В. Г. САМОЙЛИК
А. Н. КОРЧЕВСКИЙ

ОБОГАЩЕНИЕ РУД РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

«Инфра-Инженерия»

УДК 622.7:622.341
ББК 33.4+26.341.2
С17

Рекомендовано учёным советом ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
в качестве учебного издания для обучающихся
образовательных учреждений высшего образования
(протокол № 3 от 28.04.2023 г.)

Рецензенты:
доктор технических наук, профессор, заведующий отделом сдвижения земной поверхности и охраны подрабатываемых объектов РАНИМИ (г. Донецк) *Н. Н. Грищенков;*
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк) *С. В. Борщевский*

Самойлик, В. Г.

С17 Обогащение руд редких металлов : учебное пособие / В. Г. Самойлик, А. Н. Корчевский. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 380 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-1635-1

Представлены сведения о месторождениях, условиях залегания, минеральном составе, технических характеристиках, требованиях к качеству руд редких металлов. Подробно рассмотрены методы обогащения, применяемые в процессе переработки руд цветных металлов, возможные схемы их обогащения в зависимости от минерального состава исходного сырья и требований потребителей к качеству конечного продукта.

Для обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело» специализации «Обогащение полезных ископаемых» всех форм обучения.

УДК 622.7:622.341
ББК 33.4+26.341.2

ISBN 978-5-9729-1635-1

© Самойлик В. Г., Корчевский А. Н., 2024
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 8

РАЗДЕЛ I
РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 12

Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ 12
1.1. Общее понятие о группе редких металлов 12
1.2. Классификация редких металлов 17
1.3. Типы руд и месторождений редких металлов 18
1.4. Общие принципы обогащения коренных руд и россыпей редких металлов 27
1.4.1. Способы первичного обогащения руд и россыпей редких металлов 28
1.4.2. Способы доводки черновых концентратов 30

РАЗДЕЛ II
ОБОГАЩЕНИЕ РУД ЛЁГКИХ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ 38

Глава 2. ЛИТИЙ 39
2.1. Основные свойства и области применения лития 39
2.2. Распространение в природе и типы месторождений 43
2.3. Сырьевая база литиевых руд 50
2.4. Практика обогащения литиевых руд 52
2.4.1. Гравитационное обогащение литиевых руд 53
2.4.2. Термическое обогащение (декрипитация) 54
2.4.3. Магнитные методы обогащения литиевых руд 56
2.4.4. Флотационное обогащение литиевых руд 57
2.5. Практика извлечения солей лития из природных высокоминерализованных вод 60
Глава 3. РУБИДИЙ И ЦЕЗИЙ 65
3.1. Основные свойства и области применения металлов 65
3.2. Распространение в природе и типы месторождений 70
3.3. Сырьевая база рубидия и цезия 74

3.4. Практика извлечения цезия и рубидия из исходного сырья..... 76
3.4.1. Обогащение поллуцитовых руд 76
3.4.2. Извлечение цезия из поллуцитовых концентратов..... 77
3.4.3. Извлечение рубидия и цезия из лепидолитов 80
3.4.4. Извлечение рубидия и цезия из карналлитов..... 81
Глава 4. БЕРИЛЛИЙ..... 83
4.1. Основные свойства и области применения бериллия..... 83
4.2. Распространение в природе и типы месторождений 87
4.3. Сырьевая база бериллия 94
4.4. Практика обогащения бериллиевых руд..... 96
4.4.1. Сортировка бериллиевых руд..... 97
4.4.2. Избирательное измельчение бериллиевых руд..... 98
4.4.3. Флотационное обогащение бериллиевых руд..... 100

РАЗДЕЛ III
ОБОГАЩЕНИЕ РУД ТУГОПЛАВКИХ
РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ..... 106

