменовалась образованием крупных метасоматических свинцово-цинковых месторождений в Польше. Здесь по масштабам оруденения особенно выделяется Бытомская впадина. В рудах кроме свинца и цинка содержится 10–20 г/т серебра. Свинцово-цинковые месторождения этого возраста имеются в Испании (Райбл, Реосин и др.). В России в эту эпоху сформировались месторождения полиметаллических серебряносодержащих руд на Дальнем Востоке и в Забайкалье.

*Кайнозойская эпоха* рудообразования — выдающаяся для месторождений серебряносодержащих и серебряных руд. Характерно появление собственно серебряных вулканогенных гидротермальных месторождений, связанных с вулканическими формациями поздних стадий геологического развития геосинклиналей. Особенно продуктивными являются американское и азиатское звенья Тихоокеанского пояса. В США и Канаде большинство месторождений расположено в Кордильерах (рис. 48). В Мексике серебро является постоянным компонентом свинцово-цинковых руд. Содержание серебра в полиметаллических рудах достигает 300–350 г/т, а на месторождениях собственно серебряных



Рис. 48. Вулканические пояса Америки:  
 1 — геосинклинально-складчатый пояс Кордильер и Анд; 2 — вулкани-  
 ческие пояса

руд обычно составляет 170–550 г/т. Многочисленные месторождения полиметаллических руд имеются в Перу. По качеству они, примерно такие же, как и в Мексике.

### Генетические типы промышленных месторождений

Среди собственно серебряных месторождений выделяются: плутоногенные гидротермальные и вулканогенные гидротермальные.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения* не имеют широкого распространения. Они представлены, как правило, комплексными рудами, содержащими высокие концентрации серебра. Представителем месторождений

этого типа является *Мангазейское месторождение*. Оно расположено в Верхоянском рудном районе. Территория этого района сложена песчаниками и сланцами верхнего карбона и перми, смятыми в складки и прорванными штоками и дайками гранитов и кварцевых порфиров мелового возраста, с которыми связано рудообразование. Руды месторождения образовались в два этапа. На раннем этапе возникли маломощные прожилки кварца с галенитом, сфалеритом и тетраэдритом. На позднем этапе, распадающемся на шесть стадий, сформировался обширный комплекс серебросодержащих минералов: штернбергит  $\text{AgFeS}_3$ , фрейбергит  $(\text{Cu,Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}$ , 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  $\text{AgSbS}_3$ , пираргирит  $\text{Ag}_3\text{SbS}_3$ , самородное серебро и др.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* сосредоточены в вулканических поясах и тяготеют к поперечным разломам, грабенам основания, стыкам вулканических поднятий и компенсационных прогибов. Рудные тела этих месторождений приурочены к вулканическим структурам — жерлам вулканов, коническим, кольцевым и радиальным структурам. Месторождения формировались на небольших глубинах — от нескольких десятков—сотен метров до первых километров в условиях резкого спада температуры и давления при быстро возрастающем кислородном потенциале.

В зависимости от состава среди вулканогенных гидротермальных месторождений выделяются четыре главные рудные формации: 1) *серебро-оловянная*; 2) *серебро-золотая*; 3) *серебро-сульфидная*; 4) *серебро-арсенидная*.

*Месторождения серебро-оловянной формации* широко распространены в оловянном поясе Боливии. Среди них по экономической значимости выделяется *месторождение Потоси*. Месторождение сложено вулканическими породами позднемелового—третичного возраста, залегающих на дислоцированных ордовикских песчаниках и сланцах. Вулканические породы представлены игнимбритами, туфами и лавами андезитового, дацитового и риолитового состава общей мощностью около 1500 м. Они прорваны средне- и поздне третичными субвулканическими штоками диоритовых порфиров и риолитов. Рудные жилы сосредоточены вокруг штока порфиров, но прослеживаются также в прорываемые им вулканические и песчано-сланцевые породы

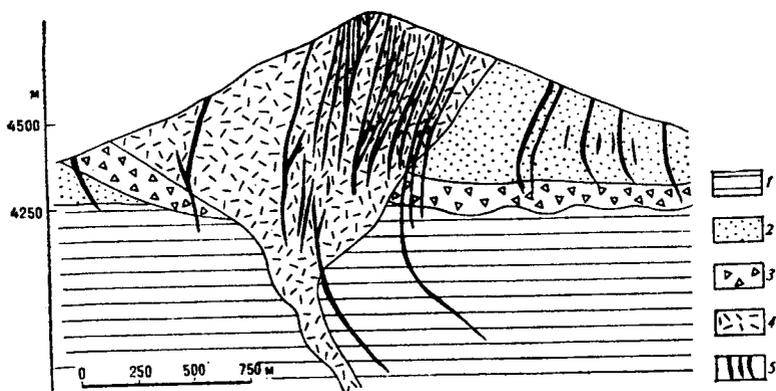


Рис. 49. Геологический разрез месторождения Потоси, Боливия (по Х. Мурильо):  
 1 — сланцы ордовика; 2 — вулканогенно-осадочные породы третичного возраста; 3 — вулканические брекчии (игнимбриты); 4 — риолито-дациты, андезито-дациты; 5 — рудные жилы

палеозойского основания (рис. 49). Система рудных жил развита на площади около 1 км<sup>2</sup>. Рудные тела представлены отдельными жилами, пучками жил или отдельными зонами линейных прожилков. Длина их колеблется от нескольких десятков до 350 м, мощность от 2–5 см до 1 м. Жилы прослеживаются до глубины 800–900 м, но богатые руды развиты до глубины 350 м.

Рудообразование развивалось в пять стадий. На первой стадии выделялись кварц, касситерит, вольфрамит, арсенипирит, висмутин, пирротин, на второй — халькопирит и станнин, на третьей — сфалерит, тетраэдрит, андорит (AgPbSb<sub>3</sub>S<sub>6</sub>) и матильдит (AgBiS<sub>2</sub>), на четвертой — пираргирит, джемсонит, буланжерит, сфалерит, галенит, а на пятой — формировались прожилки алунита. Процесс рудообразования начинался при температуре 500–400 °С, а завершился при температуре 150–100 °С.

За время разработки месторождения с 1544 г. добыто более 35 тыс. т серебра. Концентрация Ag в рудах варьирует от 300 до 3000 г/т, среднее содержание Sn 4 %.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЛАТИНЫ И МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

### Краткие исторические сведения

В группу платины входят шесть металлов: платина Pt, палладий Pd, осмий Os, иридий Ir, рутений Ru и родий Rh. Платина впервые была обнаружена в середине XVII в. в золотоносных россыпях Колумбии и считалась испанцами бесполезной и даже вредной примесью, обесценивающей золото. Если испанское слово «плата» означает «серебро», то «платина» — презрительное «серебришко». Из Америки с берегов реки Платино дель Пинто в Испанию вместе с золотом завозилась платина, которая фальшивомонетчиками подмешивалась к золоту. Поэтому король Испании в 1735 г. издал указ, по которому платину впредь запрещалось ввозить в страну. Встретившуюся при разработках золота платину повелевалось топить в глубоких частях реки Платино дель Пинто.

Первое научное описание платины выполнено Уатсоном в 1741 г. В ее составе были обнаружены остальные платиноиды: палладий и родий — английским ученым У. Волластоном в 1803 г., иридий и осмий — английским химиком К. Клаусом в 1844 г. В начале XX в. платина была найдена на Урале. В 1844 г. казанским химиком К. Клянусом был открыт рутений, который был назван в честь России (по латыни *Ruthenia*). Вплоть до 1827 г. платина существовала в форме никому не нужного порошка, пока петербургские инженеры П. Г. Соболевский и В. В. Любарский впервые в мире изобрели способ порошковой металлургии.

Платина — один из самых тяжелых металлов (плотность ее 21,45 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1769 °С, что на 231 °С выше, чем у железа).

## Геохимия

Платина и металлы ее группы встречаются в природе в рассеянном состоянии. Кларки их, по Ноддаку, следующие: Ru  $5 \cdot 10^{-6}$  %, Rh  $1 \cdot 10^{-6}$  %, Pd  $5 \cdot 10^{-6}$  %, Os  $5 \cdot 10^{-6}$  %, Ir  $2 \cdot 10^{-6}$  %, Pt  $5 \cdot 10^{-6}$  %. Платиноиды являются типичными продуктами базальтовой магмы и накапливаются в процессе ликвации и кристаллизационной дифференциации ультраосновных и основных магм. Изредка встречаются постмагматические скарновые и гидротермальные месторождения платиноидов. В экзогенных условиях платиноиды устойчивы к химическому выветриванию и, как правило, образуют россыпи, среди которых основное значение имеют аллювиальные.

## Минералогия

В настоящее время известно около 50 минералов платиновой группы. Платина, иридий и палладий в горных породах и месторождениях встречаются как в самородном виде, так и в виде твердых растворов и интерметаллических соединений с Fe, Ni, Cu, Sn, реже с Au, Os, Pb, Zn, Ag. Наиболее широко распространены поликсен, ферроплатина, палладистая платина, станнопалладинит, гиверсит и звягинцевит.

*Поликсен* Pt,Fe (содержание Pt 80–88 %, Fe 9–11 %) кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов кубический, цвет стально-серый, блеск металлический, твердость 4–4,5, плотность 15–19 г/см<sup>3</sup>.

*Ферроплатина* – разновидность поликсена, содержащая Fe 15–19 % и Cu до 3 %.

*Станнопалладинит* Pd<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>Cu (Pd 40–45 %, Sn 28–33 %) кристаллизуется в кубической сингонии.

*Звягинцевит* (Pd,Pt)<sub>3</sub> · (Pb,Sn) (по фамилии Звягинцев) кристаллизуется в кубической сингонии, блеск металлический, встречается в медно-никелевых рудах в ассоциации с ферроплатиной.

Осмий, рутений и родий образуют твердые растворы. К ним относятся такие минералы, как невянскит, сысерскит, родиевый невянскит.

*Невьянским* Ir, Os (Ir 45–70 %, Os 30–49 %) – разновидность осмистого иридия (синоним: иридосмин).

*Сысерским* Os, Ir (Os 67,9 %, Ir 17 %, Ru 8,9 %, Rh 4,5) – разновидность осмистого иридия.

Кроме того, в природе известны арсениды, сульфоарсениды и сульфиды платины, рутения и палладия. Среди них наиболее часто встречаются: сперрилит, куперит, вуссоцит, брэггит и холлингвортит.

*Сперрилит* PtAs<sub>2</sub> (Pt 56,5 %) (по фамилии Сперри) кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов кубический, цвет оловянно-белый, блеск металлический, твердость 6–7, плотность 10,58 г/см<sup>3</sup>. Встречается в медно-никелевых месторождениях в ассоциации с пирротинном, пентландитом и халькопиритом.

*Куперит* PtS (Pt 79,2–85,9 %) (по фамилии Купер) кристаллизуется в тетрагональной сингонии, габитус кристаллов призматический, цвет стально-серый, блеск металлический, твердость 4,5, плотность 8,4 г/см<sup>3</sup>. Встречается в медно-никелевых рудах в ассоциации с миллеритом, никельпиритом, халькопиритом, линнеитом.

*Брэггит* (Pt, Pd, Ni)S (Pt 32–58 %, Pd 17–38 %) кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы округлые и удлиненные, цвет серебристо-белый, блеск металлический, плотность 8,9–10 г/см<sup>3</sup>. Встречается в сульфидных медно-никелевых месторождениях.

## Применение в промышленности

Металлы платиновой группы обладают высокой огнеупорностью, хорошей электропроводностью, химической стойкостью и способностью поглощать газы (кислород, водород). Платиноиды употребляются в качестве катализаторов в химической промышленности, при получении кислот, производстве бензина с высоким октановым числом, витаминов, антибиотиков, а также для изготовления химической посуды и отдельных частей аппаратуры для химических заводов. В электротехнике платина и металлы ее группы применяются для изготовления нагревательных обмоток электрических печей и приборов, служащих для измерения высоких температур (термометры сопротивления, термопары и т. п.). Платино-иридиевые сплавы

(Pt 90 %, Ir 10 %) используются для изготовления международных эталонов массы (килограмм) и мер длины (1 метр). В настоящее время платиноиды находят применение в автомобильной промышленности (фильтры нейтрализаторов выхлопных газов, свечи зажигания и т. п.). Платина и ее сплавы традиционно применяются в ювелирном деле.

## **Ресурсы и запасы**

По данным ГНПП «Аэрогеология» *Министерства природных ресурсов РФ* прогнозные ресурсы металлов платиновой группы (МПГ) оцениваются в мире в 40–50 тыс. т. Основная часть их (более 90 %) заключена в недрах 5 стран (ЮАР, США, Россия, Зимбабве и Китай).

Запасы платиноидов известны в 14 странах мира. По состоянию на начало 1997 г. запасы подтвержденные составляют: МПГ 51,8 тыс. т, платины 24,8 тыс. т. Доля запасов платиноидов ЮАР достигает 96,4 % (без России), платины – 96,3 %. Три страны, занимающие 2–4 места в мире (без России): Канада, Зимбабве и США – располагают 1240 т запасов МПГ (2,4 % мировых) и около 540 т платины (2,2 %). По данным *Геологической службы США* запасы платиноидов в России составляют 5,9 тыс. т. Около 69 % подтвержденных запасов МПГ мира (включая Россию) сосредоточено в собственно пластовых месторождениях, локализованных в расслоенных интрузивных комплексах хромитсодержащих основных-ультраосновных пород (рифы Меренского и Ю-Джи-2 в Бушвельдском массиве ЮАР, Стиллуотер США и Лак-дез-Иль в Канаде).

## **Добыча и производство**

Чисто платиновые руды обрабатываются при содержании Pt 2–5 г/т, а россыпи – при 0,1–0,5 г в 1 м<sup>3</sup> песка. Для извлечения платиноидов из комплексных руд (медно-никелевых и др.) промышленный интерес представляют содержания 0,2–0,4 г/т.

В настоящее время добыча платиноидов осуществляется в 10 странах, включая Россию. Кроме того, в Японии при переработке импортируемых из других стран руд и

концентратов меди и хромитов попутно извлекают платину и металлы ее группы. В 1995 г. в мире было получено МПГ 268 т и платины 134,4 т. Основными странами-производителями данной продукции являются ЮАР, Россия и Канада. Доля ЮАР в мировой добыче (с учетом России) МПГ составляет 61,7 %, платины – 77,2 %. В стране действуют 11 горнодобывающих предприятий, включая 2 карьера на рудниках Пандора (юго-западный сектор Бушвельдского района) и Сандслут (северный сектор). Добыча МПГ и платины осуществляется рядом крупных компаний («*Aquarius Platinum*», «*Potgietersrust Platinum*», «*Impala Platinum*» и др.), которые объединены в группы «*Amplats*», «*Lonrho*» и «*Gencor*».

В России добыча платиноидов составляет 70–80 т. Добыча их осуществляется на медно-никелевых рудниках Норильско-Талнахского района, Печенги и Мончегорска, отчасти на Урале. В незначительных количествах платину извлекают из россыпей Корякского нагорья на Камчатке, а также на месторождении Кондер в Хабаровском крае.

## Металлогения и эпохи рудообразования

В общем цикле геологического развития месторождения платиноидов формировались дважды: 1) на ранней стадии геосинклинального этапа в тесной связи с дунитами, когда возникали магматические месторождения хромшпинелидов, содержащие платину и палладий; 2) в процессе активизации платформ, когда формировались сульфидные медно-никелевые месторождения, содержащие палладий и платину, а также ранне- и позднемагматические залежи платиноносных хромитов в стратифицированных норитовых массивах (типа Рифа Меренского Бушвельдского комплекса ЮАР).

Образование месторождений платиноидов происходило в архее, протерозое, палеозое, мезозое и кайнозое. В истории развития Земли отчетливо выделяется *докембрийская эпоха*, в которую возникли самые крупные в мире концентрации платиноидов (ЮАР, Зимбабве, Канада, Австралия, Россия и др.). В ЮАР месторождения платиноидов связаны с ультраосновными породами Бушвельдского интрузивного комплекса. Они встречаются в виде куперита, брэггита, ферроплатины и сперрилита. В Зим-

бабве коренные месторождения платиноидов приурочены к ультраосновным породам Великой Дайки. Платиноиды содержатся в так называемом сульфидном слое, перекрытом полевошпатовым норитом. Мощность его колеблется от 1,0–1,5 до 3 м. Платина заключена главным образом в тонко распыленном сперрилите, и поэтому руды трудно-обогатимы. В Канаде запасы платиноидов почти целиком заключены в сульфидных медно-никелевых рудах месторождений Садбери, где они присутствуют в качестве изоморфной примеси в сульфидах меди, никеля и железа и реже в виде сперрилита. В провинции Онтарио в середине 1970-х годов выявлено крупное медно-никелевое месторождение Лак-дез-Иль. В Западной Австралии известен ряд месторождений сульфидно-никелевых руд (Камбалда, Непиан, Виндерра, Скотиа и др.). Они приурочены главным образом к ультраосновным породам зеленокаменных поясов докембрийского щита Йилгари. Среднее содержание металлов в рудах составляет (г/т): Pt 0,24–0,42, Pd 0,29–0,56, Ir 0,06, Au 0,11–0,36 при содержании Cu 0,15–0,28 %, Ni 1,86–3,73 % и Co 0,05–0,08 %.

В *кайнозойскую эпоху* формировались в основном россыпные месторождения платины и металлов платиновой группы. Наиболее широко они распространены в Колумбии на побережье Тихого океана и на западных склонах Кордильер. Содержание платиноидов на богатых участках россыпей достигает 15 г/м<sup>3</sup>. В Эфиопии известны небольшие золото-платиновые элювиальные россыпи, связанные с латеритными образованиями на поверхности дунитов, в которых содержание платиноидов колеблется от 0,7 до 2,2 г/т. Промышленные платиновые россыпи выявлены в Канаде, США (на Аляске), ЮАР, Японии и Австралии.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Выделяются четыре группы промышленных месторождений: 1) ликвационные, 2) раннемагматические, 3) позднемагматические, 4) россыпные.

*Ликвационные месторождения* имеют важное экономическое значение в мировой добыче платиноидов. В сульфидных медно-никелевых рудах они образуют ценные примеси, которые извлекаются при получении никеля и меди.

Наиболее характерными представителями этой группы являются месторождения Норильского района (Россия) и Садбери (Канада), которые охарактеризованы в главе 6 «Месторождения никеля». Содержание платиноидов в рудах варьирует от 0,01 до 10–20 г/т. В Канаде наиболее обогащены платиной руды на руднике Фруд, для которых характерно высокое содержание меди. Здесь отмечается увеличение концентраций платиноидов с глубиной (от 50 до 20 г/т). Они представлены сперрилитом, фрудитом, майченеритом, а также присутствуют в виде изоморфной примеси, в сульфидах меди, никеля и железа.

Для месторождений Норильского района характерно увеличение числа платиновых минералов по мере возрастания в рудах содержания халькопирита и кубанита. Установлено, что платиновые минералы выделялись позднее пирротина, пентландита и халькопирита из остаточных расплавов, обогащенных летучими компонентами. Особенностью состава платиновых минералов является сочетание в них металлов платиновой группы с оловом, свинцом, мышьяком и висмутом. В рудах широко развиты минералы палладия (высоцкит, звягинцевит, а также твердые растворы Pd, Pt, Pb, Sn). Из платиновых минералов наиболее широко распространены ферроплатина, самородная платина и сперрилит.

*Раннемагматические месторождения* пространственно связаны с дунитами гипербазитовых серий. Концентрации платиноидов в месторождениях этого типа обычно не достигают промышленных концентраций. Исключением являются крупные месторождения платиноидов Рифа Меренского Бушвельдского массива ЮАР, которые описаны при характеристике месторождений хрома. В нижней части рифа Меренского залегает рудный прослой мощностью 20–45 см, сложенный гарцбургитом с ромбическим пироксенном, битовнитом, биотитом, хромитом, магнетитом, сопровождающимися участками вкрапленников пирротина, пентландита, халькопирита, кубанита, миллерита, валериита и никелистого пирита. Минералы платиновой группы представлены ферроплатиной, брэггитом, куперитом, сперрилитом, лауритом, меренкскитом, бисмотеллуридами платины и палладия. В платиновых минералах, а также в стибиопалладините содержатся Pd, Os, Ir, Rh, частично Au и Ag. В хромитах все эти минералы отсутствуют, а платина представлена в самородном виде. Содержание пла-

тиноидов в руде в целом высокое (от 3 до 18 г/т). Наиболее богатые по содержанию платины месторождения известны близ Рюстенбурга, где они отрабатываются в пределах полосы протяженностью 12 км. Основной платиновый минерал здесь ферроплатина, ассоциирующая с хромитом. На некоторых участках наблюдаются усложнения пластообразных рудных залежей, вызванные развитием куполов и столбообразных тел.

*Позднемагматические (гистеромагматические) месторождения* широко распространены на Урале и связаны с дунитами, пироксенитами, реже перидотитами. Здесь выделяется платиновый пояс, фиксируемый цепью среднепалеозойских раннегеосинклинальных гипербазитов, контролируемых глубинным разломом. Наиболее крупным является *Нижне-Тагильский массив* (рис. 50). Его центральная



Рис. 50. Схема геологического строения Нижне-Тагильского платинового массива (по материалам Н. Высоцкого):

1 — дуниты со скоплениями хромшпинелидов и платиноидов; 2 — аподунитовые серпентиниты; 3 — пироксениты; 4 — габбро; 5 — апогаббровые амфиболиты; 6 — слюдяные сланцы; 7 — кристаллические сланцы; 8 — известняки

часть сложена платиноносными дунитами, местами серпентинизированными; ее окаймляет полоса пироксенитов, сменяемая зоной габбро. Платиноиды представлены в двух формах: 1) в виде вкрапленности и 2) в форме гнезд и трубчатых тел. Убогая вкрапленность наблюдается по всему полю дунитов: содержание платины, по данным Н. К. Высоцкого, колеблется от 0,0027 до 0,095 г/т. В хромитовых скоплениях, представленных гнездами и трубообразными рудными телами, наблюдается повышенное содержание платины. Хромиты, ассоциирующиеся с платиной, характеризуются развитием своеобразных текстур, приближающихся к петельчатым, пятнистым и брекчиевым. Среди платиноидов преобладают поликсен и иридий, реже встречаются платинистый иридий, осмистый иридий, стибнопалладинит, лаурит. По мнению А. Г. Бетехтина, платиноносные хромиты Урала относятся к типу гистеромагматических образований.

В районе Лиденбурга в ЮАР также имеются позднемагматические месторождения платины и металлов платиновой группы. Здесь известны крутопадающие трубообразные залежи платиноносных гортонолитовых дунитов (рис. 51). Самородная платина в виде мелких кубических кристаллов и неправильных зерен образует различной гус-

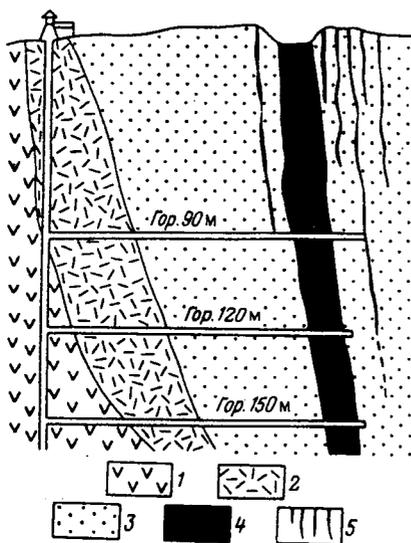


Рис. 51. Платиноносное трубообразное рудное тело Мойхук в Южной Африке (по Ф. Вагнеру): 1 — нориты; 2 — пироксениты; 3 — оливиновые дуниты; 4 — рудное тело; 5 — дайки гортонолитового дунита

тоты вкрапленность. Диаметр таких залежей обычно не превышает 20 м, длина их по падению достигает 300 м. В состав руд входят железистый оливин, в подчиненном количестве флогопит, роговая обманка, диаллаг, ильменит, магнетит, хромит и платиноиды. Содержание платины подвержено значительным колебаниям. В добываемых рудах оно достигает 30 г/т и более.

*Россыпные месторождения* известны в России, США, Колумбии, Зимбабве, Эфиопии и других странах. Среди платиновых россыпей различают элювиальные, делювиальные и аллювиальные. Основное промышленное значение имеют позднечетвертичные аллювиальные россыпи. Они нередко вытянуты по долинам рек на несколько километров, иногда даже на десятки километров. Россыпи сформировались в основном при разрушении платиновых массивов пород габбро-пироксенит-дунитовой формации, содержащей, как правило, убогое оруденение.