Глава 5. ЦИРКОНИЙ И ГАФНИЙ..... 108
5.1. Основные свойства и области применения циркония и гафния 108
5.2. Распространение в природе и типы месторождений 112
5.3. Сырьевая база циркония и гафния..... 116
5.4. Кондиции на руды и концентраты циркония и гафния 120
5.5. Практика извлечения циркония и гафния из циркониевых руд
и россыпей..... 121
5.5.1. Обогащение циркониевых руд……..... 121
5.5.2. Извлечение циркония из цирконовых концентратов 123
5.5.3. Извлечение гафния из цирконовых концентратов…..... 125
Глава 6. ТИТАН……... 128
6.1. Основные свойства и области применения титана….. 128
6.2. Распространение в природе и типы месторождений… 131
6.3. Сырьевая база титана..... 136
6.4. Кондиции на титансодержащие концентраты 140
6.5. Практика обогащения титансодержащих руд и россыпей 143
6.5.1. Обогащение титансодержащих россыпей 143
6.5.2. Обогащение титансодержащих руд 149

6.5.3. Способы переработки титансодержащих концентратов 153
Глава 7. НИОБИЙ И ТАНТАЛ 156
7.1. Основные свойства и области применения ниобия и тантала 156
7.2. Распространение в природе и типы месторождений 160
7.3. Сырьевая база ниобия и тантала 168
7.4. Кондиции на ниобиевые и танталовые концентраты 171
7.5. Практика обогащения танталониобиевых руд 173
7.5.1. Обогащение карбонатитовых пирохлоровых руд 174
7.5.2. Обогащение колумбит-танталитовых руд 179
7.5.3. Обогащение лопаритовых руд 183
Глава 8. ВОЛЬФРАМ 186
8.1. Основные свойства и области применения вольфрама 186
8.2. Распространение в природе и типы месторождений 188
8.3. Сырьевая база вольфрама 193
8.4. Кондиции на вольфрамовые концентраты 197
8.5. Практика обогащения вольфрамовых руд 200
8.5.1. Обогащение вольфрамитовых руд 202
8.5.2. Обогащение шеелитовых руд 207
Глава 9. ВАНАДИЙ 217
9.1. Основные свойства и области применения ванадия 207
9.2. Распространение в природе и типы месторождений 221
9.3 Сырьевая база ванадия 225
9.4. Переработка ванадийсодержащих руд 229
9.4.1. Обогащение ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд 229
9.4.2. Получение ванадия из титаномагнетитового сырья 232
9.4.3. Переработка собственно ванадиевых руд и концентратов 237
9.5. Получение ванадия из нефтепродуктов 239

РАЗДЕЛ IV
ИЗВЛЕЧЕНИЕ РАССЕЯННЫХ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ
ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ 242

Глава 10. ГАЛЛИЙ, ИНДИЙ, ТАЛЛИЙ 244
10.1. Основные свойства и области применения металлов 244

10.2. Распространение в природе и типы месторождений 249
10.3. Технологии извлечения галлия, индия и таллия
из исходного сырья 253
10.3.1. Технологии получения галлия 253
10.3.2. Технологии получения индия 258
10.3.3. Технологии получения таллия 262
Глава 11. ГЕРМАНИЙ 264
11.1. Основные свойства и области применения германия 264
11.2. Распространение в природе и типы месторождений.. 267
11.3. Сырьевая база германия 268
11.4. Технологии извлечения германия из исходного сырья 269
Глава 12. СЕЛЕН И ТЕЛЛУР 275
12.1. Основные свойства и области применения селена и теллура 275
12.2. Распространение в природе и типы месторождений 278
12.3. Технологии извлечения селена и теллура из исходного сырья.... 281
Глава 13. РЕНИЙ 286
13.1. Основные свойства и области применения рения.. 286
13.2. Распространение в природе и типы месторождений 289
13.3. Сырьевая база рения 290
13.4. Технологии извлечения рения из исходного сырья 291

Раздел V
ОБОГАЩЕНИЕ РУД И РОССЫПЕЙ
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ 297

Глава 14. ИТТРИЙ, ЛАНТАН И ЛАНТАНОИДЫ 298
14.1. Основные свойства и области применения 298
14.2. Распространение в природе и типы месторождений 302
14.3. Сырьевая база редкоземельных металлов 307
14.4. Обогащение россыпей редкоземельных металлов 311
14.5. Обогащение коренных руд редкоземельных металлов 315
14.6. Методы разделения редкоземельных металлов 318
Глава 15. СКАНДИЙ 321
15.1. Основные свойства и области применения скандия 321
15.2. Распространение в природе и типы месторождений 323
15.3. Сырьевая база скандия 327