Большую роль при образовании россыпей играет характер поверхности плотика (трещиноватость, ориентировка сланцеватости, наличие карманов). Часто зерна платины скапливаются по трещинам в коренных породах. Общая мощность русловых наносов колеблется от 0,5–1,0 до 5,0 м и более. Обогащенные участки обычно располагаются в виде кривых линий — струй, ориентированных по направлению бывших речных русел.

В состав платиноидов россыпных месторождений чаще всего входят поликсен, самородная платина, ферроплатина, купроплатина, иридийная платина, невянскит, рутеневый невянскит, платиновое золото.

Россыпные месторождения платины имели важное экономическое значение до 20-х годов XX века. В настоящее время их роль в запасах и добыче платины резко снизилась и основным поставщиком платиноидов стали коренные магматические месторождения. Тем не менее, месторождения данного генетического типа разрабатываются в США на Аляске (район бухты Гудньюс, Кварц-Крик, Дайм-Крик), Колумбии (на побережье Тихого океана), Зимбабве, Заире (район оз. Эдвард) и в некоторых других странах.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ

К природным радиоактивным элементам принадлежат уран, торий и радий. Среди них основное экономическое значение имеет уран.

### Краткие исторические сведения

Уран как химический элемент был открыт в 1798 г. немецким химиком М. Клапротом в урановой смолке из месторождений Саксонии. Он не привлекал к себе внимания и не находил практического применения до конца XIX в., когда французским физиком А. Беккерелем была установлена радиоактивность урановых соединений (1896 г.), и вслед за этим М. Кюри и П. Кюри были выделены новые радиоактивные элементы – радий и полоний. До 1914 г. уран применялся для стекольного производства и получения красок. Начиная с 1914 г. из урановых руд стали извлекать радий. В 1939 г. Д. Даннингом было доказано самопроизвольное деление ядер радиоактивных элементов, открывшее в 1942 г. путь для их использования в качестве мощного источника ядерной энергии.

Уран – мягкий блестящий серебристый металл с плотностью около  $19 \text{ г/см}^3$  и температурой плавления  $1138 \text{ }^\circ\text{C}$ , химически активный и легко окисляющийся на воздухе.

Торий был открыт в 1828 г. И. Берцелиусом в минерале, найденном при изучении сиенитов в Норвегии и называемом в настоящее время торитом. Торий – мягкий серебристо-белый металл (в свежем срезе), температура плавления его  $1700 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура кипения  $3000\text{--}4000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Геохимия

Известно три природных изотопа урана:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Естественный распад  $^{238}\text{U}$  создает (семейство урана)

из протактиния, тория, радия, радона, астата, полония, висмута, ртути, таллия, заканчивающегося накоплением стабильного изотопа  $^{206}\text{Pb}$ . Ряд  $^{235}\text{U}$  (семейство актиния) состоит из протактиния, тория, актиния, радия, франция, радона, астата, полония, висмута, гелия и завершается выделением стабильного изотопа  $^{207}\text{Pb}$ .

По А. П. Виноградову, кларк урана в земной коре  $2,5 \cdot 10^{-4} \%$ . При этом наблюдается отчетливое его увеличение от ультраосновных к основным и кислым породам: кларк ультраосновных пород  $3 \cdot 10^{-7} \%$ , основных  $5 \cdot 10^{-5} \%$  и кислых  $3,5 \cdot 10^{-4} \%$ . В гранитоидах примерно 50 % урана связано с аксессуарными минералами, от 3 до 15 % входит в состав породообразующих минералов и около 35 % находится в субмикровключениях и межзерновых швах. Повышенные концентрации урана наблюдаются в темных глинистых сланцах, битуминозных образованиях, фосфоритах и других породах с высоким содержанием органики.

В природных условиях уран находится в четырех- и шестивалентной форме (в лабораторных условиях получен также двух-, трех- и пятивалентный уран). Важным свойством его является химическое сродство к кислороду, с которым образует различные соединения. Наиболее распространен ион четырехвалентного урана, устойчивый в восстановительной обстановке. При экзогенных процессах такие условия часто создаются в присутствии органического вещества. Четырехвалентный уран характеризуется большим размером ионного радиуса 0,097 нм и при эндогенных процессах образует простые оксиды, а также сложные соединения с Fe, Ti, Th и др. Для высокотемпературных месторождений наиболее часта ассоциация урана и тория. Вследствие близости ионных радиусов четырехвалентного урана (0,097 нм) и кальция (0,099 нм) четырехвалентный уран часто присутствует в таких кальцийсодержащих минералах, как сфен и апатит. Шестивалентный уран обычно представлен ионом уранила  $\text{UO}_2^{2+}$ , образующим с кислотами соли, а с водой — соединения  $[\text{U}(\text{OH})_4]^{2+}$  желтого цвета. Важной геохимической особенностью урана является его способность легко восстанавливаться из шестивалентного и четырехвалентного состояния.

Торий представляет собой первый член семейства актиноидов с длительным периодом полураспада —  $1,39 \cdot 10^{10}$  лет. В природе он представлен практически одним изотопом

$^{232}\text{Th}$ . Его общий кларк в земной коре  $1,5 \cdot 10^{-3}$  %. Отмечается заметное нарастание среднего содержания тория от ультраосновных пород к гранитоидам. В водных растворах торий известен лишь с валентностью ( $\text{Th}^{4+}$ ).

## Минералогия

Общее число минералов урана превышает 150. Наибольшее практическое значение имеет уранинит (настуран, урановая смолка) и его аморфная разновидность — урановая чернь. Объектами разработки являются также руды, в состав которых входят браннерит, давидит, ураноторит, уранофан, коффинит, отенит, торбернит, цейнерит, карнотит и др.

*Уранинит*  $(\text{U,Th})\text{O}_2$  (содержание U до 88 %). Обычно часть  $\text{U}^{4+}$  окислена до  $\text{U}^{6+}$ , постоянна примесь радиогенного Pb, нередко Th и TR. Минерал кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов кубический, октаэдрический или их комбинации, цвет смоляно-черный до зеленовато-черного, черта коричнево-черная, зеленовато-черная, блеск смолистый, полуметаллический, твердость 5–6, плотность 8–10 г/см<sup>3</sup>.

*Браннерит*  $(\text{U,Ca,Th,Y})(\text{Ti,Fe})_2\text{O}_6$  (U 35–38 %) (по фамилии Браннер) кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы призматические, цвет черный, буровато-черный, твердость 4,5, плотность 5,43 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гранитах, пегматитах, аплитах, кварцевых жилах и скарнах.

*Коффинит*  $\text{U}[\text{SiO}_4]$  (U до 61 %) (по фамилии Коффин) кристаллизуется в тетрагональной сингонии, агрегаты тонкозернистые, цвет черный, блеск алмазный, плотность 5,1 г/см<sup>3</sup>.

*Цейнерит*  $\text{Cu}[\text{UO}_2\text{AsO}_4]_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (U до 47 %) (по фамилии Цейнер) из группы урановых слюдок.

*Отенит*  $\text{Ca}[\text{UO}_2\text{PO}_4]_2 \cdot 10\text{--}12\text{H}_2\text{O}$  (U до 60 %). Минерал из группы урановых слюдок, кристаллизуется в тетрагональной сингонии, плотность 3,19 г/см<sup>3</sup>. Встречается в зоне окисления гидротермальных и пегматитовых месторождений, а также в осадочных породах в ассоциации с фосфатами.

Известно около 30 ториевых и торийсодержащих минералов. Главные из них следующие: торианит, торит, брёг-

герит, ураноторит, ферриторит, торогуммит, эшинит, приорит и торийсодержащий монацит.

*Торианит*  $(\text{Th,U})\text{O}_2$  (содержание Th 88 %). Отношение Th:U от 20 до 5. Кристаллизуется в кубической сингонии, кристаллы кубические с мелкими гранями октаэдра, цвет темно-серый до коричневатого-черного и черного, блеск смолистый, полуметаллический, твердость 6,5–7, плотность 8,9–9,9 г/см<sup>3</sup>.

*Торит*  $\text{Th}[\text{SiO}_4]$ . Содержит примеси Fe, U, Pb, Ca, кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы призматические, агрегаты сплошные, цвет черный, бурый, сургучно-красный, блеск стеклянный до смолистого, твердость 4,5–5, плотность 4,0–5,4 г/см<sup>3</sup>.

*Ферриторит*  $(\text{Th,Fe})[\text{SiO}_4]$  – разновидность торита, содержащая примесь Fe до 13 %.

*Ураноторит*  $(\text{Th,U})[\text{SiO}_4]$  – разновидность торита, содержащая примесь U до 17 %.

*Торогуммит*  $(\text{Th,U})[(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4]$ . Отношение Th:U = 2:1. Кристаллизуется в тетрагональной сингонии, агрегаты сплошные, колломорфные, цвет темный буровато-желтый, хрупкий, твердость 3,5–4, плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>. Продукт гидратизации торита и других ториевых минералов. Сильно радиоактивен.

## Применение в промышленности

Общеизвестен переворот в физике, связанный с открытием радиоактивности и вызвавший интерес к урановым рудам, добыча которых началась с 1906 г. Однако в течение почти 40 лет добыча этих руд велась исключительно с целью извлечения из них радия, а уран пытались использовать для легирования сталей и при изготовлении цветных стекол. И лишь только после того, когда теоретически была доказана возможность высвобождения и использования огромного количества энергии, сосредоточенной в ядрах урана, она нашла практическое применение. В 1945 г. США впервые в мире создали оружие массового уничтожения – атомную бомбу.

В 1954 г. в бывшем СССР была построена первая атомная электростанция, за которой последовало сооружение целого ряда энергетических атомных установок (электро-

станции, опреснители и т. п.). Во второй половине XX в. были реализованы программы по сооружению многочисленных атомных станций в Японии, США, Франции, бывшем СССР и других странах. Ядерное топливо используется в морском судоходстве, в том числе для подводных лодок.

Торий применяется в электровакуумной и электроосветительной технике. Диоксид тория, имеющий высокую температуру плавления (3050 °С), используется для изготовления высокоогнеупорных тиглей для плавки тугоплавких металлов (осмия, родия, платины и др.). Сплавы магния и марганца с торием применяют в реактивной авиации и ракетной технике.

## Ресурсы и запасы

Прогнозные ресурсы урана известны в 33 странах и оцениваются в 12 млн. т. Сведения о запасах урана, приводимые в разных источниках информации, весьма противоречивы. По данным ГНПП «Аэрогеология» *Министерства природных ресурсов РФ* общие запасы урана в мире составляют 3,5 млн. т, а запасы подтвержденные 2,5 млн. т. Основные объемы запасов подтвержденных урана сосредоточены в шести странах — Австралии, Казахстане, Канаде, ЮАР, Бразилии и России (табл. 12).

Запасы урана в Австралии в северной части континента связаны с месторождениями, характеризующимися незначительной глубиной залегания рудных тел и высокой концентрацией урана в рудах. На юге страны запасы приурочены к месторождениям брекчиевого геолого-промышленного типа, где среднее содержание урана составляет 0,07 %. Руды здесь залегают на больших глубинах (более 500 м) и являются комплексными (в промышленных количествах присутствуют Cu, Au и Ag).

В Казахстане основные запасы урановых руд сосредоточены на юге страны в месторождениях песчаникового типа. Средние содержания урана в них незначительные (0,03—0,07 %). Месторождения России относятся к жильно-штокверковому типу и расположены в южном Забайкалье на границе России, Китая и Монголии.

Таблица 12

## Запасы урана (тыс. т) в некоторых странах

Часть света, страна	Запасы общие	Запасы подтвержденные	Их % от мира	Среднее содержание урана в рудах, %
Россия	181,5	145	5,72	0,15
ЕВРОПА	149,93	93,84	3,7	...
Украина	62,6	45,6	1,8	0,09
Франция	14,67	13,46	0,53	0,21
АЗИЯ	973,24	576,16	22,73	...
Казахстан	635,12	439,22	17,33	0,07
Монголия	82,6	61,6	2,43	0,16
Узбекистан	105,57	24,63	2,61	0,1
АФРИКА	649,53	488,01	19,26	...
Алжир	26,7	26,0	1,03	0,13
Намбия	246,94	156,12	6,16	0,11
Нигер	71,16	69,96	2,76	0,2
ЮАР	284,4	218,3	8,61	0,03
АМЕРИКА	812,03	609,41	24,05	...
Бразилия	262,2	162	6,39	0,13
Канада	430	331	13,06	7,72
США	110	110	4,34	0,11
ОКЕАНИЯ И АВСТРАЛИЯ	758	622	24,54	...
Австралия	758	622	24,54	0,17

К крупным относятся месторождения с запасами  $U_3O_8$  более 10 тыс. т, к средним — от 1 до 10 тыс. т, к мелким — менее 1 тыс. т.

### Добыча и производство

До 1945 г. в добыче урановых руд последовательно играли ведущую роль Чехословакия, США, Конго (бывшая колония Бельгии), затем Канада. После 1945 г. усиленные поиски урана развернулись во многих регионах мира. Это привело к открытию ряда крупных месторождений во многих странах. Максимальная добыча урана в капиталистических странах была достигнута в конце 1950-х годов и со-

ставляла 40 тыс. т в год. Около 75 % этого количества приходилось на долю США и Канады.

В 1995–2000 гг. производство урановых концентратов составляло 33–37 тыс. т. Абсолютным лидером по их производству в мире является Канада. На ее долю в 1996 г. приходилось 34 % мирового производства, далее со значительным отрывом следуют Австралия (14 %) и Нигер (9,4 %). В число крупных мировых производителей, уровень производства которых превышает 1000 т урана в год, входят также Намибия, Россия, США, Узбекистан, ЮАР и Казахстан.

Лидером в добыче урана является канадская корпорация «*Cameco*», на долю которой приходится 18 % мировой добычи. Она совместно с немецкой «*Uranerz*» владеет крупнейшими рудниками Ки-Лейк и Рэбби-Лейк в Канаде. В число крупнейших мировых компаний также входят: французская корпорация «*Cogema*», занимающаяся производством урановых концентратов не только во Франции, но и в Нигере, Габоне и Канаде; австралийские компании «*ERA*» и «*WMC*» (рудники Рейнджер и Олимпик-Дэм) и английская корпорация «*RTZ*» (рудник Рессинг в Намибии). Шесть этих компаний контролируют 60 % мировой добычи урана.

Торий получают попутно при переработке комплексных руд редких элементов. Основная масса его заключена в прибрежно-морских монацитовых россыпях Австралии, Индии, Бразилии и Малайзии. В 1980–1990-х годах добывалось 10–15 тыс. т монацита в год, что соответствует 500–700 т диоксида тория.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

На ранней стадии геосинклинального этапа эндогенные урановые месторождения не образовывались. Однако в это время формировались осадочные формации («черных сланцев» и фосфорсодержащих песчаников) с рассеянной урановой минерализацией. Средняя стадия геосинклинального этапа с ее гранитными батолитами также была мало продуктивной для образования урановых месторождений. Основная масса их сформировалась на поздней стадии геосинклинального этапа в связи с гипабиссальными интрузиями.

На платформенном этапе в областях тектономагматической активизации формировались как плутоногенные, так и вулканогенные гидротермальные месторождения. В это же время в предгорных и межгорных прогибах образовывались инфильтрационные, а также осадочные месторождения в карбонатных, терригенных, угленосных и битуминозных формациях.

Урановые месторождения формировались в различные эпохи развития земной коры, начиная с раннего протерозоя. По геологическим особенностям ураноносные провинции подразделяются на четыре группы: 1) древних платформ и щитов; 2) активизированных древних стабильных областей; 3) складчатых областей; 4) активизированных складчатых областей.

Более половины учтенных ресурсов и запасов урановых руд относится к *докембрийской эпохе рудообразования*. Многочисленные месторождения этого возраста известны в Канаде (Порт-Радий, Блайд-Ривер, Банкрифт, Фарадей, Рэбби-Лейк, Клафф-Лейк, Мидуэст-Лейк и др.), Австралии (Маунт-Айза, Радиум-Хилл, Маунт-Пейнтер, Крокер-Уэлл и др.), ЮАР (Витватерсранд), Намибии (Рессинг), Заире (Шинколобе), Бразилии, США, Индии и других странах.

В *раннепалеозойскую эпоху рудообразования* возникли ураноносные «черные сланцы». Они широко распространены в Швеции. Содержание урана в них обычно не превышает 0,01 % и только в слоях, представленных углеподобным веществом («кольмах») повышается до 0,05 %. Эндогенное рудообразование в эту эпоху было слабым.

*Позднепалеозойская эпоха рудообразования* ознаменовалась формированием в основном инфильтрационных и осадочных месторождений урана, сосредоточенных в песчаниках, битуминозных сланцах, фосфоритах и каменных углях. Особенно широко ураноносные породы распространены в США (пермская фосфоритоносная формация Фосфория и т. п.). В Африке наиболее крупные месторождения выявлены в пределах Сахарской платформы (Акута, Арни, Афасто). Они приурочены к песчано-глинистым отложениям (содержание  $U_3O_8$  0,23–0,28 %). В Австралии известны осадочные месторождения урана в карбонатных породах (месторождение Маорин и др.).

В *мезозойскую эпоху рудообразования* возникли промышленные месторождения урано-ванадиевых руд плато Ко-

лорадо в США. В них заключено около 55 % разведанных запасов урана США. Содержание урана в рудах составляет 0,2–0,24 %,  $V_2O_5$  1–4 %. В Аргентине развита урановая минерализация типа «плато Колорадо» в предгорьях Анд. Стратиграфический диапазон уранового оруденения очень широк — от каменноугольных до третичных отложений включительно. Урановые месторождения мезозойского возраста имеются в Нигере, Испании, Новой Зеландии, Японии.

В *кайнозойскую эпоху рудообразования* формировались как вулканогенные гидротермальные (преимущественно в областях тектономагматической активизации), так и осадочные месторождения (в предгорных и межгорных впадинах). Среди месторождений урана кайнозойского возраста главное значение имеют ураноносные регионы США, расположенные в штатах Вайоминг и Техас. Многочисленные проявления урановой минерализации, связанные с третичным магматизмом, известны в Канаде, где они сосредоточены в Скалистых горах (на территории Британской Колумбии). В Аргентине, предположительно с третичным вулканизмом, связывается образование группы месторождений: Соберания, Президент Перон и Ева Перон. В Бразилии крупные запасы урана сосредоточены в штате Минас-Жерайс в комплексных уран-ториево-ниобиевых рудах карбонатитовых массивов Араша и Тапира.

## **Генетические типы промышленных месторождений урана**

Выделяются следующие генетические типы промышленных месторождений: 1) альбититовые, 2) плутоногенные гидротермальные, 3) вулканогенные гидротермальные, 4) осадочные, 5) инфильтрационные, 6) метаморфогенные.

*Альбититовые месторождения* урана известны среди метаморфогенных комплексов кристаллических пород докембрия. Рудные тела имеют форму линзовидных и трубообразных залежей, сложенных преимущественно альбититом (рис. 52). Урановые минералы представлены уранинитом, давидитом, коффинитом, уранофаном, гидронастураном и др. Месторождения формировались в две стадии. На ранней стадии отложилась основная масса альбита с урано-

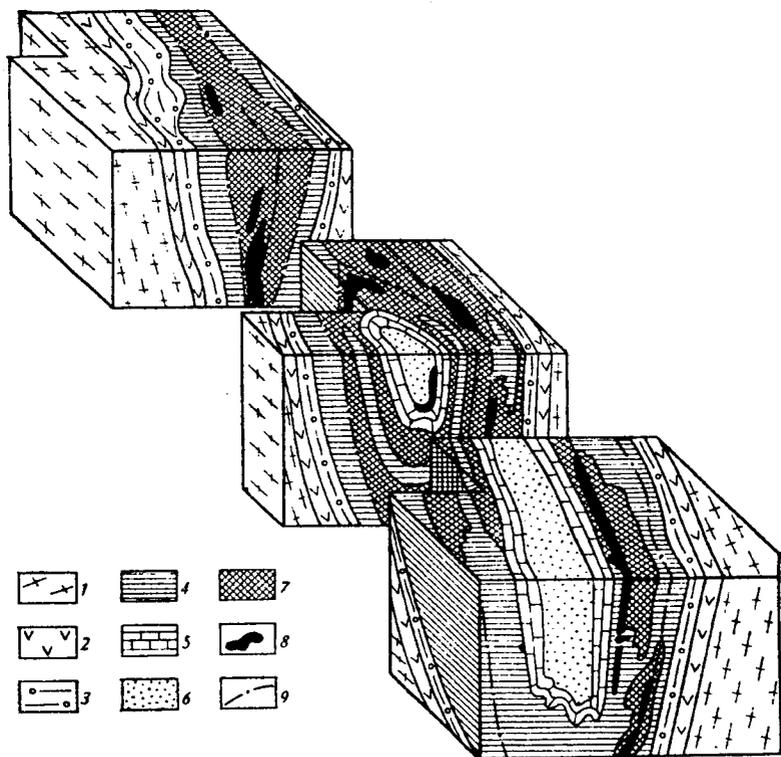


Рис. 52. Геологическое строение альбититового уранового месторождения (по В. Кушеву):

1 — гранито-гнейсы; 2 — амфиболиты; 3 — гранат-биотитовые и гранат-амфиболовые сланцы; 4 — железистые кварциты; 5 — мраморизованные карбонатные породы; 6 — кварциты и сланцы; 7 — альбититы; 8 — урановорудные залежи; 9 — тектонические нарушения

выми минералами; на более поздней — кварц с сульфидами (пирит, пирротин, халькопирит, борнит, галенит).

*Плутоногенные гидротермальные месторождения.* Среди них выделяются две главные формации: *уранинит-сульфидная* и *уранинит-арсенидная*. В составе руд *уранинит-сульфидной* формации наряду с уранинитом широко представлены сульфидные минералы (пирит, халькопирит, борнит, молибденит, висмутин, сфалерит, галенит и др.). Характерным представителем этой рудной формации является *месторождение Мэрисвейл*. Оно расположено в штате Юта

(США). Район месторождения сложен известняками, песчаниками, кварцитами и сланцами пермского, триасового и юрского возраста, которые перекрыты эффузивной серией андезит-порфирового состава третичного возраста. Этот комплекс осадочных и вулканических пород прорван третичными монцонитами и трахитами. Рудные тела сосредоточены среди монцонитов. Они имеют форму крутопадающих жил длиной до 500 м при мощности 1,5–7 м. Жилы сложены в основном уранинитом в ассоциации с пиритом, магнетитом, флюоритом, адуляром и кварцем. Среднее содержание в рудах  $U_3O_8$  0,2 %.

Руды *уранинит-арсенидной формации* имеют более сложный состав (уран, никель, кобальт, висмут и серебро). Типичным представителем этой формации является *месторождение Порт Радий* (рис. 53). Оно находится на восточном берегу Большого Медвежьего озера в Канаде. Участок месторождения сложен кремнистыми сланцами и кварцитами, прорванными телами порфиров и дайками диабазов. Породы смяты в складки и разбиты сбросо-сдвигами. Рудные жилы и жильные зоны имеют длину от 0,2 до 2 км при мощности от 0,2–0,5 до 10 м. Уранинит в рудах пред-

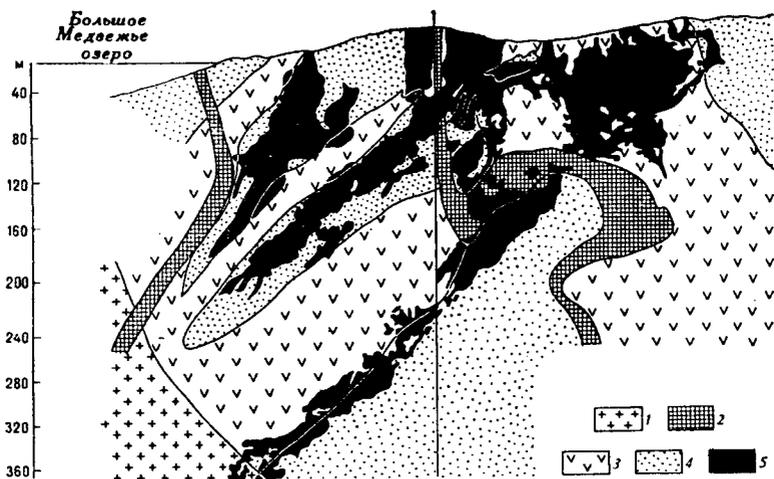


Рис. 53. Рудные столбы на продольной проекции жилы 3 месторождения Порт Радий (по Д. Кемпбеллу):  
1 – граниты; 2 – диабазы; 3 – порфиры; 4 – осадочные породы; 5 – руда

ставлен колломорфными выделениями, арсениды — сафлорит-раммельсберgitом, хлоантитом, скуттерудитом, кобальтином, серебряные минералы — аргентитом, гесситом, алтаитом, самородным серебром. Среди сульфидов отмечены пирит, халькопирит, борнит, сфалерит, галенит и др.