15.4. Технологии извлечения скандия из исходного сырья 329
15.4.1. Способы переработки скандийсодержащего сырья 329
15.4.2. Технологические схемы извлечения скандия из продуктов переработки руд цветных металлов 331

Раздел VI
ОБОГАЩЕНИЕ РУД И РОССЫПЕЙ РАДИОАКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ..... 337

Глава 16. УРАН 342
16.1. Основные свойства и области применения урана 342
16.2. Распространение в природе и типы месторождений 346
16.3. Сырьевая база урана..... 351
16.4. Технологические свойства урановых руд 354
16.5. Практика обогащения урановых руд 356
16.5.1. Методы переработки урановых руд 356
16.5.2. Переработка урановых руд после горной добычи 358
16.5.3. Переработка урановых руд способом подземного выщелачивания (СПВ) 365
Приложение 1. Химический и минеральный состав основных рудных минералов редких металлов 369
Приложение 2. Важнейшие промышленные генетические типы месторождения редких и рассеянных элементов 371

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 374

РАЗДЕЛ I
РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

1.1. Общее понятие о группе редких металлов

В технической литературе часто используются понятия «редкие металлы» и «редкие элементы». Возникает закономерный вопрос – эти понятия характеризуют одни и те же элементы? А если нет – то в чём отличия?

«Редкий элемент» – понятие геохимическое. Оно характеризует низкое содержание данного элемента в земной коре.

Исследованием распространенности элементов в земной коре и нахождением их средних содержаний занимались уже в XVIII веке. Американский учёный Ф. У. Кларк в 1899 г. установил химический состав земной коры. Последующие исследования (А. Е. Ферсман, В. М. Гольдшмидт, В. И. Вернадский, А. П. Виноградов и др.) подтвердили оценку Ф. У. Кларка и дополнили его данные сведениями о ранее не известных элементах. Большая роль в этой работе принадлежит отечественной школе геохимиков. Классификация элементов по величине их распространенности в природе была сделана В. И. Вернадским [5]. Это естественнонаучный подход к определению редкости элемента. Вернадский все элементы по распространенности разделил на 13 декад. Наиболее распространенные – в первых декадах, наименее – в последних. Величина распространенности оценивается в кларках.

Кларк – отношение величины запаса элемента в земной коре к весу земной коры (в %). Под земной корой понимают оболочку земного шара, начиная от уровня моря вглубь на 16 км. Вес земной коры $(2{,}0–2{,}2) \cdot 10^{19}$ т.

С точки зрения отечественной геохимической школы редкими элементами считаются те, у которых кларк $\leq 0{,}001$ %.

В табл. 1.1 приведены данные по среднему химическому составу земной коры (по А. П. Виноградову). Химические элементы расположены в каждой декаде в убывающем порядке по их содержанию в земной коре.

Таблица 1.1 – Средний химический состав земной коры

Декада	Пределы содержания элемента, %	Химические элементы	Содержание элемента, %	
			первого в декаде	последнего в декаде
1	*2*	*3*	*4*	*5*
I	50–10	***O, Si***	47	29
II	10–1	***Al, Fe, Ca, Na, K, Mg***	8,8	2,1
III	1–0,1	***Ti, H, C***	0,45	0,1
IV	0,1–0,01	***Mn, P, S, Ba, Cl, Sr, Rb, F, Zr, Cr, V, Cu, N***	0,09	0,01
V	10^{-2}–10^{-3}	***Ni, Li, Zn, Ce, Sn, Co, Y, Nd***	0,08	$1\cdot10^{-3}$
VI	10^{-3}–10^{-4}	***La, Pb, Ga, Nb, Gd, Th, Cs, Pr, Sm, Ge, Be, Sc, As, Dy, Er, Yb, U, Tl, Mo, Hf, B, Br, Ho, Eu, W, Lu***	$2{,}9\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-4}$
VII	10^{-4}–10^{-5}	***Tm, Se, Cd, Sb, J, Bi, Ag, Jn***	$2{,}7\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-5}$
VIII	10^{-5}–10^{-6}	***Hg, Os, Pd, Te***	$7\cdot10^{-6}$	$1\cdot10^{-6}$
IX	10^{-6}–10^{-7}	***Ru, Pt, Au, Rh, Re, Jr***	$5\cdot10^{-7}$	$1\cdot10^{-7}$
X	$>10^{-9}$	***Ac, Ra, Pa, Po, Pu, Rn***	$6\cdot10^{-10}$	$7\cdot10^{-16}$

Кларки элементов непрерывно уточняются, пересматриваются. Установлено, что 99,79 масс. % земной коры построено из 10 элементов: ***O***, ***S***, ***Al***, ***Fe***, ***Ca***, ***Na***, ***Mg***, ***K***, ***H_2***, ***Ti***; остальные элементы – 0,21 масс. %.

Для перспектив развития любой отрасли техники вопросы обеспеченности сырьем весьма актуальны. Распространенность того или иного элемента или его «редкость» очень существенны, так как при эксплуатации сырья необходимо знать, на что может в перспективе рассчитывать перерабатывающая промышленность, ибо «редкость» элемента может быть препятствием для его промышленного использования. Следовательно, геохимический подход важен, но недостаточен и вот почему: существует естественный барьер на пути использования любого элемента – глубина залегания минерального сырья. Кроме того, важнейшим обстоятельством является степень концентрации элемента в отдельных участках земной коры (месторождениях).

Степень концентрации необходима для оценки промышленной доступности, ибо значительные количества элемента могут быть настолько рассеянны и распространены в массе вмещающей породы, что оказываются недоступны для извлечения и использования.

Кларк характеризует общие запасы элемента. Для практических целей необходимо, чтобы содержание элемента в месторождении было значительно больше среднего содержания в земной коре. Отношение содержания элемента в месторождении к кларку называют ***коэффициентом концентрации (K)***. Коэффициент концентрации показывает, во сколько раз концентрация элемента в эксплуатируемых рудах больше его содержания в земной коре:

$$K = \frac{C}{Кларк}, \%$$

где C – концентрация элемента в руде.

К числу элементов, у которых коэффициенты концентрации велики, относятся ***Bi, As, Sb, Hg, Pb, Sr, Cd*** (табл. 1.2), малая величина коэффициента у ***Ti***, ***Li*** и ***V***. У ряда элементов концентрация в месторождениях не сильно отличается от кларка, они относительно равномерно распространены в природе [6].

Рассеянность элемента приводит к тому, что элементы более распространенные, но весьма распыленные в природе оказываются более редкими. Рассеянность, отсутствие концентрированных скоплений на долгое время задержало открытие ряда элементов, которое было сделано уже с применением метода спектрального анализа. Это относится к ***Ge*** и ***Ga***, более распространенным, чем ***Sb, Ag, Bi***.

Таблица 1.2 – Коэффициенты концентрации некоторых элементов в месторождениях, имеющих промышленное значение

Элемент	Содержание во внешней сфере Земли, кларк	Содержание в месторождении, % масс.		Средний коэффициент концентрации
1	*2*	*3*	*4*	*5*
Li	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	0,9		140
Be	$6{,}0 \cdot 10^{-4}$	3,0		5000
B	$5{,}6 \cdot 10^{-4}$	4,0	2,0	7140

Окончание таблицы 1.2

1	*2*	*3*	*4*	*5*
Al	8,8	27	16	3,4
Si	29	47		1,7
Ti	0,45	37	10	86
V	0,015	1	0,5	67
Co	0,004	2,5	1,0	625
Se	$1 \cdot 10^{-5}$	0,02		2000
Sr	0,015	43	35	2867
Mo	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	1,9	0,5	1367
Cd	$5 \cdot 10^{-5}$	0,6		12000
Ce	$4{,}6 \cdot 10^{-3}$	1,5	1	326
W	$6{,}0 \cdot 10^{-3}$	0,8	0,5	116
Pt	$5 \cdot 10^{-7}$	0,001		2000
Bi	$2 \cdot 10^{-5}$	2,0	1,0	100000
Th	$7{,}4 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,1	411
U	$2 \cdot 10^{-4}$	1,0	0,5	5000

Использование каждого элемента зависит не только от геохимической «редкости», но и от уровня развития производительных сил общества. По мере развития науки и техники расширялся круг элементов, используемых человеком.