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* тесно ассоциированы с комплексами вулканических пород в основном герцинского и альпийского циклов. Эти комплексы состоят из пирокластических пластов, лавовых покровов, силлов, субвулканических тел и массивов андезит-риолит-трахитовой формации. В классе вулканогенных гидротермальных месторождений В. Котляров выделил следующие формации: 1) уран-титановую, 2) уранинит-галенитовую, 3) уранинит-молибденовую, 4) уранинит-флюоритовую, 5) уранинит-халькопиритовую, 6) уранинит-мышьяковую, 7) уранинит-апатитовую, 8) уранинит-аллофановую.

Одно из месторождений уранинит-молибденовой формации детально изучено Н. Лавёровым. Оно приурочено к жерлу палеовулкана, прорвавшего толщу палеозойских вулканических пород (рис. 54). Вулканическая жерловина выполнена explosивными брекчиями фельзитов. Весь комплекс магматических пород разбит крутопадающими разветвленными разломами и сколами. Рудные тела локализованы в вулканическом жерле и на контакте его с прорываемыми породами и на пересечении разломами пористых фельзитовых брекчий.

*Осадочные месторождения* образуются в результате восстановления или сорбции подвижных соединений урана в среде осадкообразования. Главными восстановителями и сорбентами являются карбонаты, фосфориты, цеолиты, твердые битумы, углистое вещество и растительный детрит. Такие месторождения, как правило, имеют большие площади и часто обладают крупными запасами, но обычно содержат невысокую концентрацию урана.

Среди морских формаций различают осадочные месторождения урана в карбонатных породах, углисто-кремнистых сланцах и фосфорсодержащих породах, а среди континентальных — в торфяниках, лигнитах и бурых углях, конгломератах и песчаниках.

*Инфильтрационные месторождения* имеют важное экономическое значение и широкое распространение. Они

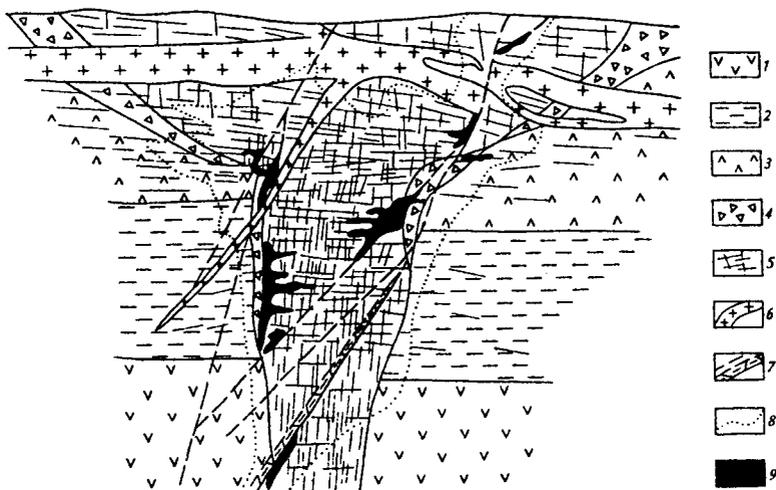


Рис. 54. Поперечный разрез месторождения уранинит-молибденитовой формации (по Н. Лаврову и др.):

1 — покров массивных фельзит-порфиров; 2 — покров флюидалных фельзит-порфиров; 3 — покров игнимбритов; 4 — эруптивные брекчии фельзитов некка; 5 — фельзиты некка; 6 — дайки гранит-порфиров; 7 — разрывы; 8 — граница контура измененных пород; 9 — рудные тела

приурочены к свитам песчано-глинистых пород пестроцветных толщ континентального генезиса. Такие месторождения известны в Германии, Франции, Великобритании, Италии, Голландии, Бельгии, Австралии, Индии и многих других странах.

К этому типу относятся многочисленные урановые месторождения *плато Колорадо*. Основание этого плато сложено докембрийскими кристаллическими породами, на которых залегают слабо дислоцированные образования верхнепалеозойских, триасовых, юрских, меловых и эоценовых пестроцветных конгломератов, песчаников и сланцев с подчиненными пластами туфов. Общая мощность этих образований 3–4 км. Урановые месторождения встречаются по всему разрезу, но в основном приурочены к конгломератам и песчаникам триаса и юры. Рудные тела имеют форму линз, лент, роллов длиной до нескольких сотен метров и мощность до 5 м (рис. 55). В состав первичных руд входят уранинит, коффинит, роскоэлит, монтрозит, а также сульфиды (пирит, халькопирит, сфалерит, герсдорфит).

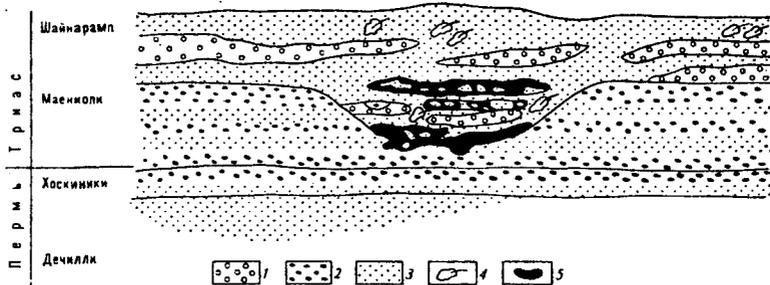


Рис. 55. Форма рудных тел в конгломератах и песчаниках Монумент Вали, плато Колорадо (по П. Керру):  
 1 — конгломераты; 2 — аргиллиты; 3 — песчаники; 4 — окаменелые растительные остатки; 5 — урановая руда

В зоне выветривания развиты оксиды урана, ванадия и других элементов. Содержание урана в рудах варьирует от 0,1 до 1,0 %. Кроме того, присутствует ванадий (1–1,5 %), кобальт, медь, никель, молибден, селен, мышьяк.

Метаморфогенные месторождения имеют большое значение в мировой добыче урановых руд. К ним относят древние ураноносные конгломераты (Витватерсранд в ЮАР, Элиот-Лейк в Канаде, Жакобина в Бразилии). Эти месторождения стратиграфически связаны с нижнепротерозойскими образованиями и обладают рядом специфических черт. Среди них известны также скарноподобные месторождения типа «Мери Кетлин» в Австралии и метаморфизованные месторождения ураноносных углисто-кремнистых сланцев типа «Аллигейтор Риверс» в Австралии.

Одним из представителей месторождений ураноносных конгломератов является *Элиот-Лейк* (иногда называемое *Блайд-Ривер*). Оно находится на северном берегу оз. Гурон в Канаде. Рудоносные конгломераты приурочены к основанию протерозойских метаморфических пород гуронской системы, несогласно залегающих на гранито-гнейсовом основании архея. Рудоносные конгломераты имеют форму пластов и линз. Они состоят из галек и обломков кварца, реже темноцветного роговика, сцементированных кварцсерицит-хлоритовой массой, содержащей пирит, гематит, магнетит, монацит и циркон. Урановые минералы представлены браннеритом и уранинитом. Среднее содержание  $U_3O_8$  в рудах 0,1 %, первоначальные запасы урана составили 300 тыс. т.

## Генетические типы промышленных месторождений тория

Торий накапливается: 1) в магматических месторождениях, 2) в пегматитовых, 3) в высокотемпературных вулканогенных гидротермальных и 4) в россыпях.

В *магматических месторождениях* торий концентрируется в гранитах — в акцессорном монаците и частично торите, а также в нефелиновых сиенитах (в лопарите). Из лопарита торий извлекается в качестве побочного продукта при добыче ниобия и редких земель. Торий может также накапливаться в карбонатитах, где он входит в состав микролита.

В *пегматитовых месторождениях* торий накапливается в гранитных пегматитах в виде эшенита, приорита других минералов. Промышленных концентраций эти минералы не образуют, а являются дополнительным источником тория.

В *высокотемпературных вулканогенных гидротермальных месторождениях* торий концентрируется в торите, ферриторите, торианите и урано-торианите. В ряде урановых рудных полей, где основным минералом является настуран, минеральные образования тория могут достигать промышленных концентраций.

К *россыпным месторождениям* относятся в основном монацитсодержащие пески. Они широко распространены в Австралии, Индии, Новой Зеландии и других странах. В настоящее время именно этот тип месторождений имеет главное промышленное значение в качестве минерального сырья на торий.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕДКИХ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Термин «редкие элементы» прямо не связан с редкостью нахождения их в природе и является исторически сложившимся понятием. К ним относятся более 30 элементов, которые разделяются на пять групп: 1) редкие щелочные элементы (Li, Rb и Cs); 2) легкие элементы (Be); 3) редкие тугоплавкие элементы (Ta, Nb, Zr, Hf); 4) редкоземельные элементы, или лантаноиды, и их аналоги; 5) рассеянные элементы (Ge, Re, Tl, Cd, Ir, Ga, Se, Te).

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛИТИЯ

### Краткие исторические сведения

Литий открыт шведским химиком А. Арфведсоном в 1817 г. в минерале петалите. Тогда же он получил свое название «литос» — камень. В чистом виде металлический литий получен в 1855 г. Он представляет собой серебристо-белый легкий металл (плотность  $0,53 \text{ г/см}^3$ , плавает в воде и керосине), мягкий (режется ножом), ковкий и тягучий, температура плавления  $186^\circ\text{C}$ , химически активен (на воздухе, соединяясь с азотом и кислородом, покрывается белой пленкой).

### Геохимия

Кларк лития в литосфере  $3,2 \cdot 10^{-3} \%$  (по А. П. Виноградову). Он концентрируется в кислых магматических и осадочных глинистых породах. Литий является типичным литофильным элементом. Элементы-спутники его — Na, Be, В, частично F и He. Образует два стабильных изотопа  ${}^6\text{Li}$

(7,52 %) и  ${}^7\text{Li}$  (92,48 %). При бомбардировке  ${}^6\text{Li}$  нейтронами получается гелий и изотоп тяжелого водорода — тритий ( ${}^3\text{H}$ ):  ${}^6\text{Li} + \text{h} = {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ .

## Минералогия

Литий входит в состав более 30 минералов, в основном силикатов и фосфатов.

Главнейшие промышленные минералы лития: *сподумен*  $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$  (содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  6–7,5 %), *амблигонит*  $\text{LiAl}[\text{PO}_4] \times (\text{Fe}, \text{OH})$  ( $\text{Li}_2\text{O}$  6–9 %), *лепидолит*  $\text{K}_2(\text{Li}, \text{Al})_{5-6}[\text{Si}_{6-7}\text{Al}_{2-1}\text{O}_{20}] \times (\text{OH}, \text{F})_4$  ( $\text{Li}_2\text{O}$  2–6 %), *петалит*  $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$  ( $\text{Li}_2\text{O}$  3–4 %).

## Применение в промышленности

Применение лития достаточно многообразно. Дейтрид лития является основным «горючим» компонентом водородных бомб. Гидрат оксида лития используется в установках генерации воздуха на подводных лодках, космических кораблях и т. д. Он является составной частью многих сплавов с молибденом, алюминием, бериллием и другими металлами. Соединения лития используются также в производстве пластмасс, синтетического каучука, медикаментов и т. п.

## Ресурсы, запасы, добыча и производство

Данные о запасах и объемах производства лития в мире противоречивы. В опубликованных источниках отсутствуют сведения о запасах этого металла в России и странах бывшего социалистического лагеря. В 1985–1990 гг. общие запасы лития в недрах 17 несоциалистических стран (руды, рассолы и минерализованные воды озер) составляли 30 млн. т, в том числе запасы подтвержденные 7,5 млн. т. Основными странами-держателями этого вида минерального сырья являются Боливия, Чили, Заир, США, Аргентина, Канада и Австралия.

Богатые руды содержат 1,3–1,5 %, реже 2,0 %  $\text{Li}_2\text{O}$ , бедные — 0,6–1,0 %  $\text{Li}_2\text{O}$ . Важным источником является рапа салар, содержащая 0,006–0,04%  $\text{Li}_2\text{O}$ .

Производство лития (в пересчете на металл) в капиталистических и развивающихся странах в 1985–1990 гг. составляло 7–8 тыс. т. Из них более 70 % лития извлекалось из пегматитов и около 30 % из рапы салар. Основными странами-производителями лития являются США (5–5,5 тыс. т), Чили, Зимбабве и Австралия.

## Металлогения и эпохи рудообразования

При магматической кристаллизации литий накапливается в самых последних дифференциатах гранитных комплексов и на их конечных стадиях. Эндогенные месторождения лития связаны с полями гранитных пегматитов, приуроченным к протяженным линейно-вытянутому геосинклинальным трогам на древних щитах и фанерозойским геосинклинально-складчатым областям.

В *докембрийскую эпоху* крупные поля литиеносных пегматитов формировались в основном в протогеосинклинальных трогах. Такие месторождения широко распространены в Канаде (Литиа, Квебек, Ла Корн, Ла Круа, Онтарио и др.), Зимбабве (Бикита), Австралии (Лондондерри).

В *раннепалеозойскую (каледонскую) эпоху* промышленные месторождения лития формировались крайне редко. К ним относятся месторождения редкометальных пегматитов и карбонатитов в России, а также в Норвегии и Швеции.

В *позднепалеозойскую (герцинскую) эпоху* образовались сподуменовые месторождения в штате Северная Королина (Кингс-Маунтин и др.), являющиеся частью гигантского пегматитового пояса Аппалачей. Пегматиты представлены весьма разнообразными типами, от слабо альбитизированных и берилловых до нацело замещенных лепидолитовых.

*Мезозойские* редкометальные пегматиты особенно широко распространены в Афганистане, где они образуют ряд протяженных поясов. Основными ценными минералами в них являются сподумен, лепидолит, поллуцит и петалит. Среднее содержание лития в руде составляет 0,5–1,0 %.

В мезозое образовались также пегматиты Забайкалья в России и ряд пегматитовых полей в штате Калифорния в США, где по масштабам оруденения выделяется месторождение Пала. Попутно с лепидолитом из руд этого месторождения извлекаются драгоценные камни (кунцит, розовый турмалин и др.).

В *кайнозойскую* эпоху сформировалась большая часть (более 50 %) мировых прогнозных ресурсов лития, сосредоточенных в основном в высокоминерализованных водах – рассолах Мертвого моря, озерах США и сalaraх Чили, Боливии и Аргентины. Сырой карбонат лития извлекают из рассолов подземного озера Силвер-Пик в Неваде и из рапы оз. Сёрлс в Калифорнии.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Важнейшими промышленными месторождениями лития являются: 1) пегматитовые, 2) высококонцентрированные рассолы.

*Пегматитовые месторождения.* Среди них основное значение имеют гранитные пегматиты натрий-литиевого типа (сподуменовые, сподумен-лепидолитовые, петалит-лепидолитовые, лепидолитовые). Часто вместе с литиевыми минералами в них встречаются берилл, колумбит, танталит, касситерит и др. Характерная особенность литиевых пегматитов широкое развитие в них процессов метасоматоза. Сначала происходит замещение микроклина кварцмусковитовым агрегатом, а затем более интенсивно проявляются альбитизация и грейзенизация.

По морфологическим особенностям и минеральному составу руд среди них выделяются три разновидности: 1) крутопадающие протяженные жильные ветви преимущественно сподумен-альбитового состава (месторождения Литиа, Ла Корн в Канаде; Александр Каунти в США; Лалин в Испании; Друмгал, Джаманак в Афганистане); 2) пологозалегающие зональные тела микроклин-сподумен-альбитового и микроклин-петалит-альбитового состава (месторождение Берник-Лейк в Канаде; Бикита в Зимбабве и др.); 3) мощные крутые трубообразные, штоковидные и

линзообразные полнодифференцированные тела микроклин-сподумен-альбитового состава с Та, Ве и Cs, характеризующиеся крайне неравномерным оруденением, гнездовым распределением минерализации и появлением в их центральных частях гигантских кристаллов сподумена (месторождения Этта Майн и Пирлесс в США; ряд месторождений в Китае).

*Месторождение Этта Майн* представляет собой пегматитовое тело микроклин-сподумен-альбитового состава, залегающее в метаморфических сланцах. Оно имеет зональное строение (рис. 56). Главным промышленным минералом является сподумен.

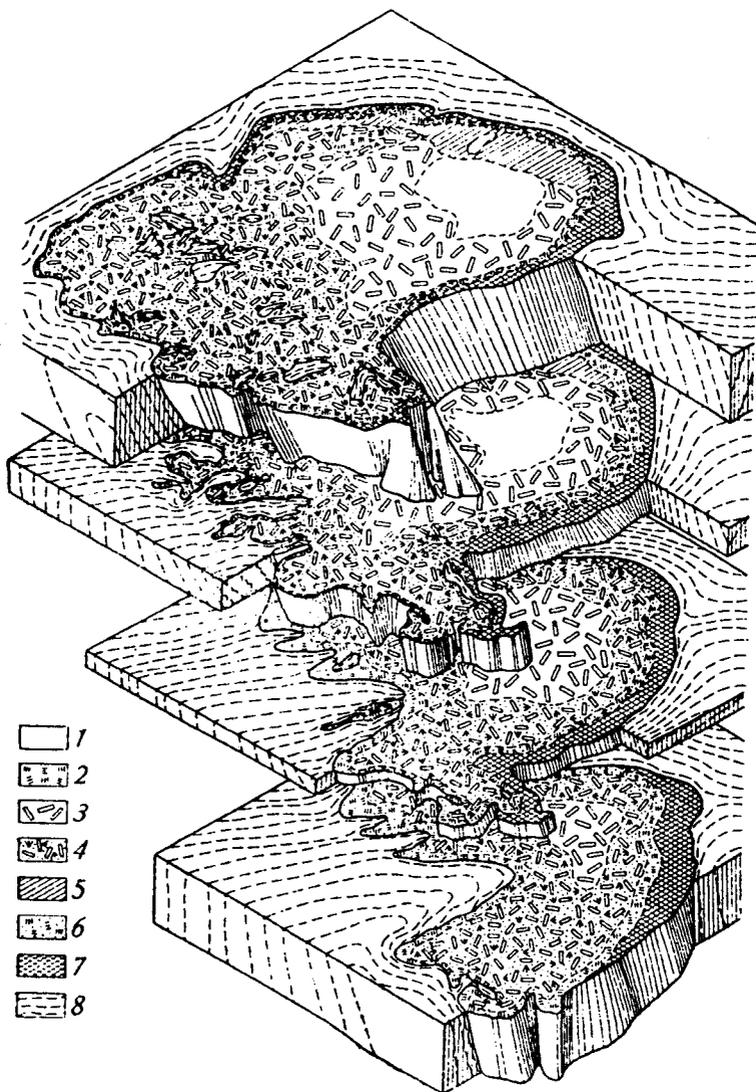
*Месторождения высококонцентрированных рассолов.* В них сосредоточено около 60 % мировых запасов лития. Выделяется несколько разновидностей богатых литием природных вод.

1. *Межкристальная рапа высохших соляных озер.* Примером может служить озеро Сёрлс в Калифорнии, занимающее площадь 70 км<sup>2</sup>. В соленосной толще мощностью 15–20 м, сложенной галитом, содой и мирабилитом, межкристальное пространство заполнено маточной рапой с содержанием Li<sub>2</sub>O 0,015 %.

2. *Рассолы высыхающих современных водных бассейнов.* Это – озера, лагуны и заливы морей. К этой разновидности природных вод относятся рассолы Мертвого моря (содержание Li<sub>2</sub>O 0,004 %), салары в пустыне Атакама – месторождение Салар де Атакама в Чили (содержание Li<sub>2</sub>O около 0,2 %) и др.

3. *Подземные богатые рассолы.* Примером являются рассолы подземного озера Силвер-Пик в штате Невада. Рассолы, содержащие 0,03 % Li<sub>2</sub>O, заключены в кластических осадках среди андезитовых и риолитовых лавовых потоков, перекрытых аллювиальными отложениями. Доказанные извлекаемые запасы лития в рассолах этого озера оцениваются в 40 тыс. т, а прогнозные – в 80 тыс. т.

4. *Подземные рассолы нефтяных и газовых месторождений.* Они приурочены обычно к подсолевым и межсолевым комплексам пород в нефтегазоносных областях. По составу это чаще всего хлоридно-кальциево-натриевые рассолы. Содержат наряду с Li<sub>2</sub>O (до 0,08 %) также Rb, Cs, I, Br, В, Sr. Такие подземные рассолы широко распространены в Припятской нефтегазоносной области в Беларуси.



*Рис. 56.* Пегматитовое тело Этта Майн в хр. Блэк-Хиллс, Южная Дакота (США) (по И. Недумову):

1 – кварцевое ядро с кристаллами сподумена по периферии; 2 – мусковит-кварцевые обособления с миароловыми пустотами; 3 – кварц-сподуменовая зона; 4 – сподумен-кварц-клевеландитовая зона с касситеритом, танталитом, бериллом; 5 – сподумен-кварц-микроклиновная зона с олигоклаз-альбитом; 8 – метаморфические сланцы

# МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦЕЗИЯ И РУБИДИЯ

## Краткие исторические сведения

Рубидий и цезий открыты спектральным анализом: рубидий в 1859 г. Р. Бунзеном, цезий в 1860 г. Р. Бунзеном и Р. Кирхгоффом. Длительное время эти элементы не имели практического значения. Цезий – серебристо-белый, мягкий, тягучий металл. Температура его плавления 28,5 °С, температура кипения 670 °С. Это самый тяжелый из щелочных металлов и наиболее химически активный. На воздухе, а также при взаимодействии с галогенами цезий моментально воспламеняется, а с серой и фосфором реагирует со взрывом. Благодаря исключительным свойствам цезия – наибольшему из всех катионов размеру (0,165 нм), наименьшему потенциалу ионизации (3,89 eV) и низкой работе выхода электрона (1,87 eV) при облучении его солнечными или космическими лучами, а также при нагревании – он становится источником потока электронов. Рубидий тесно связан с цезием и оба элемента встречаются в одних и тех же минералах, но в различных концентрациях.

## Геохимия

Оба элемента типично литофильные, концентрируются в конечных дифференциатах гранитных магм. Кларк рубидия в земной коре  $1,5 \cdot 10^{-2}$  % (по А. П. Виноградову), кларк цезия  $3,7 \cdot 10^{-4}$  %. Наблюдается некоторое увеличение концентрации этих элементов от ультраосновных пород к кислым. Цезий образует только один устойчивый изотоп  $^{135}\text{Cs}$ , а в природных соединениях встречается как одновалентный положительный ион. Рубидий образует два изотопа ( $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$ ).

Петрогенным аналогом цезия и рубидия является калий. Однако в связи с тем, что ионный радиус у рубидия (0,149 нм) гораздо ближе к калию (0,133 нм), чем у цезия (0,165 нм), то рубидий полностью рассеивается в калиевых минералах и накапливается только на конечных этапах кристаллизации в редкометальных гранитных пегматитах, входя в состав микроклина, рубидиевого мусковита

та и лепидолита. Цезий благодаря крупному размеру иона входит только в состав минералов с благоприятной для этого структурой (слюды, берилл). Поэтому он нередко образует свой собственный минерал — поллуцит.

## Минералогия

Из числа собственно цезиевых минералов наиболее распространены поллуцит и цезиевый берилл (воробьевит).

*Поллуцит*  $Cs(AlSi_2O_6)$  (по фамилии Поллукс) (содержание  $Cs_2O$  30–34 %). Минерал кристаллизуется в кубической сингонии, бесцветный, блеск жирный, твердость 6,5, плотность 2,9 г/см<sup>3</sup>.

*Воробьевит* — разновидность берилла  $Al_2Be_3[Si_6O_{18}]$ , содержащая Cs до 3 %, розовый от примеси  $Mn^{2+}$  (синоним: ростерит, морганит).

## Применение в промышленности

Цезий широко используется в производстве фотоэлектрических и электронно-лучевых приборов. Он применяется также в качестве топлива в ионных ракетных двигателях, а также для повышения эффективности работы плазменных генераторов. Все это обусловило быстрый рост его производства.

Рубидий применяется в ограниченном количестве в медицине и аналитической химии. Рубидиевые магнитометры используются в качестве бортовой аппаратуры спутников.

## Ресурсы, запасы, добыча, производство

Сводная статистика по запасам и производству рубидия и цезия в мире отсутствует. Мировая промышленность цезия базируется на поллуцитовых рудах, содержащих от 0,3–0,5 до 3 % и более  $Cs_2O$ . Уникальные по запасам месторождения содержат более 100 тыс. т  $Cs_2O$ , крупные — тысячи тонн, средние сотни тонн, а мелкие — десятки тонн. По данным *Горного бюро США* в капиталистических

и развивающихся странах запасы  $Cs_2O$  в поллуците и лепидолите составляют 180 тыс. т, а  $Rb_2O$  — 170 тыс. т. Мировое производство цезия превышает 35 т, а рубидия 5 т. Годовые производственные мощности рубидиевых (в пересчете на металл) предприятий США превышают 3 т, а цезиевых — 10 т.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

Цезий и рубидий имеют тенденцию накапливаться на поздних стадиях магматического процесса. Наиболее высокие концентрации цезия наблюдаются в редкометально замещенных микроклин-альбититовых пегматитах со сподуменом. Отмечается приуроченность цезия к центральным зонам пегматитовых тел (содержание его здесь в 13—30 раз выше, чем в краевых зонах).