Общепризнанный в настоящее время термин ***«редкие металлы»*** возник в начале XX в., когда данные металлы только начали использоваться, т. е. применялись редко. И до настоящего времени этот термин в определенной степени отражает ряд их особенностей:

- сравнительно небольшие масштабы производства и потребления (один из наиболее известных редких металлов рубидий производится в количествах, примерно в 130 раз меньших по сравнению с алюминием);
- малая распространенность в природе;
- большинство редких металлов не образуют в природе самостоятельных минералов и находятся в рассеянном состоянии в кристаллических решетках других минералов, многие из них явля-

ются природными спутниками тяжёлых и легких цветных металлов;

– очень низкое содержание в рудах и крайне сложный состав такого сырья;
– помимо рудного сырья, источником получения редких цветных металлов являются промышленные отходы цветной и черной металлургии, химических производств.

Редкими металлами в современной технике условно называют некоторые химические элементы, в большинстве по своим свойствам металлы, области возможного использования, природные ресурсы и технология производства которых уже достаточно определены, но которые еще редко и в относительно малых количествах применяются в промышленности, поскольку при достигнутом ранее уровне техники еще можно было обойтись без их широкого использования. На рис. 1.1 цветом выделены редкие металлы в Периодической таблице Д. И. Менделеева.

I	II	III	IV	V	VI	VII
Li литий	**Be** бериллий	B	C	N	O	F
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
K	Ca	**Sc** скандий	Ti	**V** ванадий	Cr	Mn
Cu	Zn	**Ga** галлий	**Ge** германий	As	**Se** селен	Br
Rb рубидий	**Sr** стронций	**Y** иттрий	**Zr** цирконий	**Nb** ниобий	Mo	Br
Ag	**Cd** кадмий	**In** индий	Sn	Sb	**Te** теллур	I
Cs цезий	Ba	**La*** лантан	**Hf** гафний	**Ta** тантал	W	**Re** рений
Au	Hg	**Tl** таллий	Pb	**Bi** висмут	Po	At

*Лантаноиды (Ln)

Ce церий	**Pr** празеодим	**Nd** неодим	**Pm** прометий	**Sm** самарий	**Eu** европий	**Gd** гадолиний
Tb тербиц	**Dy** диспрозий	**Ho** гольмий	**Er** эрбий	**Tm** тулий	**Yb** иттербий	**Lu** лютеций

Рисунок 1.1 – Редкие металлы в Периодической таблице Д. И. Менделеева

Использование редких металлов началось в конце XIX века. Первым из их числа получил признание *вольфрам*, за ним – *молибден* (в настоящее время в ряде документов выведенные из классификации РМ), *ниобий, тантал*, а затем – постепенно и остальные.

Таким образом, в понятие ***«редкие металлы»*** вкладывается историческое содержание, учитывающее время открытия металла, начало развития его производства, а также в ряде случаев распространённость в земной коре и содержание его в рассеянном виде или в виде самостоятельных минералов.

1.2. Классификация редких металлов

Редкие металлы (РМ), согласно промышленной классификации [7], подразделяют на пять подгрупп в зависимости от физико-химических свойств, совместного нахождения в рудном сырье и сходства методов извлечения из сырья. Важнейшие обобщающие характеристики этих металлов заключены в названиях выделенных подгрупп: лёгкие, тугоплавкие, рассеянные, редкоземельные и радиоактивные.