При экзогенных процессах цезий и рубидий накапливаются совместно с калием в соляных отложениях: рубидий входит в состав сильвина и карналлита, цезий сорбируется илами или сохраняется в водах.

В *докембрийскую эпоху* образовалось уникальное по масштабам оруденения месторождение цезиевых руд, приуроченное к формации редкометальных пегматитов.

Промышленные концентрации рубидия, связанные с калийными породами, формировались в раннепалеозойскую, позднепалеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую эпохи рудообразования и тесно коррелируются с этапами карналлитобразования в истории развития Земли.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Основным промышленным типом месторождений цезия являются редкометально замещенные гранитные пегматиты. В зависимости от соотношения цезийсодержащих минералов (поллуцита и лепидолита) выделяются три типа пегматитовых месторождений: 1) чисто поллуцитовые (месторождения Швеции, России); 2) поллуцит-лепидолитовые (Канада, США); 3) чисто лепидолитовые (Намибия).

*Месторождение Берник-Лейк* — уникальное по масштабам оруденения, расположено в провинции Манитоба в Канаде. Оно приурочено к метаморфизованным осадочно-вулканогенным образованиям группы Райс-Лейк, представленных амфибол-плаггиоклазовыми сланцами, прорванными гранитами (возраст 2 млрд. лет). Месторождение имеет многоярусное строение. Главная пегматитовая залежь располагается в 900–1000 м над гранитным массивом. Она представлена эллипсоидальным в плане телом, вытянутым в субширотном направлении на 1000 м при ширине 460 м и мощности до 85 м. Под основной залежью располагается второе тело. Пегматитовая залежь имеет четко выраженное зональное строение с хорошо развитым кварцевым ядром (рис. 57). В центральной части залежи располагается поллуцитовая зона, расчленяющаяся на три линзы мощностью до 5 м каждая. Эти линзы сложены практически одним поллуцитом (содержание  $Cs_2O$  в них достигает 28 %). Первичные запасы этого месторождения составляли 270 тыс. т руды при среднем содержании  $Cs_2O$  20,5 %. Месторождение уникально также по запасам тантала (4300 т  $Ta_2O_5$ , при среднем содержании оксида тантала 0,23 %) и лития (среднее

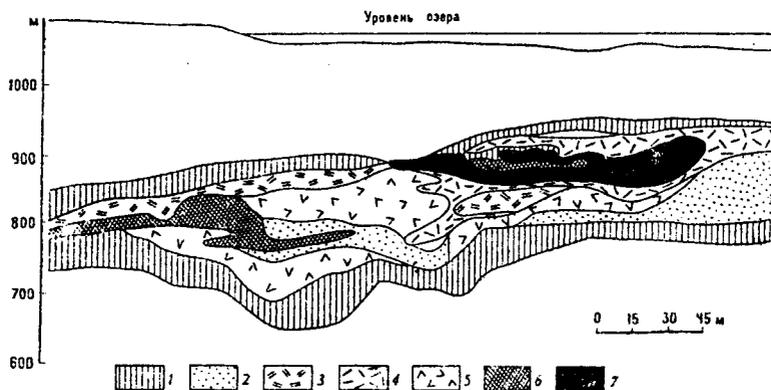


Рис. 57. Вертикальный разрез пегматитового тела Танко (месторождение Берник-Лейк, Канада) (по П. Черний и Р. Фергюссону):  
 1 — альбит-кварц-микроклиновая зона; 2 — мелкозернистая кварц-альбитовая зона; 3 — микроклин-альбит-кварц-сподуменовая зона; 4 — сподумен-кварц-амблигонитовая зона (с петалитом); 5 — микроклин-альбит-кварцевая зона (с танталовой минерализацией); 6 — кварцевая зона; 7 — поллуцитовая зона

содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  2,3 %). На месторождение Берник-Лейк приходится около 90 % всей мировой добычи цезия и около 30–40 % добычи тантала.

Рудопроявления в Беларуси. Потенциальным источником рубидия являются карналлитовые породы горизонта 0–7, развитого в фаменской соленосной формации Припятского прогиба. На Октябрьском месторождении калийных солей запасы карналлитовых руд по категории  $\text{C}_2$  составляют 936,7 млн. т, а на Любанском участке прогнозные ресурсы калийно-магниевых солей по категории  $\text{P}_1$  оцениваются в 1,8 млрд. т. Мощность карналлитового пласта колеблется от 4,5 до 6,0 м. По данным Ю. И. Лупиновича и Н. С. Петровой, среднее содержание Rb в карналлитовых рудах составляет 0,024 %.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ

### Краткие исторические сведения

Берилл и изумруд были известны еще в глубокой древности. Они обнаружены в египетских захоронениях, возраст которых около 5 тыс. лет до н. э. Немецкий ученый Рудольф Юбельт высказал предположение, что из кристаллов берилла древние римляне вытачивали линзы для получения зрительных стекол («брилле» по-немецки очки). Отсюда возможно происходит название минерала берилл. В России об этом минерале узнали позже, когда в 1831 г. уральский крестьянин Максим Кожевников, заготавливая дрова, обнаружил под вывороченными корнями дерева первый русский изумруд.

Элемент бериллий был открыт в минерале берилле в 1798 г. французским химиком Л. Вокленом. Чистый металл был получен в 1898 г. П. Лебо путем электролиза. В Бразилии был добыт кристалл берилла массой 20 т, в США в штате Мэн находили кристаллы массой в 16 т.

Бериллий — серебристо-серый металл, очень мягкий (плотность  $1,85 \text{ г/см}^3$ ), прочный и упругий (модуль упругости  $30000 \text{ кг/см}^2$ ), характеризуется низким сечением захвата тепловых нейтронов ( $0,009$  барн).

### Геохимия

Кларк бериллия в земной коре  $3,8 \cdot 10^{-4} \%$ . Содержание его увеличивается от ультраосновных ( $2 \cdot 10^{-5} \%$ ) к кислым ( $5 \cdot 10^{-4} \%$ ) породам. В природе стабилен только один изотоп  $^9\text{Be}$ . При ядерных реакциях, происходящих под воздействием космических лучей, возникают изотопы  $^7\text{Be}$  и  $^{10}\text{Be}$ .

Бериллий не имеет прямых геохимических аналогов среди породообразующих элементов, но по геохимическим свойствам ближе всего подходит к  $\text{Si}^{4+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ . Основная

масса бериллия в магматических породах связана с плаггиоклазами. Однако наибольшие его концентрации характерны для некоторых темноцветных минералов и мусковита. В щелочных породах бериллий почти полностью рассеивается. При формировании кислых магматических пород он может накапливаться в постмагматических продуктах — пегматитах и пневматолито-гидротермальных телах. В кислых пегматитах образование значительных скоплений бериллия связано с процессами альбитизации и мусковитизации. В пегматитах бериллий образует собственные минералы, но частично находится также в изоморфной форме в породообразующих минералах — микроклине, альбите, кварце, слюдах и др.

Бериллий — типично фторофильный элемент. Он образует с F и CO<sub>2</sub> хорошо растворимые и летучие комплексы типа [BeF<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>, [BeF<sub>3</sub>]<sup>-</sup>, [BeF<sub>2</sub>]<sup>0</sup>, [Be(CO<sub>3</sub>)F]<sup>-</sup>, [Be(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sup>-2</sup>, которые легко гидролизуются при возрастании щелочности и температуры, образуя [BeF(OH)]<sup>0</sup>, [Be(OH)<sub>2</sub>]<sup>0</sup>, [Be(OH)<sub>3</sub>]<sup>-</sup>. В форме этих соединений и происходит миграция бериллия.

## Минералогия

В природе известно более 50 минералов бериллия, представленных силикатами, алюмосиликатами, фосфатами, оксидами и боратами. Промышленное значение имеют берилл, фенакит, берtrandит, гельберtrandит, хризоберилл, барилит, гентгельвин, гельвин и некоторые другие.

*Берилл* Be<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>[Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>] (содержание BeO 10–12 %). В нем содержится до 5–7 % Na, Li, K, реже Rb и Cs. Кристаллы призматические, цвет белый, зеленоватый, желтоватый, блеск стеклянный, твердость 7,5–8, плотность 2,8 г/см<sup>3</sup>. Красиво окрашенная прозрачная зеленая разновидность (изумруд) — драгоценный камень.

*Фенакит* Be<sub>2</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>14</sub>] (BeO 45,5 %) кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы ромбоэдрические, реже призматические, бесцветный, желтый, блеск стеклянный, твердость 7,5, плотность 3,0 г/см<sup>3</sup>.

*Берtrandит* Be<sub>4</sub>[Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>](OH)<sub>2</sub> (BeO 40–42 %) (по фамилии Бертран) кристаллизуется в ромбической сингонии, габитус кристаллов пластинчатый, игольчатый, агрегаты

радиально-лучистые и зернистые, блеск стеклянный, твердость 6, плотность 2,6 г/см<sup>3</sup>. Образуется за счет берилла в гранитных пегматитах, реже в кварцевых жилах, грейзенах и нефелин-пегматитах.

*Гельберtrandит*  $\text{Be}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (BeO 34 %) образует неправильные стекловидные выделения, бледно-фиолетовый, твердость 4, плотность 2,18 г/см<sup>3</sup>.

*Хризоберилл*  $\text{Al}_2[\text{BeO}_4]$  (BeO 18–20%). Содержит примеси  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , Sr. Минерал кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы таблитчатые, призматические, агрегаты зернистые, цвет зеленый различных оттенков, желтый, коричневый, красный, блеск стеклянный, твердость 8,5, плотность 3,75 г/см<sup>3</sup>.

*Барилит*  $\text{BaBe}_2[\text{Si}_2\text{O}_7]$  (BeO 16 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы призматические, таблитчатые, цвет белый, блеск стеклянный, твердость 7, плотность 4,7 г/см<sup>3</sup>. Встречается в ассоциации с гедифаном и кальцитом.

## Применение в промышленности

Бериллий – один из важнейших металлов современной техники и относится к стратегическому сырью высшего ранга. Он используется в самолето- и ракетостроении, а также в гироскопических устройствах систем наведения и ориентации в самолетах, баллистических ракетах, космических кораблях и подводных лодках. Сплавы бериллия с Cu, Pb, Zn и Sn широко применяются для создания неискрящих сплавов, а с Al и Mg – для особых сверхлегких сплавов. Соединения бериллия используются в качестве люминофоров, изоляторов, огнеупоров и т. п. Прозрачная его разновидность – зеленый изумруд является драгоценным камнем, который широко применяется в ювелирном деле.

## Ресурсы и запасы

Прогнозные ресурсы оксида бериллия (BeO) по данным ГНПП «Аэрогеология» *Министерства природных ресурсов РФ* в 1995–2000 гг. оценивались в 2 млн. т. Около 50 % прогнозных ресурсов сосредоточено в Америке (в том числе 35 % в Бразилии) и 20 % в Африке.

Общие запасы оксида бериллия в мире (без России) оцениваются более чем в 1 млн. т. Более 34 % их находится в Бразилии, 15,5 % – в Индии, 9 % в США и 9 % в Китае. Запасы подтвержденные  $\text{BeO}$  составляют 230 тыс. т, из них около 51 % сосредоточено в Америке, 26 % в Азии и 19 % в Африке. Лидерами по подтвержденным запасам  $\text{BeO}$  являются США (48 тыс. т  $\text{BeO}$ , 20,6 % от мировых запасов) и Бразилия (42 тыс. т, 18,2 %). Общие запасы оксида бериллия в России сопоставимы с запасами Бразилии.

Качество бериллоносных руд в значительной степени определяется их минеральным составом, от которого зависит технология обогащения и переработки концентратов. Богатые руды содержат 0,5 %  $\text{BeO}$  и более, бедные – 0,04–0,1 %. Уникальными являются месторождения с запасами около 200 тыс. т  $\text{BeO}$ , крупными – 100–40 тыс. т, рудовыми – 40–10 тыс. т.

В Бразилии большая часть месторождений с промышленными запасами бериллия расположена в северо-восточной части страны (штат Минас-Жерайс). В США крупные месторождения находятся в штате Юта (Спер-Маунтин), а также в штатах Северная Каролина, Южная Дакота, Колорадо и Айдахо. В России большая часть запасов бериллия (95 %) заключена в комплексных рудах, характеризующихся низким (0,03–0,3 %) содержанием оксида бериллия. За исключением Полмостундровского, Ууксу (Карелия и Кольский полуостров), Малышевского и Боевского (Урал), все месторождения бериллийсодержащих руд располагаются в азиатской части России – в Прибайкалье, Забайкалье и на Дальнем Востоке.

## **Добыча и производство**

Добыча бериллиевых концентратов, содержащих 10 %  $\text{BeO}$ , в 1940 г. составляла 1 тыс. т, в 1975 г. – 11 тыс. т. В настоящее время продуктами бериллиевого производства являются берилловые и фенакит-берtrandитовые концентраты, содержащие в среднем 11 %  $\text{BeO}$ . Они служат сырьем для получения конечных бериллиевых продуктов – металлического бериллия, бериллиевых оксидов и бериллиевых сплавов. Мировой объем производства бериллиевых концентратов (в пересчете на металл) в 1996 г. составил

470 т. Ведущими продуцентами бериллиевой продукции являлись США (225 т), Китай (75 т), Россия (70 т) и Бразилия (65 т). Около 2/3 мощностей по производству бериллия сосредоточены в США. Две наиболее крупные компании «*Brush Wellman Inc.*» (*BWI*) и «*Cabot Beryl Co.*» (*CBC*) производят более 70 % бериллийсодержащих продуктов в стране.

## Металлогения и эпохи рудообразования

Промышленные месторождения бериллия формировались на средней и поздней стадиях геосинклинального этапа, а также на стадии активизации платформ в связи с кислым магматизмом.

В *докембрийскую эпоху* возникали преимущественно бериллоносные пегматиты. Основные месторождения бериллия этого возраста сосредоточены в Бразилии, главным образом в северо-восточной ее части, где разрабатывается около 30 месторождений. Месторождение Сабинополис славится крупными кристаллами берилла (250×70 см). Гранитные пегматиты докембрийского возраста разрабатываются также в Аргентине. Здесь наиболее крупные месторождения бериллоносных пегматитов находятся в провинциях Кордова, Сан-Луис и Катамарка, где рудные тела жильной или линзообразной формы прослеживаются по простиранию на 50–200 м, иногда на 1000 м. В США большинство пегматитовых месторождений представлено комплексными рудами, в которых наряду с бериллом содержатся танталит, лепидолит, сподумен. В Индии наиболее значительные месторождения расположены в Слюдяном поясе штатов Бихар и Раджастан.

Промышленные месторождения бериллия *раннепалеозойского возраста* встречаются редко.

В *позднепалеозойскую эпоху* наряду с пегматитами возникали скарново-грейзеновые и кварцево-жильные месторождения. В США основные месторождения этого возраста сосредоточены в Аппалачской складчатой зоне. Крупные поля пегматитов распространены в Канаде (провинция Новая Шотландия). Бериллиевые разности пегматитов приурочены к мусковитовым гранитам и располагаются либо в самих массивах, либо в кварцитах и реже в кристалличе-

ских сланцах, вблизи их контакта с гранитами. Редкометальные бериллоносные пегматиты известны в Западной Европе (Франция, Португалия, Испания), России и Бразилии.

В *мезозойскую эпоху*, в связи с процессами активизации областей консолидированной складчатости и проявившимся при этом субщелочным магматизмом, образовывались фенакит-берtrandит-флюоритовые месторождения. Бериллоносные пегматиты этого возраста встречаются в Афганистане, США, России и других странах.

В *кайнозойскую эпоху* при активизации стабильных структур нередко формировались бериллиевые месторождения, приуроченные к риолитам и их туфам. В США с проявлениями третичного магматизма связано контактово-метасоматическое месторождение бериллия Железная Гора (штат Нью-Мексико). Рудные залежи приурочены к контакту известняков с риолитами, аплитами и гранитами. Руды содержат гелвин и датолит; кроме того, бериллий присутствует в качестве примеси в везувиане, гроссуляре и хлорите. Месторождения бериллия, в которых основными рудными минералами являются берtrandит, фенакит и эвклаз выявлены в ряде штатов США (Юта и др.). Из них наиболее известно крупное месторождение Томас-Рейндж. Кайнозойский возраст имеет месторождение Агуачила в Мексике (штат Коауила), приуроченное к куполообразной структуре. Бериллиевое оруденение связано с брекчированными известняками, развитыми в зоне контакта их с дайкой. Единственный рудный минерал берtrandит. Среднее содержание BeO в руде составляет 0,3%.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Имеющиеся в настоящее время данные позволяют выделить следующие промышленные типы месторождений бериллия: 1) пегматитовые, 2) полевошпатовых метасоматитов, 3) грейзеновые, 4) плутоногенные гидротермальные, 5) вулканогенные гидротермальные.

*Пегматитовые месторождения.* Это традиционный тип месторождений, на долю которых приходится около 90 % мировой добычи бериллия. Берилл из них извлекается, как

правило, попутно при добыче мусковита, тантала, руд цезия и лития. Наиболее распространенная форма пегматитов — линзообразная, с характерной концентрической зональностью и появлением в центральных частях их кварцевых ядер. Максимальный размер пегматитовых тел 750×100 м, мощность до 20 м. Крупные кристаллы берилла обычно располагаются по периферии кварцевых ядер, в крупноблоковых и пегматоидных зонах. Совместно с бериллом встречаются танталит, монацит, циртолит и др.

Бериллсодержащие пегматиты в Южной Америке приурочены к Гвианскому, Восточно-Бразильскому, Аргентино-Боливийскому структурным поясам. В Африке они сосредоточены в пяти структурных поясах: Родезийско-Трансваальском, Центральноафриканском, Восточно-Африканско-Мадагаскарском, Нигерийско-Сахарском и Марокканско-Малийском. В Австралии основная добыча берилла производится на западе и юге страны. В Индии известны четыре основные пегматитовые провинции: Бихарская, Неллурская, Раджастанская и Майсурская.

*Месторождения полевошпатовых метасоматитов* встречаются на древних щитах в пределах длительно развивавшихся зон глубинных разломов. Вмещающие породы — древние граниты, гнейсы, базиты, эффузивы — сильно катаклазированы, разгнейсованы, нередко подвержены процессам микроклинизации, реже альбитизации и грейзенизации. В узлах сопряжения таких зон с оперяющими их тектоническими нарушениями образуются рудные тела, представленные неправильными залежами микроклинов кварц-микроклиновых и кварц-альбит-микроклиновых пород. С ними связано бериллиевое оруденение в форме гентгельвина, реже фенакита. Содержание BeO достигает 0,5 %. Характерны также флюорит, криолит, циртолит, касситерит, реже сульфиды.

Представителем этого типа является месторождение *Сил-Лейк*. Оно находится на п-ве Лабрадор в Канаде. В районе месторождения пластовые тела щелочных сиенитов прорывают переслаивающиеся сланцы и порфиновые вулканы Гренвилльской структуры. В экзоконтактах тел щелочных сиенитов вмещающие породы превращены в фениты — полевошпатовые метасоматиты, обогащенные эгирином, арфведсонитом, альбитом и карбонатами. В породах наблюдается мелкая вкрапленность и прожилки бари-

лита, встречаются также эвдиалит, пироклор и др. Содержание  $\text{BeO}$  колеблется от 0,4 до 0,7 %.

*Грейзеновые месторождения* приурочены к апикальным частям грейзенизированных и альбитизированных гранитных куполов. Они представлены штокверковыми и жильными телами. Берилл встречается в виде мелких (от долей мм до 3–4 мм) рассеянных кристаллов в породе в ассоциации с вольфрамитом, молибденитом или касситеритом, флюоритом, топазом и мусковитом. Основная масса берилла связана с кварц-мусковитовыми и топаз-кварцевыми прожилками.

Минеральный состав грейзенов и бериллиевой минерализации зависит от состава вмещающих пород, подвергшихся грейзенизации. Особенно интересны апогипербазитовые и апокарбонатные грейзены. Первые представлены серией зон флогопитовых слюдитов мощностью от 0,5 до 5 м, среди которых развиты маломощные олигоклазовые, кварц-олигоклазовые и флюорит-олигоклазовые жилы. В них встречаются бериллийсодержащие маргарит и фуксит. Апогранитные грейзены представлены флюоритовыми метасоматитами, развитыми по известнякам, пронизанными по трещинам литиевым маргаритом — эфеситом, фенакитом, сменяющимися с глубиной хризобериллом.

*Плутоногенные гидротермальные месторождения.* Среди них особый интерес представляет формация бертрандит-фенакит-флюоритовых метасоматитов. Она связана с гипабиссальными мелкими куполами альбитизированных граносиенитов, кварцевых сиенитов и щелочных гранитов, развитых в зонах активизации областей консолидированной складчатости. Рудные тела сложены массивными и вкрапленными флюоритовыми породами, содержащими фенакит, бертрандит, реже лейкофан и эпидидимит. Содержание  $\text{BeO}$  в рудах составляет 0,5–1,5 %. Примером месторождений данной формации может служить Агуачила в Мексике и отдельные месторождения в Восточной Сибири в зоне мезозойской тектономагматической активизации (рис. 58).

*Вулканогенные гидротермальные месторождения* приурочены обычно к бортам третичных депрессий и связаны с тектоническими нарушениями, контролирующими распределение вулканоплутоногенных комплексов. Оруденение развито в серицитизированных и окварцованных риолито-

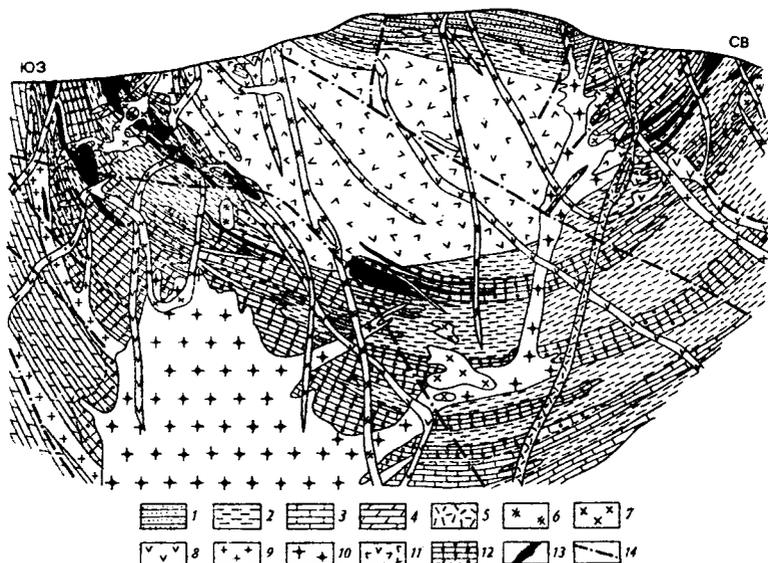


Рис. 58. Геологический разрез берtrandит-фенацит-флюоритового месторождения (по В. Гальченко):

1 — песчаники; 2 — сланцы; 3 — известняки; 4 — доломиты; 5 — фельзит-порфиры; 6 — лейкократовые сиенит-порфиры; 7 — роговообманковые сиенит-порфиры; 8 — диоритовые порфиры; 9 — субщелочные граниты и граносиениты; 10 — биотитовые граниты; 11 — габбро-диориты, гранодиориты и диориты; 12 — скарны; 13 — рудные тела; 14 — тектонические нарушения

вых туфах и туфолавах вблизи штоков и даек риолитов и представлено вкрапленностью, тонкими прожилками и нодулями. Главные рудные минералы: берtrandит и его водные разновидности (гельберtrandит, сфероберtrandит), нерудные — халцедон, опал, адуляр, флюорит, кальцит, анкерит. Содержание  $\text{BeO}$  в рудах достигает 0,5–0,7 %.