1. ***Лёгкие редкие металлы.*** В данную подгруппу входят редкие металлы I и II групп периодической системы Д. И. Менделеева. Их отличают малая плотность (меньше 2000 кг/м^3) и высокая химическая активность. Лёгкие редкие металлы получают электролизом расплавов солей или металлотермическим способом. К подгруппе редких легких металлов относят: *литий, рубидий, цезий, бериллий.*

2. ***Тугоплавкие редкие металлы.*** К ним относятся переходные элементы IV, V и VI групп периодической системы Д. И. Менделеева, у которых происходит достройка электронного *d*-уровня. Эти особенности определяют физические и химические свойства рассматриваемой подгруппы металлов: высокую температуру плавления, прочность, коррозионную стойкость, а также переменную валентность, многообразие химических соединений. Все тугоплавкие редкие металлы образуют тугоплавкие и твёрдые карбиды, бориды и силициды. Тугоплавкие редкие металлы объединяют области применения. К подгруппе тугоплавких металлов относят *цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам, титан.*

3. ***Рассеянные редкие металлы***. Общим признаком металлов этой подгруппы является рассеянность в земной коре и нахождение их в виде изоморфной примеси в решетках ряда минералов цветных металлов.

К подгруппе редких рассеянных металлов относят: *галлий, индий, таллий, германий, скандий, гафний, селен, теллур, рений, рубидий.*

В соответствии с ГОСТ Р 59129-2020 [7] *гафний* может быть отнесен как к рассеянным, так и к тугоплавким редким металлам, *рубидий* – как к рассеянным металлам, так и к лёгким редким металлам, *скандий* – как к рассеянным редким, так и к редкоземельным металлам.

Рассеянные редкие металлы извлекают попутно при производстве цветных металлов и в некоторых других производствах, в т. ч. при переработке отходов. Так *галлий* извлекают из отходов производства алюминия; *индий, таллий и германий* – из промпродуктов и отходов цинкового и свинцового производства; *рений* – при переработке молибденового сырья; *гафний* – циркониевого сырья.

4. ***Редкоземельные металлы.*** Это – подгруппа редких металлов, редко встречающихся в земной коре, образующих нерастворимые окислы и являющихся химически активными.

К редкоземельным металлам относят: *скандий, иттрий, лантан и лантаноиды.* В рудном сырье эти металлы сопутствуют друг другу и сложно подвергаются разделению. Для разделения используют метод экстракции органическими растворителями и ионообменные процессы.

5. ***Радиоактивные редкие металлы***. К этой подгруппе относятся редкие металлы, изотопы которых радиоактивны, т. е. самопроизвольно излучают поток элементарных частиц.

К естественным радиоактивным металлам относят: *полоний, радий, торий, актиний, уран, протактиний*.

К искусственно получаемым радиоактивным металлам относят: *технеций, прометий, астат, франций*, в том числе трансурановые элементы – от *плутония* до *курчатовия*.

Особенности их технологии и области использования в значительной степени определяются задачами атомной промышленности.

1.3. Типы руд и месторождений редких металлов

По минеральному составу все руды подразделяются на сульфидные, окисленные и смешанные. Минералы редких металлов, как правило, являются несульфидными соединениями: оксидами, силикатами, алюмосиликатами, карбонатами, фосфатами, что и определяет основные характеристики руд редких металлов.

К оксидам относят минералы *титана* – ильменит, рутил, ильменорутил, перовскит; минералы *тантала и ниобия* – танталит, колумбит, пирохлор, микролит, лопарит; циркониевый минерал – бадделеит. Силикатами представлены минералы *урана* и *тория* – берилл, фенакит, бертрандит. Циркон и эвдиалит относятся к группе ортосиликатов. К алюмосиликатам относятся литиевые минералы – сподумен, петалит, ряд минералов бериллия. Известны минералы редких металлов, образующие группы сульфатов, арсенатов, фосфатов, гидроксидов, ванадатов. Химический и минеральный состав основных рудных минералов редких металлов приведен в приложении 1.