Характерным представителем этого типа является уникальное месторождение *Томас-Рейндж (Спер-Маунтин)*, расположенное в штате Юта. Здесь обнажаются палеозойские осадочные и залегающие на них несогласно кайнозойские осадочно-вулканогенные породы. Бериллиевое оруденение локализуется в топазсодержащих риолитах и подстилающих их туфах. Туффиты залегают на различных по возрасту эффузивах и местами на палеозойских доломитах. Рудные тела представлены пласто- и линзообраз-

ными залежами. Наиболее крупное рудное тело с промышленным содержанием бериллия достигает в длину 4 км, а по падению 350 м при мощности до 15 м. Общие запасы месторождения оцениваются во многие миллионы тонн руды со средней концентрацией  $\text{BeO}$  0,5 %. Кроме того, в рудах содержатся значительные количества  $\text{Li}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{U}$  и  $\text{Zn}$ . Основным бериллиевым минералом является берtrandит, рассеянный в туффитах и образующий скопления в гнездах флюорита или в желваках доломитов.

**Месторождения и рудопроявления в Беларуси.** В 1965 г. Белорусской гидрогеологической экспедицией в результате глубинного геологического картирования южной части Беларуси в породах кристаллического фундамента было открыто *Диабазовое месторождение* бериллия и редких земель. Месторождение приурочено к дайке диабазов мощностью до 220 м, прослеживающейся в северо-восточном направлении на протяжении 15 км с юго-восточным падением под углом 55–80° (рис. 59). В центральной части дайки выявлен долгоживущий глубинный Диабазовый разлом северо-восточного простирания, по которому рудные тела смещены на 25–45 м. Максимальные мощности и наиболее высокие концентрации металлов контролируются этим разломом.

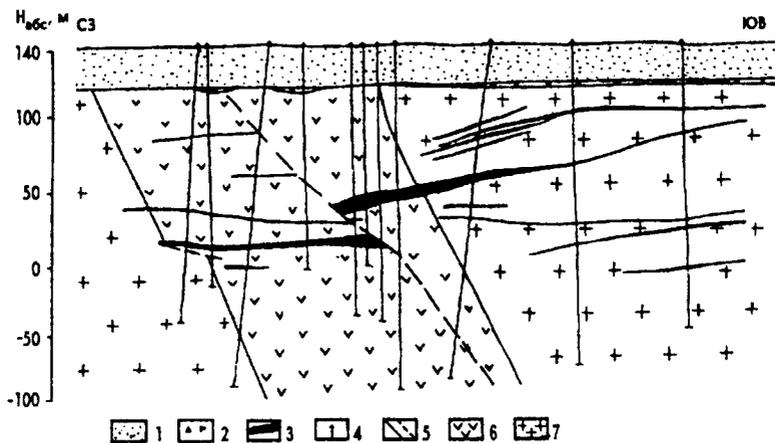


Рис. 59. Диабазовое месторождение. Профильный поперечный разрез (по М. Левому):

1 – пески четвертичного и неогенового возраста; 2 – кора выветривания кристаллических пород; 3 – рудные метасоматиты (тела); 4 – скважины; 5 – тектонические нарушения; 6 – диабазы, метасоматически измененные (житковичский интрузивный комплекс); 7 – граниты метасоматические амфибол-биотитовые

Рудами на месторождении являются различные по составу метасоматиты, образовавшиеся по ослабленным зонам в процессе щелочно-кислотного метасоматоза и представляющие собой пластообразные и линзообразные залежи. Наиболее благоприятными для образования высоких концентраций редких и редкоземельных элементов являлись основные породы, так как различие в химическом составе диабазов и вмещающих гранитов обусловило выпадение их из гидротермальных растворов. Характерны ассоциации редких и редкоземельных элементов и разнообразный набор рудных минералов (гельвин, фенакит, бастнезит, барилит, лейкофан и др.). Распределение минералов жильково-гнездовое, гнездовое, а редкоземельно-бериллиевых крайне неравномерное.

Технологическими исследованиями установлено, что руды месторождения Диабазовое труднообогатимы, но могут быть переработаны по специальным схемам с получением технических гидроксидов редких элементов со сквозным извлечением ценных компонентов. Выполненная геолого-экономическая оценка (М. Г. Левый, Н. Я. Карпович, В. И. Парибок, П. З. Хомич и др.) показала, что разработка месторождения рентабельна. Для увеличения его запасов геологами РУП «Белгеология» рекомендуется изучение юго-западного фланга, где руды залегают несколько глубже, чем в пределах разведанного участка месторождения.

## **МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕДКИХ ТУГОПЛАВКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

К группе редких тугоплавких элементов относятся ниобий, тантал, цирконий и гафний.

### **МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ И ТАНТАЛА**

Ниобий и тантал близки по своим свойствам и всегда встречаются совместно. Оба элемента весьма тугоплавки, пластичны, ковки, сохраняют прочность при высоких температурах, не подвергаются воздействию кислот.

#### **Краткие исторические сведения**

В середине XVII в. в Южной Америке в бассейне р. Колумбии был найден образец тяжелого черного металла с золотистыми прожилками слюды. Полтора века этот образец пролежал в витрине Британского музея в Лондоне под этикеткой «железная руда». В 1801 г. английский химик Ч. Гатчет сделал анализ этого минерала и выделил оксид совершенно незнакомого элемента, назвав его «колумбием». В 1802 г. шведский химик А. Экеберг выделил сходный оксид другого элемента, названный танталом. Оба элемента считались идентичными до тех пор, пока в 1844 г. Г. Розе не доказал, что во всех этих минералах наряду с танталом присутствует еще один элемент, весьма близкий к нему по свойствам, который был им назван ниобием. «Колумбит» Гатчета оказался смесью ниобия и тантала. Название колумбий вплоть до 1949 г. сохранялось за ниобием, пока

не было принято решение оставить за элементом название ниобий.

Тантал — светло-серый металл с синеватым оттенком, температура плавления 2996 °С, температура кипения 5300 °С, обладает свойством пропускать электрический ток в одном направлении, плотность 17,1 г/см<sup>3</sup>, твердость 3,6.

Ниобий — металл серовато-белого цвета, температура плавления 2469 °С, температура кипения 4842 °С, удельная масса 8,6 г/см<sup>3</sup>, твердость 6,5.

## Геохимия

Кларк в земной коре ниобия  $2 \cdot 10^{-3}$  %, тантала  $2,5 \cdot 10^{-4}$  %. Содержания ниобия и тантала увеличиваются от ультраосновных (0,2 г/т Nb и 0,06 г/т Ta) к кислым породам (20 г/т Nb и 4,2 г/т Ta). Известен только один стабильный изотоп ниобия с массовым числом 93 и два стабильных изотопа тантала — <sup>180</sup>Ta и <sup>181</sup>Ta. Концентрации этих элементов связаны с гранитными (особенно Ta), щелочногранитными, нефелин-сиенитовыми, ультраосновными щелочными породами и карбонатитами. Породообразующим аналогом для обоих элементов является титан. Форма нахождения тантала и ниобия в природе может быть различной: рассеянной (в породообразующих и акцессорных минералах магматических пород) и в минеральной (колумбит, пирохлор и др.).

В эндогенных условиях вследствие низкого коэффициента распределения Nb и особенно Ta, в процессе фракционной кристаллизации палингенных магм происходит их накопление в наиболее поздних дифференциатах многофазных интрузивных комплексов. При общности путей миграции тантала и ниобия, постоянном совместном нахождении их в природе протекают и процессы разделения, маркируемые отношением Nb:Ta, которое в среднем для всех пород составляет 10:1–12:1.

В экзогенных условиях минералы ниобия и тантала, являясь устойчивыми, могут накапливаться в делювиальных и аллювиальных россыпях, иногда в бокситах кор выветривания (месторождения бокситов в штате Арканзас).

## Минералогия

Известно более 50 минералов, содержащих Nb и Ta. Из них основное промышленное значение имеют колумбит-танталит, пирохлор (и его танталовый аналог микролит), лопарит, эвксенит, торолит, фергусонит. Промышленный интерес представляют также минералы, содержащие Ta и Nb в виде примесей — ильменит, касситерит, вольфрамит и др.

*Колумбит-танталит*  $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$  (содержание  $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$  75–86 %) кристаллизуется в ромбической сингонии, кристаллы призматические и таблитчатые, цвет железно-черный до буро-черного, твердость 6–6,5, плотность 5,2–7,9 г/см<sup>3</sup>.

*Пирохлор*  $\text{NaCaNb}_2\text{O}_6\text{F}$  (зеленеет при прокаливании), обычно содержит примеси Ta, Y, TR, U, Th, Fe, Ti. При полном замещении Nb на Ta — *микролит*. Минерал кристаллизуется в кубической сингонии, габитус кристаллов октаэдрический, цвет желтый, бурый до черного, твердость 5–5,5, плотность 4,2–6,4 г/см<sup>3</sup>. Встречается в щелочных горных породах и пегматитах, а также в карбонатитах. Руда Nb, Th, Ta и U. Известны разновидности: *эльсворит*, *гатчеттолит*, *титанпирохлор*, *уранпирохлор*, *микролит*, *обручевит*, *мариньякит*, *плюмбонпирохлор*.

*Лопарит*  $(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$  ( $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$  8–20 %), обычно содержит примеси  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ThO}_2$  и др. Минерал кристаллизуется в кубической сингонии, кристаллы кубические, кубооктаэдрические, цвет черный, черта коричнево-бурая, блеск полуметаллический, твердость 5,5–6, плотность 4,6–4,9 г/см<sup>3</sup>. Встречается в щелочных и нефелиновых сиенитах с арфведсонитом, эгирином, апатитом, эвдиалитом, астрофиллитом, сфеном.

## Применение в промышленности

Ниобий применяется главным образом в качестве легирующей добавки (в виде феррониобия) к различным сортам сталей, чугуна и сплавов — конструкционных, жаропрочных, кислотоупорных и других, которые широко используются в авиации, ракетостроении, атомных реакторах, судостроении, в производстве железнодорожного и горного оборудования.

Тантал в основном применяется в электровакуумной технике, электронике, в управляемых ракетах, космических кораблях, спутниках. Он используется в атомной технике и в изготовлении сверхжаропрочных сплавов. На основе тантала созданы самые тугоплавкие сплавы с температурой плавления 4400 °С. Карбид тантала характеризуется наибольшей твердостью, приближающейся к твердости алмаза.

## Ресурсы и запасы

По оценке ГНПП «Аэрогеология» Министерства природных ресурсов РФ мировые прогнозные ресурсы ниобия (в пересчете на  $Nb_2O_5$ ) в 1996 г. составляли 110–120 млн. т. Около 95 % их связано с карбонатитами и корами выветривания, развитых на карбонатитах.

Общие запасы  $Nb_2O_5$  в мире (без России) в 1996 г. оценивались в 15,7 млн. т, однако в связи переоценкой (отнесением значительной части запасов к нерентабельным) они резко сократились и в 1997 г. составили всего лишь 4,4 млн. т. Преобладающая часть общих запасов  $Nb_2O_5$  сосредоточена в Бразилии (82 %) и Канаде (9 %). Они сконцентрированы в основном в уникальных месторождениях в корах выветривания карбонатитов (Араша, Тапира, Сейс-Лагос). На долю месторождений Африки приходится около 5 % и Австралии (2,5 %). Общие запасы России сопоставимы с запасами Бразилии, однако руды по качеству уступают бразильским.

Подтвержденные запасы пентоксида ниобия к началу 1997 г. в мире составляли 3,6 млн. т. Основные объемы их заключены в недрах Бразилии (90,9 %) и Канады (3,9 %). В России запасы  $Nb_2O_5$  сосредоточены в Северном и Восточно-Сибирском регионах и заключены в основном в коренных месторождениях. Более половины промышленных запасов приходится на комплексные (Ta–Nb) руды.

Мировые ресурсы тантала (без России) в пересчете на  $Ta_2O_5$  в 1996–2000 гг. оценивались в 640 тыс. т при содержании  $Ta_2O_5$  около 0,02 %. Примерно 70 % их сконцентрировано в редкометальных щелочных гранитах и сиенитах. Ресурсы России сосредоточены в основном в комплексных (Nb, Ta, Be, TR и др.) редкометальных метасоматических месторождениях и по оценке ВИМСа составляют 170 тыс. т  $Ta_2O_5$ .

Общие запасы  $Ta_2O_5$  в мире достигают 90 тыс. т, а подтвержденные – 61,8 тыс. т. Основными странами-держателями танталовых руд являются: Франция (18,6 %), Египет (16,2 %), Таиланд (13,9 %), Китай (12,3 %), Мозамбик (9,1 %), Австралия (7,3 %) и Нигерия (5,2 %).

Танталовые руды зарубежных месторождений отличаются достаточно высоким качеством (содержание  $Ta_2O_5$  в них колеблется от 0,15 до 0,20 %). Российские руды характеризуются более низким качеством (содержание  $Ta_2O_5$  0,004–0,02 %).

## Добыча и производство

Производство ниобиевой продукции осуществляется в основном (более 95 %) из пирохлоровых концентратов и лишь в незначительном количестве – из колумбитовых и танталитовых концентратов. Мировое производство ниобия (в пересчете на металл) в 1995–2000 гг. составляло 17–20 тыс. т (без России). Странами-лидерами в этой отрасли являются Бразилия (15–15,5 тыс. т) и Канада (2,3–2,5 тыс. т).

В Бразилии крупнейший продуцент ниобия – рудник Араша в штате Минас-Жерайс, принадлежащий фирме «*Cia Brasileira de Metalurgia Mineracao*» (CBMM). Второй производитель ниобия в Бразилии – фирма «*Mineralo Catalao*» в штате Гояс разрабатывает месторождения Каталан-1 и Увидор-Каталан. В России более 80 % всего добываемого ниобия получали из лопаритовых руд Ловозерского месторождения.

По данным Горного бюро США общий объем производства тантала в мире в 1995–2000 гг. оценивался в 1300–1350 т. Более 80 % производства тантала из руд осуществляется в 4 странах – Австралии (более 50 %), Китае, Бразилии и Канаде. В Австралии основным источником тантала является месторождение Гринбушес, принадлежащее компании «*Gwalia Consolidated Ltd.*» (GC). В России добыча лопаритовых руд на последнем из эксплуатируемых месторождений Ловозерском была прекращена в 1997 г.

## Металлогения и эпохи рудообразования

Месторождения тантала и ниобия формировались на средней и поздней стадиях геосинклинального этапа в связи с гранитным магматизмом, а также на стадии активизации платформ в связи с щелочными интрузиями и щелочными глубинными растворами.

Танталоносные пегматиты известны всех возрастов, но наиболее продуктивной была *докембрийская эпоха*. В это время сформировались наиболее крупные и богатые месторождения (Берник-Лейк в Канаде, Бикита в Зимбабве, Воджина в Австралии и др.). Карбонатиты, с которыми связано танталовое и ниобиевое оруденение, имеют возраст не древнее 1,8 млрд. лет, но чаще всего они фанерозойские. Наиболее крупные месторождения, приуроченные к карбонатитам, образовались в *мезозойскую эпоху*. Это многочисленные месторождения в Бразилии, в том числе такие уникальные как Араша, Тапира и Каталан. В *кайнозойскую эпоху* возник ряд карбонатитовых массивов в Кении, Уганде, а также Германии (месторождение Кайзерштуль). В кайнозое сформировалось преобладающее большинство россыпных месторождений, где минералы этих металлов извлекаются попутно с касситеритом (Нигерия, Заир, Малайзия, Таиланд и др.).

## Генетические типы промышленных месторождений

К промышленным типам ниобиевых и танталовых месторождений принадлежат: 1) магматические, 2) пегматитовые, 3) альбититовые, 4) полевошпатовых метасоматитов, 5) карбонатитовые, 6) выветривания, 7) россыпные.

*Магматические месторождения* тантала и ниобия связаны как с нормальными и щелочными гранитами, так и с массивами щелочных пород. Они известны в Нигерии, на о. Гренландия, Кольском полуострове. Общей особенностью месторождений колумбитоносных гранитов является приуроченность оруденения к апикальным частям интрузивов. К магматическому типу принадлежат также лопаритоносные стратифицированные массивы нефелиновых сие-

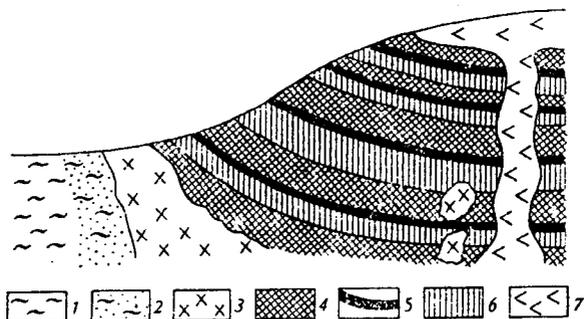


Рис. 60. Схематический геологический разрез массива стратифицированных нефелиновых сиенитов (по В. Смирнову): 1 — гнейсы архея; 2 — фениты; 3 — пойкилитовые и порфиридные нефелиновые сиениты; 4–6 — стратифицированный комплекс: 4 — фойяиты, 5 — лопаритовые луавриты, 6 — уртиты; 7 — эвдиалитовые луавриты

нитов (рис. 60). Такие массивы сложены стратифицированными породами ряда луавриты — фойяиты — уртиты. Главным рудным минералом является лопарит, представляющий собой комплексное сырье, из которого извлекаются Nb, Ta, TR и Ti.

*Пегматитовые месторождения* также играют существенную роль в добыче ниобия и тантала. Эти элементы извлекаются попутно из сподуменовых пегматитов и пегматитов, содержащих поллуцит. Танталовая минерализация представлена колумбит-танталитом, иксиолитом и манган-танталитом.

*Карбонатитовые месторождения* являются важнейшим источником руд ниобия и тантала. Месторождения этого типа располагаются на платформах, древних щитах и контролируются глубинными разломами. Среди них выделяются округлые массивы центрального типа, а также линейно вытянутые зоны карбонатитов в древних толщах. Карбонатитовые месторождения весьма широко распространены в Южной Америке и Африке, где с ними связаны промышленные запасы ниобия и тантала ряда уникальных месторождений.

*Россыпные месторождения.* Значительная часть ниобия и тантала в мире добывается из кор выветривания карбонатитов, пегматитов и гранитов и связанных с ними делювиально-элювиальных и аллювиальных россыпей. В свя-

зи с хрупкостью минералов тантала и ниобия они переносятся на относительно небольшие расстояния (не более 1–2 км). Поэтому концентраты россыпей имеют, как правило, танталит-касситеритовый состав и касситерит в них превалирует над танталитом. Наиболее крупные россыпные месторождения известны в Нигерии, Заире и Бразилии. В ряде стран (Таиланд, Малайзия, Индия и др.) танталит извлекают попутно из циркон-ильменитовых, монацитовых, оловоносных и других россыпей.

## **МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ**

Оба элемента весьма близки по свойствам и всегда встречаются совместно.

### **Краткие исторические сведения**

Минерал циркон был известен еще в глубокой древности, причем прозрачные и красноокрашенные его разновидности применялись как драгоценный камень. Цирконий открыт в 1791 г. немецким химиком М. Клапротом в цирконе, из которого впервые был выделен в виде оксида циркония  $ZrO_2$ . Чистый цирконий был получен в 1914 г. Это прозрачный и пластичный металл серебристо-белого цвета, температура плавления его  $1830^\circ C$ , плотность  $6,6 \text{ г/см}^3$ , активно поглощает газы.

Гафний был предсказан Д. И. Менделеевым, а открыт датскими учеными Г. Гевеши и Д. Костером в 1923 г.

Гафний — металл с плотностью  $13,31 \text{ г/см}^3$ , температурой плавления  $2230^\circ C$ , очень ковкий активно поглощающий газы.

### **Геохимия**

Кларк циркония (по А. П. Виноградову)  $1,7 \cdot 10^{-2} \%$ , гафния  $1 \cdot 10^{-4} \%$ . Цирконий — литофильный элемент, образующий оксид  $ZrO_2$  и многочисленные силикаты. Гаф-

ний изоморфно замещает цирконий и является его полным геохимическим аналогом. Гафний также относится к литофильным элементам. Известны стабильные изотопы циркония с массовыми числами 90, 91, 92, 94 и 96 и стабильные изотопы гафния с массовыми числами 174, 176–180, из которых преобладает  $^{180}\text{Hf}$ .

Цирконий накапливается в щелочных породах, в которых содержание его примерно в 2 раза выше, чем в гранитоидах. На магматическом этапе цирконий образует свои собственные акцессорные минералы в гранитных магмах и не участвует в постмагматическом рудообразовании. И только при развитии щелочного магматизма он концентрируется в высокотемпературных постмагматических растворах. Гафний всегда следует за цирконием. При фракционной кристаллизации гафний отстает от циркония и накапливается в наиболее поздних, остаточных образованиях. Максимальные концентрации гафния (до 10–15 %  $\text{HfO}_2$ ) наблюдаются в поздних цирконах (малаконах, альвитах), образовавшихся в процессе щелочного метасоматоза. Таким образом, гафний собственных минералов не образует.

## Минералогия

Наиболее широко распространенными и практически важными минералами являются циркон, бадделейт и эвдиалит.

*Циркон*  $\text{ZrSiO}_4$  (содержание  $\text{ZrO}_2$  67,1 %). В нем наблюдаются примеси Hf, Th, U, TR, Ca, Na, Al, P, S и других элементов. Минерал кристаллизуется в тетрагональной сингонии, габитус кристаллов – разнообразные комбинации призм и дипирамид, цвет коричневый, блеск алмазный, жирный, твердость 6,5, плотность 4,0–5,1 г/см<sup>3</sup>. Встречается в гранитоидных и щелочных породах, пегматитах, альбититах, карбонатитах, а также в россыпях.

*Бадделейт*  $\text{ZrO}_2$  ( $\text{ZrO}_2$  до 73,9 % и  $\text{HfO}_2$  до 1–3 %) (по фамилии Бадделей), содержит примеси Hf, TR, Th и др., кристаллизуется в моноклиальной сингонии, кристаллы удлиненные и таблитчатые, цвет от бесцветного до серого и черного, блеск жирный, стеклянный, твердость 6,5, плотность 5,4–6,0 г/см<sup>3</sup>. Встречается в нефелиновых сиенитах, карбонатитах, алмазоносных и других россыпях.

*Эвдиалит*  $(\text{Na,Ca})_5(\text{Zr,Fe,Mn})[\text{Si}_6\text{O}_{17}][\text{O,OH,Cl}]$  (содержание Zr 12–14,5 %). Кристаллизуется в тригональной сингонии, кристаллы таблитчатые, призматические, ромбоэдрические, цвет малиново-красный, буро-розовый, твердость 5–5,5, плотность 2,7–3,0 г/см<sup>3</sup>. Встречается в ультращелочных нефелиновых сиенитах и пегматитах (называют также «лопарской кровью»).

## Применение в промышленности

Оба элемента широко применяются в атомной и других отраслях промышленности в виде главным образом брикетов урана, тория и циркония. Цирконий пропускает нейтроны, не поглощая их, что делает его лучшим материалом для атомной промышленности (в этих целях используется сверхчистый цирконий). В ядерных реакторах разного назначения (АЭС, энергетические установки надводных кораблей, подводных лодок) применяются преимущественно сплавы циркония с оловом, железом, никелем и хромом. Он используется для легирования сталей (броневых сталей), сплавов цветных металлов, которые широко применяются в ракето-, самолето- и автостроении. Цирконий — важное сырье для изготовления огнеупоров, которые не смачиваются большинством расплавленных металлов, что имеет особое значение при выплавке металлов высокой чистоты.

Гафний обладает свойством интенсивно поглощать нейтроны, поэтому применяется для борьбы с радиацией. Его сплавы в форме карбида используются в наиболее жаропрочных изделиях (температура плавления 3900 °С).

## Ресурсы и запасы

В настоящее время ресурсы и запасы циркония в мире связаны с двумя циркониевыми минералами — цирконом и бадделейтом. На долю первого приходится примерно 95 % мировых запасов и производства циркониевых концентратов, на долю второго — около 5 %. Ресурсы диоксида циркония ( $\text{ZrO}_2$ ) в прибрежно-морских россыпях и массивах щелочно-ультраосновных пород на начало 1997 г. состав-

ляли около 100 млн. т. По оценке специалистов ГНПП «Аэрогеология» *Министерства природных ресурсов РФ* значительное количество ресурсов (около 400 млн. т) связано с нетрадиционными, пока непромышленными видами циркониевого сырья: эвдиалитсодержащими щелочными и фельдшпатоидными породами (Гренландия, США, Россия), цирконийсодержащими битуминозными песчаниками (Канада), щелочными эффузивами (Австралия), золотоносными россыпями и песчано-гравийными отложениями (США, Россия и др.).

Общие мировые запасы диоксида циркония на начало 1997 г. составляли 97 млн. т, запасы подтвержденные 63 млн. т. Основными странами-держателями этого вида минерального сырья являются Австралия (42,6 %), ЮАР (22,6 %), Украина (9,5 %), США (8,4 %) и Россия (7,2 %). В Австралии почти все запасы циркония связаны с многочисленными комплексными титан-циркониевыми россыпями, которые известны как на восточном, так и западном побережьях континента. Преобладающая часть разведанных запасов циркония в России связана с рудами комплексных редкометалльных месторождений в метасоматически измененных щелочных гранитах (Улуг-Танзек, Катугинское и др.).