В рудах редких металлов часто присутствуют минералы цветных металлов, содержащие в рассеянном виде редкие металлы. К ним относятся оксиды и гидроксиды железа, алюминия, карбонаты и силикаты кальция, магния, железа и многие другие. В таблице 1.3 приведены минералы-носители рассеянных редких металлов [8].

Таблица 1.3 – Рассеянные металлы в минералах-носителях

Металл	Минерал-носитель
1	*2*
Скандий	Вольфрамит, касситерит, циннвальдит, берилл
Рений	Молибденит, борнит, халькопирит
Индий	Сфалерит, станнин, килиндрит, франкеит, тиллит, касситерит, кобальтин
Кадмий	Сфалерит
Галлий	Сфалерит, халькопирит, энаргит, германит
Германий	Борнит, сфалерит, халькопирит, энаргит, тетраэдрит, теннантит, сильванит
Таллий	Галенит, сульфосоли свинца, колломорфный пирит, марказит, колломорфный молибденит
Селен	Халькопирит, пирит, пирротин, галенит, арсенопирит, блеклые руды, молибденит, киноварь
Теллур	Висмутин, галенит, халькопирит, пирит

Исходя из формы нахождения элементов, редкометалльные руды могут быть подразделены на руды, в которых РМ присутствуют в виде собственных редкометалльных минералов и составляют их основную

промышленную ценность, и руды, используемые для получения широко распространённых металлов и неметаллов, в которых РМ присутствуют в виде изоморфных примесей и извлекаются как попутные компоненты.

Как правило, руды редких металлов являются комплексными и содержат по несколько ценных компонентов, например: литий-цезиевые; цирконий-ниобиевые; уран-ванадиевые; титан-ниобий-тантал-редкоземельные и т. д.

В соответствии с особенностями минералогического состава редкометалльных руд месторождения редких металлов можно разделить на две группы [9].

1. ***Месторождения, в которых редкие металлы заключены в собственных минералах.*** Известно большое число редкометалльных минералов, но промышленные скопления образуют лишь немногие из них (табл. 1.4).

Таблица 1.4 – Главные промышленные минералы редкометалльных месторождений

Металл	Минерал	Химическая формула	Оксиды РМ	Содержание оксидов в минерале, %
1	*2*	*3*	*4*	*5*
Li	Сподумен	$LiAlSi_2O_6$	Li_2O	5,8–7,6
	Лепидолит	$K_2Li_3Al_5Si_6O_{20}(FOH)_4$	Li_2O	3,4–4,1
	Петалит	$LiAlSi_4O_{10}$	Li_2O	3,2–4,5
Cs	Поллуцит	$CsAlSi_{12}O_6 \cdot nH_2O$	Cs_2O	до 30
Be	Берилл	$Be_3Al_2Si_6O_{18}$	BeO	10–14
	Бертрандит	$Be_4Si_2O_7(OH)_2$	BeO	40–43
Nb, Ta	Пирохлор	$(Na, Ca)_2(Nb, Ta)_2O_6(F, OH)$	Nb_2O_5	40–71
			Ta_2O_5	0,2–10
	Колумбит	$(Fe, Mn)(Nb, Ta)_2O_6$	Nb_2O_5	40–76
			Ta_2O_5	1–40
	Танталит	$FeTa_2O_6$	Ta_2O_5	40–81
			Nb_2O_5	7–40
	Лопарит (Россия)	$NaCe(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	Ta_2O_5	0,6
			Nb_2O_5	6–8

Окончание таблицы 1.4

1	*2*	*3*	*4*	*5*
TR* ***(Ln + Y)***	Бастнезит	$(Ce, La)CO_3(F, OH)$	TR_2O_3	75
	Монацит	$(Ce, La)PO_4$	TR_2O_3	70
	Ксенотим	YPO_4	TR_2O_3	61
Zr	Циркон	$ZrSiO_4$	ZrO_2	53–68
	Бадделеит	ZrO_2	ZrO_2	95–98

* ***TR***: аббревиатура, обозначающая «редкие земли» (*Terrae rarae*)

В одном и том же месторождении обычно встречаются вместе несколько редкометалльных минералов.