Крупными считаются россыпные месторождения с запасами более 200–300 млн. м<sup>3</sup> продуктивных песков, мелкими – менее 30–70 млн. м<sup>3</sup>, богатыми – с содержанием циркона более 30–35 г/м<sup>3</sup>, бедными – до 20 г/м<sup>3</sup> (при пересчете попутного ильменита на условный циркон из расчета 3:1).

Основную массу гафния получают из циркона. По данным *Горного бюро США* запасы гафния в мире оцениваются в 540–600 тыс. т. Странами-лидерами по подтвержденным запасам этого металла являются Австралия и ЮАР.

## **Добыча и производство**

Добыча цирконовых концентратов (содержащих ZrO<sub>2</sub> 66 %) составляла в промышленно развитых и развивающихся странах в 1975 г. 500 тыс. т, в 1990 г. – 800 тыс. т, в 1995–2000 гг. мировая добыча (без России) – около 1 млн. т. Крупнейшими производителями цирконовых концентрата-

тов являются Австралия (50 % мирового производства), ЮАР, Бразилия, Индия, Китай, Малайзия, Шри-Ланка, Таиланд и Вьетнам.

В Австралии крупнейший продуцент цирконовых концентратов – компания «*Renison Goldfields Consolidated*» (RGC). В 1995 г. она произвела более 280 тыс. т этих концентратов. В ЮАР, выпускающей более 30 % мирового производства цирконовых концентратов, ведущей является компания «*Richards Bay Minerals*». В России получают бадделитовый концентрат попутно на Ковдорском горно-обогатительном комбинате (4,5–5 тыс. т в год) из «хвостов» железорудного производства.

Производство гафния в мире не превышает 40–50 т в год.

## **Металлогения и эпохи рудообразования**

В эндогенных условиях цирконий накапливается на средней и поздней стадиях геосинклинального этапа в гранитоидах (в виде акцессорных минералов), а также на стадии активизации платформ в щелочных породах (в виде акцессорных циркона и эвдиалита). В экзогенных условиях циркон весьма устойчив и концентрируется в россыпях.

Магматические интрузивные породы (гранитоиды, ультраосновные-щелочные, карбонатиты), с которыми связана циркониевая минерализация, известны всех возрастов, но наиболее продуктивными были *докембрийская* и *мезозойская эпохи рудообразования*. В *кайнозойскую эпоху* образовались многочисленные россыпные месторождения.

## **Генетические типы промышленных месторождений**

Известны следующие типы промышленных месторождений циркония: 1) магматические, 2) пегматитовые, 3) россыпные.

*Магматические месторождения.* Цирконий в месторождениях этого типа связан с гранитоидами, полевошпатовыми метасоматитами, нефелиновыми сиенитами, ультраосновными щелочными породами и карбонатитами. При-

мерами магматических циркониевых месторождений, приуроченных к щелочным породам, являются массивы Ловозерский (Карелия) и Илимауссак (Гренландия). Богатая циркониевая минерализация (в виде эвдиалита, розенбушита, ловенита и цирконолита) наблюдается нередко в зонах фенитизации щелочных массивов.

*Пегматитовые месторождения.* Цирконий попутно извлекается из пегматитов, сложенных кислыми и реже щелочными породами. Циркониевая минерализация представлена обычно цирконом. Удельный вес месторождений этого типа в добыче и производстве цирконовых концентратов невелик.

*Россыпные месторождения* в настоящее время являются главным промышленным типом. Среди них различают древние и современные прибрежно-морские россыпи. *Древние морские россыпи* имеют резко подчиненное значение в общем балансе запасов циркония. На Украине известно относительно крупное *Самотканское месторождение* титанцирконовых россыпей в олигоцен-миоценовых отложениях. Источником их образования являлись метаморфические породы (амфиболиты, гнейсы, сланцы и др.) Украинского кристаллического щита.

*Современные прибрежно-морские россыпи* — главный промышленный тип цирконовых месторождений. Среди них выделяются пляжные, шельфовые, дюнные и дельтовые россыпи. Современные прибрежно-морские россыпи распространены вдоль океанических побережий Австралии, Индии, Китая, Намибии, Бразилии, США и других стран.

Наиболее крупные современные россыпи циркона, в состав которых входят также рутил, ильменит, реже монацит, расположены в Австралии. Они известны на восточном и западном побережьях. Наиболее богатые месторождения располагаются в устьях рек, впадающих в океан, а также на открытых прибою берегах. При сильных штормах выработанные пляжевыми россыпями частично регенерируются. Наряду с пляжевыми россыпями непосредственно за ними на суше располагаются рудные «фордюны», образованные в результате передувания песков ветром. Некоторые дюны имеют высоту до 15 м и прослеживаются на несколько километров.

На восточном побережье Австралии крупнейшим является месторождение Стердбок на о. Северный, общие за-

пасы диоксида циркония которого оцениваются в 1,4 млн. т при среднем содержании циркона 0,3 % (или 5 кг/м<sup>3</sup>). Здесь известно еще несколько достаточно крупных месторождений — о. Фразер, о. Моретон, о. Тамаго и др.

На западном побережье Австралии расположены главные промышленные россыпные месторождения, многие из которых интенсивно эксплуатируются. Среди них наиболее крупные и богатые — Энибба (запасы диоксида циркония более 4 млн. т при содержании  $ZrO_2$  0,3–1,7 %), ВИМ — 150 (3,4 млн. т,  $ZrO_2$  0,3–0,4 %), Кэйнел (2,4 млн. т,  $ZrO_2$  0,4–0,8 %), Кулджарлу (0,8 млн. т,  $ZrO_2$  0,2–0,3 %).

Рудопроявления в Беларуси. В настоящее время выявлено несколько перспективных участков развития древних погребенных россыпей (Кобринский, Микашевичский, Житковичский и др.), в которых наряду с титаном и рутилом, в значительных количествах присутствует циркон. Краткая информация об этих участках приведена в главе 4 «Месторождения титана».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемом учебном пособии освещены основные разделы современного курса «Месторождения металлических полезных ископаемых», читаемого студентам-геологам в Белорусском государственном университете для специальности I 51.01.01. — «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

Изложение материала структурировано следующим образом: сначала приводятся краткие исторические сведения, геохимические особенности и основные минералы — концентраты рассматриваемого элемента, генетические типы промышленных месторождений, далее следует краткий обзор металлогении и основных эпох рудообразования, предоставляются сведения по ресурсам, запасам, добыче, производству и применению в промышленности. В конце каждой главы приводятся сведения о месторождениях и рудопроявлениях данного элемента, имеющих на территории Беларуси.

Данный курс представляет большой интерес, т. к. для человечества проблема обеспечения минерально-сырьевыми ресурсами необычайно важна. По оценкам специалистов, в связи с увеличением численности населения Земли к 2050 г. потребление полезных ископаемых возрастет, как минимум на 25–30 %. Дальнейшее повышение уровня экономики, в первую очередь в развивающихся странах, приведет к росту потребности в сырье еще на 25–30 %. Для того, чтобы избежать «сырьевого голода», необходимо, чтобы количество разведанных запасов росло на 1–2 % в год.

В настоящее время разведанными запасами различных видов сырья промышленность обеспечена в разной степени. Например, запасов черных металлов (железа, марганца, хрома) хватит на несколько сот лет, цветных металлов меньше: никелем мы обеспечены на 70, медью на 45, свинцом и цинком менее чем на 40, молибденом на 60, оловом на 30 лет.

Распределены месторождения также крайне неравномерно. Некоторые страны обладают гигантскими запасами тех или иных полезных ископаемых, другие не имеют их совсем. Например, золото добывают в 84 странах, однако половина мировых запасов находится в ЮАР. Там же сосредоточено 98 % всех платиноидов. 80 % мировых запасов хрома принадлежат двум государствам — Казахстану и ЮАР, 70 % марганца — тоже двум — Украине и ЮАР. Половина всего циркония Земли — в месторождениях Австралии. Поэтому поиски полезных ископаемых, даже тех, которыми мировая экономика в целом вроде бы обеспечена, остаются весьма актуальными для многих стран. К их числу относятся и Беларусь, и Россия, и Украина.

Наряду с количеством очень важно и качество полезных ископаемых. Большие запасы сами по себе еще не гарантируют экономическую значимость месторождения. Надо, чтобы сырье было легкодоступно, а полезные компоненты легко извлекались из руд. Некоторые месторождения по этой причине не осваиваются.

Также важно для интенсивности поисков, разведки и добычи полезных ископаемых состояние сырьевого рынка: в одних видах сырья потребность снижается, в других — возрастает. Так, активные поиски урановых месторождений начались только в середине 40-х гг. XX века. Добыча радиоактивных элементов сначала достигла подъема (вплоть до 1979 г.), а затем, в связи с участившимися авариями на ядерных объектах и с активными антиядерными программами, — со второй половины 80-х гг. — наблюдался довольно сильный спад, вплоть до закрытия некоторых рудников в Канаде, США, ЮАР и других странах. В дальнейшем прогнозируется повышение спроса на этот вид сырья из-за энергетического кризиса, поскольку реальная замена атомной энергии отсутствует.

Примерно то же можно сказать и о редкоземельных металлах. Спрос на эти элементы выше всего в узкой группе промышленно развитых стран, в первую очередь в США, Японии, в меньшей степени — в Германии, Англии и Франции. Львиная доля добываемых сейчас редкоземельных элементов (до 80 %) используется в нефтяной, керамической, стекольной промышленности и металлургии. Два гигантских месторождения — Маунтин-Пасс в США и Бейян-Обо в Китае — обеспечивают до 60 % потребляемо-

го сырья. Остальная часть поступает из нескольких очень крупных прибрежных морских россыпей Западной Австралии (Энеабба, Капел, Хоршам), Южной Индии (Траванкур), Южной Америки (Эспирито-Санто), Южной Африки (Ричардс-Бей). В России небольшой пока спрос на редкоземельные элементы обеспечивают два месторождения Кольского полуострова — Ковдорское и Хибинское. В дальнейшем таких месторождений, несомненно, потребуются больше. Ведь многие новейшие технологии опираются на уникальные свойства редких металлов и их сплавов. В таких отраслях как аэрокосмическая техника, атомная промышленность, электроника, волоконно-оптическая связь и многие другие, применению редких металлов нет альтернативы.

К сожалению, новые месторождения обычно хуже и беднее старых. Богатые и легкодоступные руды уже почти отработаны. В дальнейшем придется рассчитывать только на открытие месторождений, глубоко залегающих, или расположенных в трудно доступных регионах, или же содержащих руды более низкого качества. Кроме того, нужно иметь в виду, что с момента открытия месторождения до начала его промышленного освоения обычно проходит 10—15 лет.

Все это приводит к неизбежному удорожанию металлов и заставляет искать иные, нетрадиционные источники сырья. В ближайшем и отдаленном будущем ученые прогнозируют два источника. Во-первых, будут развиваться новые технологии переработки сырья, позволяющих добывать металл из бедных и некачественных руд (возможно, обычных горных пород). Во-вторых, предполагается дальнейшее освоение ресурсов Мирового океана: морской воды, дна и особенно морских недр. В наши дни ежегодная добыча полезных ископаемых превышает 25 млрд. тонн, из них более 3 млрд. тонн поступает из морских месторождений, а в дальнейшем, по прогнозам, станет преобладающей. Подсчитано, что при современном уровне потребления морские месторождения могут обеспечивать мировую промышленность медью в течение 2 тыс. лет, никелем — 70 тыс. лет, марганцем — 140 тыс. лет, кобальтом — 420 тыс. лет. Однако львиная доля этих запасов пока еще недоступна и останется недоступной в ближайшем будущем.

# ЛИТЕРАТУРА

## Основная

1. *Быховер Н. А.* Распределение мировых ресурсов минерального сырья по эпохам рудообразования. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1984. — 576 с.
2. *Вольфсон Ф. И., Дружинин А. В.* Главнейшие типы рудных месторождений.: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. — М.: Недра, 1982. — 383 с.
3. Курс месторождений твердых полезных ископаемых: Учеб. пособие для вузов / П. М. Татаринцов, А. Е. Карякин, А. С. Голиков и др. — Л.: Недра, 1975. — 631 с.
4. Курс рудных месторождений / В. И. Смирнов, А. И. Гинзбург, В. М. Григорьев, Г. Ф. Яковлев: Учеб. для вузов / Под ред. В. И. Смирнова. — М.: Недра, 1981. — 348 с.
5. Месторождения полезных ископаемых / В. А. Ермолов и др.: Учеб. для вузов. — М.: МГУ, 2001. — 571 с.
6. Минеральные ресурсы мира / Под ред. Л. В. Оганесяна. — М.: ГНПП «Аэрогеология», 1998. — 738 с.
7. *Смирнов В. И.* Геология полезных ископаемых. — М.: Недра, 1982. — 688 с.
8. *Старостин В. И., Дергачев А. Л., Семинский Ж. В.* Структуры рудных полей и месторождений: Учеб. для вузов. — М.: МГУ, 2002. — 351 с.

## Дополнительная

9. *Батурин Г. Н.* Рудный потенциал океана // Природа (Россия). 2002. — №5. — С.20–30.
10. *Белевцев Я. Н.* Урановые месторождения Канады // Геология рудных месторождений, 1973. — №2.— С. 13–27.
11. *Бергер В. И.* Сурьмяные месторождения (закономерности размещения и критерии прогнозирования) — Л.: Недра, 1978. — 294 с.
12. *Билибин Ю. А.* Основы геологии россыпей. М.: АН СССР, 1955.— 472 с.
13. Благородная минерализация вкрапленных руд Норильского рудного узла / М. З. Комарова, С. М. Козырев, В. А. Люлько, С. А. Вилинский // Недра Таймыра, 2000. — №4.— С. 122–136.
14. *Борисенко Л. Ф.* Ванадий (Минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений).— М.: Недра, 1973. — 191 с.

15. *Борисенко Л. Ф.* Месторождения титана // Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Т. 1. — М.: Недра, 1978. — С. 225–243.
16. *Бороданов В. М.* Вольфрам // Разведка и охрана недр, 2001. — № 11–12. — С. 36–40.
17. *Бушинский Г. И.* Геология бокситов. — М.: Недра, 1975. — 366 с.
18. *Быбочкин А. М.* Месторождения вольфрама и закономерности их размещения. — М.: Недра, 1965. — 236 с.
19. *Валетон И.* Бокситы / Пер. с англ. — М.: Мир, 1974. — 212 с.
20. *Варенцов И. М., Рахманов В. П.* Месторождения марганца // Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Т. 1. — М.: Недра, 1978. — С. 112–171.
21. *Волков А. В., Сидоров А. А.* Уникальный золоторудный район Чукотки. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. — 180 с.
22. *Вольфсон Ф. И., Некрасов Е. М.* Особенности локализации рудных тел свинцово-цинковых месторождений в различных структурных этажах — М.: Наука, 1968. — С. 226–284.
23. Вопросы геологии и минералогии бокситов / Пер. с англ. и франц. / Под ред. В. П. Петрова — М.: Мир, 1964. — 482 с.
24. *Высоцкий Н. К.* Платина и районы ее добычи. — М.: АН СССР, 1925. — 692 с.
25. *Высоцкий Э. А., Демидович Л. А., Деревянкин Ю. А.* Геология и полезные ископаемые Республики Беларусь: Учеб. пособие для вузов. — Мн.: Універсітэцкае, 1996. — 184 с.
26. *Газизова К. С.* Геолого-структурные и генетические особенности медного месторождения Коунрад. — М.: Госгеолтехиздат, 1957. — 130 с.
27. Геология и полезные ископаемые Мирового океана / Е. А. Величко, Ю. Я. Кузнецов, Л. Э. Левин и др. — М.: Недра, 1978. — 207 с.
28. Геология постмагматических ториево-редкометалльных месторождений / Под ред. В. А. Невского. — М.: Атомиздат, 1972. — 395 с.
29. Головкин Н. И., Веригин М. И, Медведовский С. Я. Железорудные провинции, генетическая и геолого-промышленная классификация железорудных месторождений // Железорудная база России. Ч. 1–2. Черная металлургия СССР в 1956–1990 годах. Черная металлургия Российской Федерации в 1991–1994 гг. и ее железорудная база. — М.: Геоинформмарк, 1998. — С. 209–240.
30. Горная энциклопедия в 5-и томах / Гл. ред. Е. А. Козловский. — М.: Сов. Энциклопедия. Т. 1, 1984. — 560 с.; Т. 2, 1985. — 575 с.; Т. 3, 1987. — 592 с.; Т. 4, 1989. — 623 с.; Т. 5, 1991. — 541 с.
31. *Григорьев В. М.* Месторождения железа // Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Т. 1. — М.: Недра, 1978. — С. 10–110.
32. *Григорьев В. М.* Генетические особенности железорудных провинций мира. Смирновский сборник — 2002 (научно-литературный альманах). — М.: ВИНТИ, 2002. — С. 95–112.

33. *Данчев В. И., Стрелянов Н. П.* Экзогенные месторождения урана. — М.: Атомиздат, 1979. — 245 с.
34. *Деревянкин Ю. А.* Типохимические особенности и проблема золота из антропогенных отложений Беларуси // Литосфера, 1994. — № 1. — С. 176–181.
35. *Дмитриев Н. А.* Ванадий // Разведка и охрана недр, 2001. — № 11–12. — С. 28–31.
36. *Дмитриев Н. А.* Никель // Разведка и охрана недр, 2001. — № 11–12. — С. 31–33.
37. Докембрийская железорудные формации мира / Пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 268 с.
38. *Домарев В. С.* Геология урановых месторождений капиталистических стран. — М.: Госнаучтехиздат, 1956. — 272 с.
39. Железистые кварциты и богатые железные руды Курской магнитной аномалии / Под ред. И. П. Бардина. — М.: АН СССР, 1955. — 690 с.
40. Железные руды / Н. И. Голивкин, Н. Ю. Шапошников, Д. М. Ефремов, С. Я. Медведовский // Разведка и охрана недр, 2001. — № 11–12. — С. 5–16.
41. Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики: Тр. Всерос. совещ., Магадан, 4–6 сент., 1997. Т. 1. Геология, геохронология и геохимия. Под ред. В. И. Гончарова. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. — 251 с.
42. Золотоносность зеленокаменных поясов: Учеб. пособие для вузов / В. М. Никитин, С. Е. Поповченко, В. И. Жижин, В. А. Янжин-шин. — Якутск: ЯГУ, 2000. — 50 с.
43. *Ибламинов Р. Г.* Основы минерагеодинамики. — Пермь: Перм. Гос. ун-т, 2001. — 220 с.
44. *Иванова А. М., Супруненко О. И., Ушаков В. И.* Минерально-сырьевой потенциал шельфовых областей России. — СПб: ВНИИ Океанология, 1998. — 108 с.
45. Керченский железорудный бассейн / В. А. Арбузов, Л. Г. Бобрушкин, А. У. Литвиненко и др. — М.: Недра, 1967. — 577 с.
46. *Коган Б. И.* Редкие металлы; состояние, перспективы. — М.: Наука, 1979. — 356 с.
47. *Короленко Н. В.* Титан // Разведка и охрана недр, 2001. — № 11–12. — С. 24–28.
48. *Крутов Г. А.* Месторождения кобальта. — М.: Госгеолтехиздат, 1959. — 232 с.
49. *Кузовков Г. Н.* О геологической природе ураноносных бассейнов // Руды и металлы, 2001. — №1. — С. 69–75.
50. *Линдгрен В.* Минеральные месторождения / Пер. с англ. / Под ред. Б. П. Некрасова. Вып. 1. — М.: Горгеолнефтьиздат, 1934. — 187 с.
51. *Малышев И. И.* Закономерности образования и размещения месторождений титановых руд. — М.: Госгеолтехиздат, 1957. — 272 с.

52. Марганцевые руды Украины / Е. Ф. Шнюков, Г. Н. Орловский, Н. А. Панченко и др. – Киев: Наукова думка, 1993. – 172 с.
53. *Мардсен Р. У.* Железорудные месторождения района озера Верхнего // Рудные месторождения США. В 2-х т. Т. 2 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – С. 7–21.
54. *Мейер Ч., Ши Э., Годдарю Ч.* Рудные месторождения района Бьютт в Монтане // Рудные месторождения США / Пер с англ. – М.: Мир, 1972. – С. 482–529.
55. Многократная интрузия и минерализация месторождения Клаймакс в штате Колорадо / С. Р. Уоллес, Н. К. Мункастер, Д. С. Джонсон и др. // Рудные месторождения США. В 2-х т / Пер. с англ. Т. 2. – М.: Мир, 1973. – С. 217–260.
56. *Овчинников Л. Н.* Металлогенические провинции России. – М.: ИМГРЭ, 2001. – 172 с.
57. Основные направления стабилизации добычи и производства сурьмы в Республике Саха (Якутия) / Г. Ф. Безносков, О. И. Боева, Е. Ф. Маликов, В. А. Шестов // Колыма, 1999. – №4. – С. 7–12.
58. *Павлов Н. В., Григорьева Н. И.* Месторождения хрома // Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Т. 1. – М.: Недра, 1978. – С. 172–224.
59. *Парк Ч. Ф., Мак-Дормид Р. А.* Рудные месторождения / Пер. с англ. Под ред. В. И. Смирнова / – М.: Мир, 1966. – 534 с.
60. *Покалов В. Т.* Молибден // Разведка и охрана недр, 2001. – № 11–12. – С. 34–35.
61. Полезные ископаемые Беларуси: К 75-летию БелНИГРИ/ Редкол. П. З. Хомич и др. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.
62. *Поярко В. Э.* Сурьма и ртуть. Оценка месторождений при поисках и разведках. Вып. 15. – М.: Госгеолиздат, 1955. – 208 с.
63. *Радкевич Е. А.* Генетические типы, условия образования и закономерности размещения месторождений олова и вольфрама северо-западного сектора Тихоокеанского рудного пояса. – Владивосток, 1966. – 112 с.
64. *Резник И. Д., Ермаков Г. П., Шнейерсон Я. М.* Никель. Т. 2. Окисленные никелевые руды. Характеристика руд. Пирометаллургия. Гидрометаллургия. – М.: Наука и технология, 2001. – 467 с.
65. Россыпные месторождения титана СССР / Под ред. Г. С. Момджи и В. А. Блинова. – М.: Недра, 1978. – 288 с.
66. Рудные узлы России / Е. В. Плюшев, Н. С. Соловьев, А. В. Жданов и др. – СПб: ВСЕГЕИ, 2001. – 415 с.
67. *Рундквист Д. В.* Грейзеновые месторождения. – М.: Недра, 1971. – 328 с.
68. *Сахарова М. С., Ратникова Г. И.* Висмут // Металлы в осадочных толщах. – М.: Наука, 1965. – С. 276–313.

69. *Сергеев А. С., Воинов А. С., Львов Б. К.* Наука о полезных ископаемых в Санкт-Петербургском университете // Образование и локализация руд в земной коре: Сборник статей к 50-летию кафедры геологии месторождений полезных ископаемых геологического факультета СПбГУ. — СПб.: Изд-во СПб — ГУ, 1999. — С. 35–71.

70. *Сердюк С. С.* Минерально-сырьевая база золота Красноярского края. Перспективы освоения и развития // Минеральные ресурсы России, 2000. — №1. — С. 21–29.

71. Серебряное оруденение Якутии: Сб. научн. тр. Ин-т геол. наук СО РАН / Под ред. В. А. Амузинского. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. — 95 с.

72. *Сидоров А. А.* Золото-серебряное оруденение центральной Чукотки. — М.: Наука, 1966. — 141 с.

73. *Смирнов В. И.* Металлоносность варисцид Центральной и Западной Европы // Геология рудных месторождений, 1978. — № 1. — С. 6–18.

74. *Снайдер Ф. Г., Гердеман П. Э.* Геология свинцово-цинковых месторождений юго-восточной части штата Миссури // Рудные месторождения США / Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. — С. 42–79.

75. *Соболевский В. И.* Благородные металлы. Золото. Серебро. — М.: Знание, 1970. — 48 с.

76. *Суплецев В. М.* Роль ртутных и сурьмяных месторождений в ресурсах золота Восточной Якутии // Вестн. Госкомгеологии РС (Я), 2001. — № 1. — С. 87–90.

77. *Терновой В. И.* Карбонатитовые массивы и их полезные ископаемые. — Л.: ЛГУ, 1977. — 167 с.

78. *Тернор Ф.* Сравнительная характеристика главных рудных месторождений Центральной Боливии // Проблемы эндогенных месторождений. Вып. 2. — М.: Мир, 1964. — С. 197–323.

79. *Уайт У. С.* Месторождения самородной меди в северной части штата Мичиган // Рудные месторождения США / Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. — С. 457–481.

80. *Фишер Р. П.* Урано-ванадиево-медные месторождения в районе плато Колорадо // Геология атомных сырьевых материалов. — М.: Госгеолтехиздат, 1956. — С. 374–395.

81. *Холодов В. Н.* Ванадий (геохимия, минералогия и генетические типы месторождений в осадочных породах). — М.: Наука, 1968. — 245 с.

82. Хром Казахстана: Свойства хрома. Геология и геохимия. Минералогия и петрография. Разведка и запасы. Добыча. Обогащение: Справочник / В. И. Гриненко, О. И. Поляков, М. И. Гасик и др. — М.: Металлургия, 2001. — 416 с.

83. *Шарков А. А.* Уникальные месторождения урана // Природа, 2002. — № 3. — С. 3–12.

84. *Шер С. Д.* Металлогения золота (Северная Америка, Австралия, Океания). — М.: Недра, 1972. — 295 с.

85. *Шипулин Ф. К., Казанский В. И.* Оловянный пояс // Геология рудных месторождений, 1972. – Т. 14, № 3. – С. 3–18.
86. *Шнейдерхён Г.* Рудные месторождения / Пер. с нем. / Под ред. В. И. Смирнова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – 502 с.
87. *Шнюков Е. Ф., Науменко П. И.* Марганцево-железные руды Керченского бассейна. – Симферополь: Крымиздат, 1961. – 179 с.
88. *Шерба Г. Н.* Формирование редкометалльных месторождений Центрального Казахстана. – Алма-Ата: Изд-во Каз ССР, 1960. – С. 23–348.
89. *Юн Р. Б.* Медь Казахстана: история и перспективы // Горный журнал/, 2001. – № 11. – С. 53–55.
90. *Ahlfeld F., Schneider-Scherbia A.* Los jaccmentos minerals y de hidrocarburos de Bolivia. – La Pas, 1964. – 186 p.
91. *Everhart Johr L.* Titanium and titanium alloys. – New York: Reinhold Publ. Corp., 1954. – 184 p.
92. *Kerr J. Wm.* Cornwallis Lead-Zinc district; Mississipi Valley-type deposits controlled by stratigraphy and tectonics // Canadian Journal of Earth Sciences, 1977. – V. 14, № 6. – P. 1402–1426.
93. *King H. F., Thomson B. P.* Geology of the Broken Hill district // Geology of Australian deposits. – Melbourne, 1953. – P. 396–451.
94. Les gisements de nickel de Nouvelle Caledonie // Mines et mettalles, 1978. – № 141. – P. 17–19.
95. *Li K. C., Wand Chung Ju.* Tungsten // Am. Chem. Soc. Monograph series. – New York, 1947. – 430 p.
96. *Marnette W.* Development of the non-ferrous metals industry from a European perspective // Erzmetall, 2002. – V. 55, №1. – P. 34–42.
97. *Millet M.* Les bauxites // Geochronique, 2000. – № 76. – p. 31–33.
98. Mineral Deposits at the Beginning of the 21 st Century: Proceedings of the Joint 6 Biennial SGA-SEG Meeting, Krakow, 26–29 Aug., 2001. Piestrzynski Adam et al. (Editor). Liss etc.: Balkema, 2001. – 1153 p.
99. *Permingeant F., Bourg P.* Les gisements de molybdène, tungstène et cuivre d'Azegour (Haut-Atlas), Rabat: Edition du service géologique du Maroc, 1959. – 284 p.
100. *Tweddle K. M.* The stratigraphy and sedimentary structures of the Kimberley Shales in The Evander Goldfield, Eastern Transwaal, S. Africa // Geol. Soc. S. Africa, 1968. – V. 71, №3. – P. 116–165.
101. *Villas R. N., Santos M. D.* Gold deposits of the Carajas mineral province: deposit types and metallogenesis // Miner. Deposite, 2001. – V. 36, № 3–4. – P. 300–331.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ОСНОВНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, РАЙОНОВ И БАССЕЙНОВ

- Абаканское (Fe, Россия) 16  
Абенаб (V, Намибия) 67  
Агарак (Cu, Армения) 102  
Агню (Ni, Австралия) 74  
Агуачила (Be, Мексика) 289  
Агылкинское (W, Россия) 119  
Аданак (Mo, Канада) 133  
Адирондак (Fe, США) 16  
Адрасман (Bi, Cu, Таджикистан) 177, 178, 179  
Азгур (Mo, W, Cu, Th, Марокко) 134  
Айнак (Cu, Афганистан) 113  
Айн-Керна (Sb, Северная Африка) 187  
Айрон-Спрингс (Fe, США) 16  
Акенабе (W, Sn, Япония) 122, 170  
Аккермановское (Ni, Россия) 83  
Акута (U, Северная Африка) 265  
Акцессион (W, Боливия) 121  
Акчатау (Mo, W, Казахстан) 121, 124, 135  
Алапаевская группа (Fe, Россия, Урал) 13  
Александр Каунти (Li, США) 276  
Аллард-Лейк (Ti, Канада) 54, 55  
Аллареченское (Ni, Россия) 77  
Алмаз-Жемчужина (Cr, Россия, Урал) 49  
Алмалык (Cu, Узбекистан) 101  
Алнейское (Hg, Россия, Камчатка) 202  
Альмаден (Hg, Испания) 199, 200  
Альтенберг (Sn, W, Германия) 166, 169, 177  
Аммаберг (Pb, Zn, Швеция) 151  
Анатолия (W, США) 125, 126  
Ангаро-Илимский район (Fe, Россия) 18  
Ангаро-Катский район (Fe, Россия) 18  
Аннивере (Bi, Швейцария) 178  
Антоновское (Cu, W, Россия, Западная Сибирь) 104, 124  
Апапель (Hg, Россия, Чукотка) 202  
Араша (U, Nb, Бразилия) 266, 298, 300  
Арни (U, Северная Африка) 265  
Аскоран (Pb, Zn, Казахстан) 151  
Атасуйская группа (Mn, Казахстан) 38  
Афасто (U, Северная Африка) 265  
Африканда (Fe, Россия) 15  
Аятский бассейн (Fe, Россия) 13, 22  
Байтца (Mo, Румыния) 134  
Бакальская группа (Fe, Россия, Урал) 21  
Балей (Au, Россия, Забайкалье) 230  
Балмат-Эдвардс (Pb, Zn, США) 144  
Банат (Fe, Румыния) 16

Банбери (Fe, Великобритания) 12  
Банкрифт (U, Канада) 265  
Барода (Mn, Индия) 39  
Баррамби (V, Австралия) 67  
Барун-Шивея (Sb, Hg, Россия, Забайкалье) 190, 201  
Бахтинский район (Fe, Россия) 18  
Бая-Маре (Sb, Румыния) 191  
Баянмонд (W, Монголия) 124  
Бая-Сприе (Sb, Румыния) 191, 192  
Бвана-Мкубва (Co, Cu, Замбия) 92  
Беатрис (Sn, Малайзия) 168  
Беганьское (Pb, Zn, Украина) 153  
Беленихинское (Al, Россия) 212  
Белое (Hg, Россия, Камчатка) 202  
Белорецкое (Fe, Россия, Горный Алтай) 12  
Бендиго (Au, Австралия) 228, 230  
Бени-Суэйф (Fe, Алжир) 13  
Берг-Аунас (V, Намибия) 67  
Берд-Ривер (Sn, Канада) 168  
Береговское (Pb, Zn, Украина) 153  
Берник-Лейк (Li, Ta, Канада) 276, 282, 300  
Бикита (Li, Ta, Зимбабве) 275, 276, 300  
Бисби (Cu, США) 104  
Блайд-Ривер 265  
Блейквасли (Pb, Zn, Норвегия) 156  
Блендвэйл (Pb, Zn, Австралия) 144  
Блэкбирд (Co, США) 92  
Блю-Спек (Sb, Австралия) 189  
Бляйберг (Pb, Zn, Австрия) 154  
Богуты (W, Казахстан) 121, 124, 125  
Боевского (Be, Россия, Урал) 287  
Боке (Al, Гвинея) 212  
Боксонское (Al, Россия) 209  
Болеслав (Pb, Zn, Польша) 154  
Болиден (Cu, Швеция) 112  
Большетокмакское (Mn, Украина) 35  
Большое Медвежье озеро (Bi, Канада) 177  
Бом-Горн (W, Россия, Забайкалье) 124  
Босс Маунтин (Mo, Канада) 133, 136  
Боудвин (Ag, Мьянма) 244  
Боулдер (W, США) 125  
Бочеггиано (Bi, Италия) 178  
Брежу (W, Бразилия) 121  
Брич-Мулла (Bi, Узбекистан) 177, 178  
Брокен-Хилл (V, Замбия) 67  
Брокен-Хилл (Pb, Zn, Ag, Австралия) 147, 157, 158, 243  
Брудвин (Pb, Zn, Мьянма) 148  
Бу-Аззер (Ni, Co, Марокко) 81, 89, 92  
Бу-Беккер (Pb, Zn, Марокко) 154  
Бугдая (Mo, Россия, Забайкалье) 133

Бузург (Mn, Индия) 39  
Бу-Кхарда (Fe, Алжир) 13  
Булуктай (Mo, Россия, Забайкалье) 135  
Бурыкгальское (Ni, Россия) 83  
Бутыгычаг (Sn, Россия) 169  
Бушвельд, Бушвельдский массив (Cr, Ti, V, Ni, Co, ЮАР) 43, 45, 46, 57, 65, 67, 77, 90, 251, 252  
Бьютт (Cu, США) 109  
Валькумей (Sn, Россия) 170  
Ваньшань (Hg, Китай) 199  
Вежаю-Ворыквинское (Al, Россия) 212  
Великая Дайка (Cr, Pt, Зимбабве) 43, 45, 50, 253  
Верхнее (Pb, Zn, Россия, Приморье) 151  
Вест-Шаста (Pb, Zn, США) 156  
Вильямсфильд (Al, Ямайка) 210  
ВИМ (Zr, Австралия) 308  
Виндера (Ni, Ag, Австралия) 253  
Винтервельд Крундал (Cr, ЮАР) 42  
Висловское (Al, Россия) 212  
Витватерсранд (Au, Pt, U, ЮАР) 226, 227, 232, 233, 265, 271  
Воджина (Ta, Nb, Австралия) 300  
Волковское (Cu, Ti, Россия, Урал) 102  
Вольфрам-Кемп (W, Sn, Австралия) 124  
Вондеркоп (Cr, ЮАР) 42  
Воси (Sb, Hg, Китай) 190, 201  
Воскресенское (Sn, Россия, Приморье) 171  
Восток-II (Bi, Mo, W, Россия, Приморье) 122, 177  
Восточный Коунрад (Mo, Казахстан) 133, 135  
Вуолийоки (V, Ti, Финляндия) 66  
Вырли Бряг (Cu, Болгария) 109  
Высокогорское (Fe, Россия, Урал) 12, 16, 90  
Гайское (Cu, Россия) 100  
Гара Джебилет (Fe, Алжир) 19  
Гебе (Ni, Индонезия) 74  
Гендерсон (Mo, Cu, США) 131, 133, 137  
Геофизическое (Cr, Россия, Урал) 49  
Герольд (Fe, Бельгия) 14  
Гигант (Cr, Россия, Урал) 49  
Глафиринское (Cu, Россия, Западная Сибирь) 104  
Говедарник (Pb, Zn, Болгария) 152  
Голконда (W, США) 125, 126  
Горевское (Pb, Zn, Россия) 144, 147, 157  
Горная Рача (W, Закавказье) 125  
Гороблагодатское (Fe, Россия, Урал) 12, 16  
Гортдрам (Hg, Ирландия) 201  
Гравеллот (Sb, ЮАР) 184, 186, 189  
Гринбушес (Ta, Nb, Австралия) 299  
Гронг (Cu, Норвегия) 101  
Грут-Айленд (Mo, Австралия) 34  
Грюнтен (Fe, Германия) 14

Гуйменьшань (W, Китай) 119  
Гулеман (Сг, Турция) 44  
Гулинский массив (Fe, Россия, Восточная Сибирь) 15  
Гусевогорское (Fe, V, Ti, Россия, Урал) 67  
Гюмюслер (Hg, Турция) 201  
Давенда (Mo, Россия, Забайкалье) 136  
Дае (Fe, Китай) 13  
Дайм-Крик (Pt, США, Аляска) 257  
Дальнее (Sn, Россия) 170  
Даман-Джала (Cu, Иран) 109  
Даминьшань (W, Китай) 119  
Дашкесанское (Co, Fe, Армения) 91  
Дейлсфорд (Au, Австралия) 228  
Делемон (Fe, Швейцария) 14  
Депутатское (Sn, Россия) 170, 171  
Дере (Sb, Турция) 191  
Джабель-Аджа (Hg, Тунис) 201  
Джалинда (Sn, Россия, Дальний Восток) 170  
Джаманак (Li, Афганистан) 276  
Джездинское (Mn, Казахстан) 34, 38, 113  
Джезказганское (Cu, Казахстан) 113  
Джерисса (Fe, Тунис) 13  
Диабазовое (Be, Беларусь) 293  
Дилль (Fe, Германия) 19  
Долкоатс (Sn, Великобритания) 170  
Долорес (Cu, Мексика) 104  
Донгри (Mn, Индия) 39  
Дорова (Fe, Зимбабве) 15  
Друмгал (Li, Афганистан) 276  
Дуария (Fe, Тунис) 13  
Дуранга (Sn, Мексика) 170  
Ева Перон (U, Аргентина) 266  
Екатерино-Благодатское (Pb, Zn, Россия) 152  
Еletz Озеро (V, Россия) 67  
Жайрем (Pb, Zn, Казахстан) 144, 156  
Жайсанское (Cu, Казахстан) 109  
Жакобина (U, Бразилия) 271  
Жанет (Mn, W, Казахстан) 135  
Ждановское (Cu, Ni, Россия) 89, 100  
Железная Гора (Be, США) 289  
Жирекен (Mo, Россия, Забайкалье) 136  
Заозерное (Al, Беларусь) 217  
Западно-Сибирский бассейн (Fe, Россия) 13, 22  
Западно-Палянское (Hg, Россия) 198  
Западный Караджал (Fe, Mn, Казахстан) 12, 19, 20  
Заполярное (Cu, Ni, Россия) 89  
Звездочка (Hg, Россия, Восточная Сибирь) 198  
Згид (Pb, Zn, Россия, Северный Кавказ) 152, 153  
Зопхито (W, Закавказье) 125  
Зыряновское (Pb, Zn, Россия, Рудный Алтай) 156

Игохеллен (W, Швеция) 121  
Идрия (Hg, бывшая Югославия) 198  
Илимауссак (Zr, Гренландия) 307  
Илимпейский район (Fe, Россия) 18  
Ильдикан (Hg, Россия, Забайкалье) 201  
Инкур (W, Россия, Забайкалье) 124  
Инсизва (Co, Ni, ЮАР) 77, 90  
Инское (Fe, Россия, Горный Алтай) 12  
Инуко (W, Япония) 122  
Ир-Нилийское (Mn, Россия, Урал) 38  
Ислаим (Hg, Алжир) 202  
Итокума (Hg, Япония) 202  
Иульгин (W, Россия, Чукотка) 124  
Йеллоу-Пайн (Sb, Au, США) 186, 191  
Кадаинское (Pb, Zn, Россия) 152  
Кадамжай (Sb, Киргизия) 187  
Каджаран (Cu, Mo, Армения) 102, 136  
Казызмах (Hg, Турция) 202  
Кайзерштуль (Ta, Nb, Германия) 300  
Камагуэй (Cr, Куба) 49  
Камбалда (Ni, Pt, Австралия) 74, 76, 253  
Кампит (Sn, Индонезия) 168  
Кампо-Формозу (Cr, Бразилия) 42  
Камышевский Байкитик (V, Россия) 67  
Канско-Тасеевский район (Fe, Россия) 18  
Караоба (W, Казахстан) 121, 124, 125, 126  
Каратас-I (Mo, Казахстан) 134  
Карсакпайская группа (Fe, Mn, Казахстан) 38  
Касапалка (Pb, Zn, Cu, Ag, Перу) 150, 153  
Кастлмен (Au, Австралия) 228  
Каталан, Каталан-I (Ti, Nb, Бразилия) 54, 300  
Катанга-Родезийский пояс (Co) 92, 101  
Катугинское (Zr, Россия) 305  
Качарское (Fe, Казахстан) 12, 16  
Качканарское (Fe, Ti, V, Россия, Урал) 15, 57, 67  
Кварц-Крик (Pt, США, Аляска) 257  
Квебек (Li, Mo, Cu, Канада) 275  
Квеста-I (Mo, США) 136  
Квеста-II (Mo, Cu, США) 133, 136  
Квин (W, США) 121  
Кедранское (V, Россия) 67  
Кейбл (Au, США) 229  
Кемпирсайский массив (Cr, Россия) 44, 47, 48  
Кен-Хилл (Pb, Zn, Канада) 152  
Кеопджари (Mn, Индия) 39  
Кер д'Ален (Pb, Zn, США) 152  
Керченский бассейн (Fe, V, Россия) 13, 21, 22, 66, 68  
Кессенберг (Fe, Германия) 14  
Кестер (Sn, Россия) 169  
Кидд-Крик (Cu, Zn, Ag, Канада) 112, 122, 144, 244

Кинг-Айленд (W, Австралия) 121  
Кингс-Маунтин (Li, США) 275  
Кирунавара (Fe, Швеция) 14, 15  
Кителя (Sn, Россия) 168  
Киялых-Узень (Mo, Россия, Хакассия) 134  
Клаймакс (Mo, Cu, США) 131, 133, 137, 138  
Клаппа (Sn, Индонезия) 168  
Клафф-Лейк (U, Канада) 265  
Клева (Cu, Ni, Швеция) 77  
Кливленд (Fe, Великобритания) 12  
Клинтон (Fe, США) 21  
Клифтон (Cu, США) 104  
Кнабен (Mo, Cu, Норвегия) 132  
Кобальт (Co, Ni, Cu, Канада) 81, 89, 90  
Ковдорское, Ковдор (Fe, Россия) 10, 15, 16  
Койкарское (Fe, Ti, Россия, Карелия) 55  
Коктенколь (Mo, Казахстан) 133  
Комото (Cu, Заир) 113  
Комсомольское (Cr, Россия, Урал) 49  
Кондер (Pt, Россия, Дальний Восток) 252  
Копанское (Fe, Ti, Россия, Урал) 55, 67  
Кордеро (Hg, США) 202  
Коробковское (Fe, Россия) 24  
Коршуновское (Fe, Россия) 18, 19  
Костайник-Крупани (Sb, Балканы) 186  
Костомукшское (Fe, Россия) 10  
Коунрад (Cu, Mo, Казахстан) 101  
Криворожский бассейн (Fe, Украина) 11, 24, 25  
Крокер-Уэлл (U, Австралия) 265  
Крофти (Sn, Великобритания) 170  
Кручининское (V, Россия, Забайкалье) 67  
Кудур (Mn, Индия) 39  
Кузнечихинское (Ti, Россия, Урал) 60  
Кулджарлу (Zr, Австралия) 308  
Кундыбаевское (Ti, Казахстан) 59  
Куотс-Хилл (Mo, США) 131, 133  
Купей (Co, Ni, Куба) 89  
Курская магнитная аномалия (Fe, Россия) 11, 24  
Кусинское (Fe, Ti, V, Россия) 15, 55, 57, 58, 67  
Куэста (Mo, США) 131  
Кызыл-Эспе (Pb, Zn, Казахстан) 151  
Кэджебат (Zn, Pb, Ag, Австралия) 144  
Кэйнел (Zr, Австралия) 308  
Ла Каролина (Ag, Pb, Zn, Испания) 244  
Ла Корн (Li, Mo, Cu, Канада) 132, 275, 276  
Ла Круа (Li, Канада) 275  
Лак-дез-Иль (Pt, Канада) 251, 253  
Лак-Тио (V, Канада) 67  
Лалин (Li, Испания) 276  
Лан (Fe, Германия) 19

Лаочан (Sn, Китай) 168  
 Ларжательер (Pb, Zn, Франция) 154  
 Лебединское (Fe, Россия) 24  
 Левосакынджин (Hg, Россия) 199  
 Ледвилл (Pb, Zn, США) 152  
 Лейк-Тио (Ti, Канада) 55  
 Леккен (Cu, Норвегия) 101, 112  
 Лениногорское (Pb, Zn, Россия) 156  
 Лиденбургский пояс (Cr, ЮАР) 43, 46  
 Лиму (Sn, Китай) 169,  
 Линарис (Pb, Zn, Ag, Испания) 244  
 Линн-Лейк (Co, Канада) 90  
 Липецкий бассейн (Fe, Россия) 13  
 Лисаковское (Fe, Казахстан) 23  
 Литиа (Li, Канада) 276  
 Ллалагуа (Sn, Боливия) 167, 170  
 Ловозерское (Nb, Россия) 299, 307  
 Лондондерри (Li, Австралия) 275  
 Лос Кондорес (W, Аргентина) 121  
 Лост-Ривер (Sn, W, Be, США, Аляска) 122, 169  
 Лотарингский бассейн (Fe, V, Франция) 22, 66, 68  
 Лоуренс (Pb, Zn, США) 151  
 Лысаковское (V, Россия) 67  
 Люлекоп (Fe, ЮАР) 15  
 Магма (Cu, США) 109  
 Магнет Хейтс (Ti, V, ЮАР)  
 Магнитогорское, г. Магнитная (Fe, Co, Россия, Урал) 17, 90  
 Маджарово (Pb, Zn, Болгария) 153, 154  
 Майари (Fe, Куба) 21  
 Мак-Артур-Ривер (Pb, Zn, Австралия), 144, 157, 243  
 Мак-Дермит (Hg, США) 202  
 Мак-Миллан-Тангстен (W, Канада) 121  
 Малин (Pb, Zn, Франция) 154  
 Малышевское (Be, Россия, Урал) 287  
 Маматван (Mn, ЮАР) 32  
 Мангазейское (Ag, Россия, Восточная Сибирь) 246  
 Мангышлакское (Mn, Казахстан) 34, 35  
 Маноно-Китотоло (Sn, Заир) 166  
 Мансфельд (Cu, Германия) 113  
 Маорин (U, Австралия)  
 Маткальское (V, Fe, Россия, Урал) 67  
 Маунт-Айза (U, Pb, Zn, Австралия) 144, 147, 157, 243, 265  
 Маунт-Бишоф (Sn, Австралия) 170  
 Маунт-Кейт (Ni, Австралия) 74  
 Маунт-Кобальт (Co, Австралия) 92  
 Маунт-Пейнтер (U, Австралия) 265  
 Маунт-Плезант (Sn, Канада) 170  
 Медведевское (V, Россия, Урал) 55, 67  
 Менсон-Лод (Sn, Малайзия) 170  
 Мескани (Cu, Иран) 109

Местерс-Виг (Mo, Гренландия) 133  
Мидуэст-Лейк (U, Канада) 265  
Миллз (V, Ti, Канада) 55, 67  
Миллионное (Cr, Россия, Урал) 49  
Минас Рагра (V, Mo, Ni, Перу) 68  
Миргалымсай (Pb, Zn, Казахстан) 154  
Миссисипи-Миссури (Pb, Zn, США) 154  
Мистери-Лейк (Ni, Канада) 76  
Миттерзилль (W, Австрия) 121  
Михайловское (Fe, Россия, КМА) 24  
Мишери Абделазис (Fe, Алжир) 19  
Моа (Fe, Куба) 21  
Моак-Лейк (Ni, Канада) 76  
Моанда (Mn, Габон) 34  
Молодежное (Cr, Россия, Урал) 49  
Монте-Амиата (Hg, Италия) 198, 202  
Монте-Кристо (Bi, Канада) 178  
Мончегорское (Ni, Co, Pt, Россия) 76, 90, 252  
Моренси (Cu, США) 104  
Морокоча (Pb, Zn, Ag, Bi, Перу) 150  
Мохна-Магра (Pb, Zn, Индия) 157  
Мра-Сма (Hg, Северная Африка) 199  
Мусоши (Cu, Заир) 113  
Мэрисвейл (U, США) 267  
Неггри (Sn, Малайзия) 171  
Нейбулак (Bi, Германия) 178  
Нейвен (Pb, Zn, Ирландия) 148  
Непуи (Ni, Новая Каледония) 74  
Нижнеангарское (Fe, Россия) 21  
Нижне-Тагильский массив (Pt, Россия) 255  
Нижний Мамон (Ti, Россия) 59  
Никел-Плейт (Au, Канада) 229  
Никитовское (Hg, Украина) 197, 199  
Никопольский бассейн (Mn, Украина) 32, 34, 35, 36  
Никопольское (Mn, Украина) 35  
Новоселковское (Fe, Ti, V, Беларусь) 27, 28, 61, 69  
Новоучалинское (Cu, Россия, Урал) 100  
Новоширокинское (Pb, Zn, Россия, Забайкалье) 153  
Норанда (Mo, Канада) 132  
Норильск-1 (Cu, Ni, Pt, Россия) 74, 77, 78, 89, 90  
Норильский район (Ni, Co, Pt, Россия) 78, 79, 89, 90, 100, 254  
Нсуга-Дагвин (Mn, Гана) 35  
Нчанга (Cu, Co, Замбия) 92, 113  
Нчванинг (Mn, ЮАР) 32  
Нью-Альмаден (Hg, США) 199, 201  
Нью-Идрия (Hg, США) 199, 201  
Оброчиште (Mn, Болгария) 34, 35  
Озерное (Zn, Pb, Россия) 144, 156  
Околовское (Fe, Беларусь) 26, 27  
Октябрьское (Ni, Cu, Pt, Россия) 74, 77, 89, 90

Окульш (Zn, Pb, Cu, Польша) 154  
Оленегорское (Fe, Россия) 10  
Ольховское (Au, Россия) 229  
Омчикандин (W, Россия) 125  
Севере-Онежский район (Al, Россия) 215  
Онтарио (Pb, Zn, Ag, Канада) 275  
Опалит (Hg, США) 202  
Оруро (Sn, Боливия) 170  
Отанмяки (V, Финляндия) 66, 69  
Оурей (Au, США) 229  
Пайн-Крик (W, Mo, США) 122, 134  
Пайн-Пойнт (Pb, Zn, Ag, Канада) 148, 244  
Пайн-Ралли (Mo, США) 133  
Пакуни (Sn, W, Боливия) 121  
Пала (Li, США) 276  
Палабор (Cu, Fe, U, Th, Ag, ЮАР) 103  
Памалеа (Ni, Индонезия) 74, 77  
Панаскуейра (W, Португалия) 121, 124  
Пангуашань (W, Китай) 119  
Пангуна (Cu, Mo, Папуа-Новая Гвинея) 101  
Пандора (Pt, ЮАР) 252  
Панчжихуа (Ti, Китай) 54  
Панч-Махал (Mn, Индия) 39  
Перак (Sn, Индонезия) 171  
Первомайское (Mo, Россия, Забайкалье) 135  
Первоуральское (V, Ti, Россия, Урал) 67  
Перетта (Sb, Италия) 186, 187  
Пехтельгрюн (W, Sn, Германия) 124  
Печенга, Печенгское 70, 77, 90, 252  
Пирлесс (Ta, Be, Cs, США) 277  
Питкьяранта (Sn, Россия, Карелия) 168  
Пламенное (Hg, Россия, Чукотка) 203  
Плюмо-Идальго (Ti, Мексика) 60  
Полмостундровское (Be, Россия) 287  
Полярис (Pb, Zn, Канада) 144  
Пори (Ni, Финляндия) 77  
Порт-Радий (U, Канада) 265, 268  
Потоси (Sr, Ag, Боливия) 170, 246, 247  
Президент Перон (U, Аргентина) 266  
Приангарская группа (Al, Россия) 215  
Пудожгорское (Ti, Fe, V, Россия, Карелия) 55, 67  
Пшибрам (Pb, Zn, Чехия) 152  
Пыркыкай (Sn, Россия, Чукотка) 171  
Пьюиджелон (Ti, Fe, Канада) 55, 67  
Радиум-Хилл (U, Австралия) 265  
Радка (Cu, Болгария) 112  
Раздольнинское (Sb, Россия, Восточная Сибирь) 189  
Райбл (Pb, Zn, Ag, Испания) 244  
Раммельсберг (Pb, Zn, Германия) 156  
Рамрара (Mn, Индия) 39

Рас-эль-Ма (Hg, Северная Африка) 199  
Ратбури (Sb, Таиланд) 189  
Ренисон-Белл (Sn, Австралия) 170  
Реосин (Zn, Ag, Испания) 149, 244  
Рессинг (U, Намибия) 265  
Риддер-Сокольное (Pb, Zn, Россия) 156  
Рингерих (Ni, Норвегия) 76  
Рио-Тинто (Pb, Zn, Испания) 101, 112, 156  
Риф (Fe, Марокко) 16  
Риф Меренского (Pt, ЮАР) 251, 252, 254  
Риф Ю-Джи (Pt, ЮАР) 251  
Роан-Антилоп (Cu, Замбия) 113  
Робинзон Коп (Ti, США) 60  
Рогоженское (Ni, Россия) 83  
Родсенд (V, Норвегия) 67  
Росен (Cu, Болгария) 109  
Росохинское (Pb, Zn, Россия) 157  
Рудные горы (Ni, Co, Германия) 81  
Руен (Pb, Zn, Болгария) 152  
Рыбново (Sb, Болгария) 187  
Рэбби-Лейк (U, Канада) 265  
Рэд-Дог (Zn, США) 144  
Рюстенбургский пояс (Cr, ЮАР) 43, 46, 47  
Сабинополис (Be, Аргентина) 288  
Садбери (Ni, Cu, Канада) 74, 76, 77, 80, 89, 253, 254  
Садисдорф (W, Mo, Германия) 124  
Садонское (Pb, Zn, Россия, Северный Кавказ) 152  
Сала (Pb, Zn, Швеция) 151  
Салар де Атакама (Li, Чили) 277  
Салливан (Pb, Zn, Канада) 144, 147, 156  
Салтыковское (Fe, Россия) 24  
Самотканское (Ti, Украина) 307  
Санг-Донг (W, Bi, Южная Корея) 121, 122, 123, 177  
Сангей-Лембанг (Sn, Малайзия) 166  
Сан-Грегори (W, Mo, Bi, Перу) 177, 178  
Сандслут (Pt, ЮАР) 252  
Сан-Мануэль (Cu, США) 101  
Санта-Фе (Cu, Мексика) 229  
Сан-Хозе (Sb, Мексика) 187, 188  
Саншайн (Sb, США) 190  
Сарановское (Cr, Россия, Урал) 49  
Сарбайское (Fe, Казахстан) 12, 16, 90  
Сардана (Pb, Zn, Россия, Саха-Якутия) 154  
Сары-Булак (Sb, Средняя Азия) 191  
Сарылах (Sb, Россия) 184, 186, 189  
Саяк I (Cu, Казахстан) 104, 105  
Седмочисленицы (Pb, Zn, Болгария) 154  
Селангор (Sn, Малайзия) 171  
Сельвог (V, Норвегия) 67  
Сембилан (Sn, Малайзия) 171

Сенза (Sb, Au, Hg, Северная Африка) 187  
Сентачан (Sb, Россия, Саха-Якутия) 184  
Сенчери (Zn, Pb, Австралия) 144  
Сёрлс (W, США) 121, 126, 276, 277  
Серра-Колорадо (Cu, Панама) 101  
Серро де Паско (Pb, Zn, Перу) 150  
Серро-Асперо (W, Mo, Аргентина) 135  
Сиань (Sb, Pb, Zn, Китай) 190  
Сил-Лейк (Be, Канада) 290  
Сильвермайнз (Pb, Zn, Ирландия) 148  
Сильвер-Хилл (Sn, США) 168  
Сингбхуме (Mn, Индия) 39  
Сингуаньшань (Sb, W, Китай) 119, 184, 185, 186, 187  
Скотиа (Ni, Ag, Австралия) 253  
Смирновское (Sn, Россия, Приморье) 170  
Соберания (U, Аргентина) 266  
Содавиль (W, США, Невада) 126  
Соколовское (Fe, Казахстан) 12, 16, 90  
Сора (Mo, Россия, Кузнецкий Алатау) 133, 136  
Сороака (Ni, Индонезия) 77  
Спер-Маунтин (Be, США, Юта) 287  
Спокойнинское (W, Россия) 124  
Спорное (Cr, Россия, Урал) 49  
Среднеангарский район (Fe, Россия) 18  
Средне-Днепровские месторождения (Ti, Украина) 58  
Стёрдбок (Zr, Австралия) 307  
Стиллуотер (Ni, Pt, США) 77, 251  
Стремигородское (Ti, Украина) 59  
Сукулу (Fe, Уганда) 15  
Сулительма (Cu, Норвегия) 101  
Сульфур-Бенк (Hg, США) 198, 202  
Таберг (V, Швеция) 67  
Таборное (Pb, Zn, Россия, Прибайкалье) 157  
Таврическое (Mn, Украина) 33  
Тагило-Кушвинская группа (Fe, Россия) 12  
Таежное (Co, Pb, Zn, Россия, Восточная Сибирь) 90, 157  
Тайа (Sb, Северная Африка) 187  
Тайнах (Pb, Zn, Ag, Ирландия) 148, 244  
Талмеси (Cu, Иран) 109  
Талнахское (Cu, Ni, Pt, Россия) 74, 77, 89, 90  
Танклиф (Cr, ЮАР) 47  
Талира (U, Nb, Бразилия) 266, 298, 300  
Тарбхар (Mn, Индия) 39  
Тарсис (Cu, Испания) 101  
Тасна (Sn, W, Bi, Боливия) 121, 177, 178  
Татарская группа (Al, Россия) 215  
Тахталыдаг (Mo, Турция) 134  
Таштагол (Fe, Россия) 16  
Тегавус (Fe, Ti, V, США) 15, 55, 67  
Тейская группа (Fe, Россия) 12

Тейское (Fe, Россия) 16  
Текгер (Sb, Турция) 191  
Текели (Pb, Zn, Казахстан) 156  
Теллес (Ti, Норвегия) 54  
Тельбес (Fe, Россия, Горная Шория) 16  
Тембушань (Pb, Zn, Китай) 151  
Теннат-Крик (Bi, Австралия) 176  
Террангтон (W, Mo, Sn, Австралия) 124  
Терсинская группа (Fe, Россия) 19  
Тинтик (Pb, Zn, США) 152  
Тихвинский район (Al, Россия) 215  
Токепала (Cu, Перу) 101  
Томас-Рейндж (Be, США, Юта) 289, 292  
Томпсон (Ni, Co, Канада) 74, 76, 77, 90  
Томпсон Крик (Mo, США) 134  
Трев (Pb, Zn, Франция) 154  
Три-Стейтс (Zn, США) 155  
Тсумб (V, Намибия) 67  
Тульский бассейн (Fe, Россия) 13  
Тунгусский район (Fe, Россия) 18  
Турьинская группа (Cu, Россия, Урал) 104  
Тырныауское (W, Mo, Россия) 119, 121, 122, 134, 177  
Увидор-Каталан (Nb, Бразилия) 299  
Удерейское (Sb, Россия, Восточная Сибирь) 189  
Удоканское (Cu, Россия, Забайкалье) 100, 113, 114  
Уиксон (Fe, Марокко) 13  
Уилсон-Спрингс (V, США) 69  
Уква (Mn, Индия) 39  
Улуг-Танзек (Zr, Россия) 305  
Умальта (Mo, Россия, Дальний Восток) 136  
Уобана (Fe, Канада) 11  
Уральский бассейн (Mn, Россия) 35  
Устарасай (Bi, Узбекистан) 177, 178, 179  
Ууксу (Be, Россия) 287  
Уфалейское (Ni, Россия) 84  
Уч-Кулач (Pb, Zn, Узбекистан) 144  
Ушкатын-III (Mn, Fe, Казахстан) 34  
Уэнза (Fe, Алжир) 13  
Фарадей (U, Канада) 265  
Флин-Флон (Pb, Zn, Канада) 157  
Флэт-Ривер (W, Канада) 121  
Фоллаль (Cu, Норвегия) 101  
Франклин-Фернас (Pb, Zn, США) 151  
Фродингем (Fe, Великобритания) 12  
Хайдаркан (Hg, Киргизия) 193, 196, 199  
Хамерсли (Fe, Австралия) 11, 24, 25, 26  
Хамман Н'Байль (Sb, Au, Северная Африка) 187, 191  
Хаммимат (Sb, Северная Африка) 187  
Хапчеранга (Sn, Россия, Забайкалье) 170  
Харворд (Ti, США) 60

Харловское (Fe, Россия, Горный Алтай) 15  
Хибинское (Ti, Россия) 56  
Хилтон (Pb, Zn, Ag, Австралия) 144  
Хинганское (Sn, Россия) 170  
Ховуаксы (Co, Ni, Россия, Тува) 77, 81, 92  
Холоднинское (Pb, Zn, Россия) 144, 147, 156  
Холстон (W, Россия, Забайкалье) 124  
Хоперский район (Fe, Россия) 13  
Хрустальное (Sn, Россия, Приморье) 170  
Хуанкавелика (Hg, Перу) 199  
Хуанподи (W, Китай) 122  
Цзиньчуань (Ni, Китай) 74  
Циновец (Sn, W, Чехия) 166  
Чадобецкая группа (Al, Россия) 215  
Чамбиши (Co, Cu, Замбия) 92, 93, 113  
Чапаевское (Sn, Россия, Приморье) 169  
Чатыркульское (Cu, Казахстан) 109  
Чемпура (Hg, Россия, Камчатка) 202  
Чиатурское (Mn, Грузия) 34, 35  
Чибижекское (Au, Россия, Западная Сибирь) 229  
Чилкобия (Sb, Боливия) 189  
Чоган-Узун (Hg, Россия, Горный Алтай) 201  
Чонкойское (Hg, Киргизия) 196  
Чукикамата (Cu, Чили) 101, 106, 107  
Шаканаи (Pb, Zn, Япония) 156  
Шалгия (Mo, Казахстан) 136, 154  
Шаньвугу (Mn, Китай) 34  
Шаумян (Pb, Zn, Армения) 153  
Шахтама (Mo, Россия, Забайкалье) 133, 136  
Шварцвальд (Bi, Германия) 178  
Шерлова Гора (W, Sn, Россия, Забайкалье) 125, 170  
Шинколовбе (U, Заир) 265  
Шичжийюань (Mo, Китай) 122  
Шкляры (Ni, Польша) 82, 83  
Шнееберг (Bi, Германия) 178  
Эге-Хая (Sn, Россия, Саха-Якутия), 170  
Эздемир (Sb, Турция) 186, 189  
Эйберфойл (Sn, Австралия) 166  
Экуг (Sn, Россия, Чукотка) 168  
Элиот-Лейк (U, Канада) 271  
Эль-Абед (Pb, Zn, Алжир) 154  
Эль-Абра (Cu, Чили) 106  
Эль-Граара (Co, Марокко) 89  
Эльдорадо (Ni, Co, Bi, Канада) 81, 82, 92, 177, 178  
Эль-Потоси (Pb, Zn, Ag, Мексика) 151  
Эль-Сантин (Sn, Мексика) 170  
Эль-Тениенте (Cu, Чили) 101  
Эмеральд-Фини (Bi, Канада) 177  
Эндако (Mo, Канада) 133  
Энибба (Zr, Австралия) 308

Эргани-Маден (Pb, Zn, Cu, Турция) 112, 156  
Эрицберг (Fe, Австралия) 12  
Этта Майн (Ta, Be, Cs, США) 277  
Этыка (Sn, Россия, Забайкалье) 169  
Югодзыр (Sn, W, Монголия) 124, 135  
Юлия (Cu, Россия, Западная Сибирь) 104  
Юнайтед-Верде (Pb, Zn, Cu, США) 112, 157  
Янцзы-Чжандзы (Mo, Китай) 133, 134  
Ярегское (Ti, Россия, Коми) 56, 60  
Ярославское (Sn, Россия, Забайкалье) 168  
Яхимов (Co, Bi, Чехия) 92, 177

## Содержание

Предисловие .....	3
<b>Глава 1. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗА</b> .....	5
Краткие исторические сведения .....	5
Геохимия .....	5
Минералогия .....	6
Применение в промышленности .....	7
Ресурсы и запасы .....	8
Добыча и производство .....	10
Металлогения и эпохи рудообразования .....	10
Генетические типы промышленных месторождений .....	14
<b>Глава 2. МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРГАНЦА</b> .....	29
Краткие исторические сведения .....	29
Геохимия .....	29
Минералогия .....	30
Применение в промышленности .....	30
Ресурсы и запасы .....	31
Добыча и производство .....	32
Металлогения и эпохи рудообразования .....	33
Генетические типы промышленных месторождений .....	35
<b>Глава 3. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХРОМА</b> .....	40
Краткие исторические сведения .....	40
Геохимия .....	40
Минералогия .....	41
Применение в промышленности .....	41
Ресурсы и запасы .....	42
Добыча и производство .....	42
Металлогения и эпохи рудообразования .....	43
Генетические типы промышленных месторождений .....	45
<b>Глава 4. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИТАНА</b> .....	51
Краткие исторические сведения .....	51
Геохимия .....	51
Минералогия .....	52
Применение в промышленности .....	52
Ресурсы и запасы .....	53
Добыча и производство .....	54
Металлогения и эпохи рудообразования .....	55
Генетические типы промышленных месторождений .....	56
<b>Глава 5. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВАНАДИЯ</b> .....	62
Краткие исторические сведения .....	62
Геохимия .....	62
Минералогия .....	63
Применение в промышленности .....	64
Ресурсы и запасы .....	64

Добыча и производство .....	65
Металлогения и эпохи рудообразования .....	65
Генетические типы промышленных месторождений .....	66
<b>Глава 6. МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ</b> .....	70
Краткие исторические сведения .....	70
Геохимия .....	71
Минералогия .....	71
Применение в промышленности .....	72
Ресурсы и запасы .....	73
Добыча и производство .....	75
Металлогения и эпохи минералообразования .....	75
Генетические типы промышленных месторождений .....	77
<b>Глава 7. МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОБАЛЬТА</b> .....	85
Краткие исторические сведения .....	85
Геохимия .....	85
Минералогия .....	86
Применение в промышленности .....	87
Ресурсы и запасы .....	87
Добыча и производство .....	88
Металлогения и эпохи рудообразования .....	89
Генетические типы промышленных месторождений .....	90
<b>Глава 8. МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ</b> .....	95
Краткие исторические сведения .....	95
Геохимия .....	95
Минералогия .....	96
Применение в промышленности .....	98
Ресурсы и запасы .....	98
Добыча и производство .....	100
Металлогения и эпохи рудообразования .....	100
Генетические типы промышленных месторождений .....	102
<b>Глава 9. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОЛЬФРАМА</b> .....	116
Краткие исторические сведения .....	116
Геохимия .....	116
Минералогия .....	117
Применение в промышленности .....	118
Ресурсы и запасы .....	118
Добыча и производство .....	119
Металлогения и эпохи рудообразования .....	120
Генетические типы промышленных месторождений .....	122
<b>Глава 10. МЕСТОРОЖДЕНИЯ МОЛИБДЕНА</b> .....	128
Краткие исторические сведения .....	128
Геохимия .....	128
Минералогия .....	129
Применение в промышленности .....	130
Ресурсы и запасы .....	130
Добыча и производство .....	131
Металлогения и эпохи рудообразования .....	132
Генетические типы промышленных месторождений .....	134

<b>Глава 11. МЕСТОРОЖДЕНИЯ СВИНЦА И ЦИНКА</b> .....	140
Краткие исторические сведения .....	140
Геохимия .....	140
Минералогия .....	141
Применение в промышленности .....	143
Ресурсы и запасы .....	144
Добыча и производство .....	146
Металлогения и эпохи рудообразования .....	147
Генетические типы промышленных месторождений .....	150
<b>Глава 12. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛОВА</b> .....	160
Краткие исторические сведения .....	160
Геохимия .....	160
Минералогия .....	161
Применение в промышленности .....	162
Ресурсы и запасы .....	163
Добыча и производство .....	165
Металлогения и эпохи минералообразования .....	165
Генетические типы промышленных месторождений .....	167
<b>Глава 13. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВИСМУТА</b> .....	173
Краткие исторические сведения .....	173
Геохимия .....	173
Минералогия .....	174
Применение в промышленности .....	175
Ресурсы и запасы .....	176
Добыча и производство .....	176
Металлогения и эпохи минералообразования .....	176
Генетические типы промышленных месторождений .....	177
<b>Глава 14. МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУРЬМЫ</b> .....	181
Краткие исторические сведения .....	181
Геохимия .....	181
Минералогия .....	182
Применение в промышленности .....	183
Ресурсы и запасы .....	184
Добыча и производство .....	185
Металлогения и эпохи рудообразования .....	185
Генетические типы промышленных месторождений .....	187
<b>Глава 15. МЕСТОРОЖДЕНИЯ РТУТИ</b> .....	193
Краткие исторические сведения .....	193
Геохимия .....	193
Минералогия .....	194
Применение в промышленности .....	195
Ресурсы и запасы .....	195
Добыча и производство .....	196
Металлогения и эпохи рудообразования .....	197
Генетические типы промышленных месторождений .....	199
<b>Глава 16. МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЯ</b> .....	204
Краткие исторические сведения .....	204
Геохимия .....	204
Минералогия .....	205

Применение в промышленности .....	206
Ресурсы и запасы .....	207
Добыча и производство .....	208
Металлогения и эпохи рудообразования .....	209
Генетические типы промышленных месторождений .....	211
<b>Глава 17. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА .....</b>	<b>221</b>
Краткие исторические сведения .....	221
Геохимия .....	223
Минералогия .....	223
Применение в промышленности .....	224
Ресурсы и запасы .....	224
Добыча и производство .....	226
Металлогения и эпохи рудообразования .....	226
Генетические типы промышленных месторождений .....	229
<b>Глава 18. МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕРЕБРА .....</b>	<b>238</b>
Краткие исторические сведения .....	238
Геохимия .....	238
Минералогия .....	239
Применение в промышленности .....	240
Ресурсы и запасы .....	241
Добыча и производство .....	241
Металлогения и эпохи рудообразования .....	243
Генетические типы промышленных месторождений .....	245
<b>Глава 19. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЛАТИНЫ И МЕТАЛЛОВ</b>	
<b>ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ .....</b>	<b>248</b>
Краткие исторические сведения .....	248
Геохимия .....	249
Минералогия .....	249
Применение в промышленности .....	250
Ресурсы и запасы .....	251
Добыча и производство .....	251
Металлогения и эпохи рудообразования .....	252
Генетические типы промышленных месторождений .....	253
<b>Глава 20. МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА И ТОРИЯ .....</b>	<b>258</b>
Краткие исторические сведения .....	258
Геохимия .....	258
Минералогия .....	260
Применение в промышленности .....	261
Ресурсы и запасы .....	262
Добыча и производство .....	263
Металлогения и эпохи рудообразования .....	264
Генетические типы промышленных месторождений урана .....	266
Генетические типы промышленных месторождений тория .....	272
<b>Глава 21. МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕДКИХ ЩЕЛОЧНЫХ</b>	
<b>ЭЛЕМЕНТОВ .....</b>	<b>273</b>
<b>Месторождения лития .....</b>	<b>273</b>
Краткие исторические сведения .....	273
Геохимия .....	273

Минералогия .....	274
Применение в промышленности .....	274
Ресурсы, запасы, добыча и производство .....	274
Металлогения и эпохи рудообразования .....	275
Генетические типы промышленных месторождений .....	276
<b>Месторождения цезия и рубидия .....</b>	<b>279</b>
Краткие исторические сведения .....	279
Геохимия .....	279
Минералогия .....	280
Применение в промышленности .....	280
Ресурсы, запасы, добыча, производство .....	280
Металлогения и эпохи рудообразования .....	281
Генетические типы промышленных месторождений .....	281
<b>Глава 22. МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ .....</b>	<b>284</b>
Краткие исторические сведения .....	284
Геохимия .....	284
Минералогия .....	285
Применение в промышленности .....	286
Ресурсы и запасы .....	286
Добыча и производство .....	287
Металлогения и эпохи рудообразования .....	288
Генетические типы промышленных месторождений .....	289
<b>Глава 23. МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕДКИХ ТУГОПЛАВКИХ     ЭЛЕМЕНТОВ .....</b>	<b>295</b>
<b>Месторождения ниобия и тантала .....</b>	<b>295</b>
Краткие исторические сведения .....	295
Геохимия .....	296
Минералогия .....	297
Применение в промышленности .....	297
Ресурсы и запасы .....	298
Добыча и производство .....	299
Металлогения и эпохи рудообразования .....	300
Генетические типы промышленных месторождений .....	300
<b>Месторождения циркония и гафния .....</b>	<b>302</b>
Краткие исторические сведения .....	302
Геохимия .....	302
Минералогия .....	303
Применение в промышленности .....	304
Ресурсы и запасы .....	304
Добыча и производство .....	305
Металлогения и эпохи рудообразования .....	306
Генетические типы промышленных месторождений .....	306
Заключение .....	309
Литература .....	312
Предметный указатель основных месторождений .....	318