2. ***Месторождения, где редкие металлы извлекают попутно при переработке других полезных ископаемых.*** Сырьевыми источниками редких металлов попутной добычи являются руды цветных металлов – меди, молибдена, свинца, цинка, олова, алюминия. Из таких руд извлекают ***Bi, Ge, Ga, In, Re, Se, Te, Tl, Cd***. *Германий* извлекают также из бурых углей, *гафний* и *рубидий* – при переработке редкометалльных руд, *ванадий* – из руд железа и титана. Эти химические элементы относятся к подгруппе рассеянных редких металлов. Их минералы чрезвычайно редки и не образуют промышленных скоплений. Единственным исключением является *висмут*, для которого известны редкие собственные месторождения, которые пока не разрабатываются.

Многие месторождения редких металлов образуются в результате глубинной магматической деятельности. Их преобразование в верхних частях земной коры под влиянием физического и химического выветривания (разрушения) нередко приводит к концентрированию редкометалльных минералов, многие из которых весьма устойчивы. Для отдельных металлов (***Sr, Zr, Li***) известны крупные осадочные месторождения, которые образуются вблизи земной поверхности.

Редкометалльные месторождения существенно различаются по геологическому строению и технологическим свойствам [10, 11]. Рассмотрим характеристик основных типов месторождений редких металлов.

Редкометалльные пегматиты

Редкометалльные пегматиты – крупнокристаллические породы, состоящие в основном из кварца и полевого шпата и богатые минералами, содер-

жащими летучие вещества (воду, фтор, бор, хлор). Они образованы в результате медленной кристаллизации гранитных расплавов в изолированных полостях. Возраст наиболее крупных пегматитовых месторождений превышает 2 млрд лет.

Пегматиты залегают в виде гнёзд, жил и линз, достигающих многих сотен метров, а иногда нескольких километров в длину при толщине до 100 м. Наиболее крупные, издавна разрабатываемые пегматитовые месторождения – Берник-Лейк в Канаде, Бикита в Зимбабве, Карибиб в Намибии, Гринбушес в Австралии, Коктогай в Китае.

Выделяют несколько минеральных типов пегматитов, которые различаются набором редкометалльных минералов. В некоторых из них ведущее значение имеют *литиевые* и *танталовые* минералы, в других – минералы *бериллия*, например, берилл. Наибольшим разнообразием полезных компонентов обладают сподуменовые пегматиты с лепидолитом, поллуцитом, танталитом и бериллом.

Пегматитовые месторождения обычно имеют небольшие запасы: тысячи тонн *тантала, ниобия, бериллия, рубидия*, десятки тысяч тонн *цезия*, сотни тысяч тонн *лития*. Тем не менее до начала 60-годов именно в них были сосредоточены 100 % запасов *лития, бериллия, цезия* и *рубидия*, 95 % *тантала*, 25 % *ниобия*, и именно эти месторождения служили главным объектом добычи этих металлов. Для *цезия* и *рубидия* пегматиты и сейчас остаются единственным сырьевым источником, имеющим промышленное значение.

Россыпи

Редкометалльные минералы, устойчивые к химическому и физическому выветриванию, накапливаются в россыпях. Минералы группы танталита – колумбита концентрируются в россыпях ближнего сноса, коренным источником которых могут быть редкометалльные граниты и пегматиты. Запасы таких россыпей обычно невелики, но в Африке они отрабатываются в основном дешевым старательским способом. До 1960 года главным поставщиком ниобиевых (колумбитовых) концентратов была Нигерия, где разрабатывались выветрелые граниты и россыпи в рыхлых отложениях, намытых реками. В настоящее время, когда на мировом рынке ощущается острая нехватка *тантала*, его старательская добыча из россыпей и кор выветривания активизировалась во многих странах Африки – Конго, Нигерии, Бурунди, Руанде.

Тяжёлые минералы циркония и РЗМ (циркон и монацит) концентрируются в крупных пластообразных прибрежно-морских россыпях, главными полезными минералами которых являются ильменит ($FeTiO_3$) и рутил (TiO_2), служащие сырьём для производства *титана*. Несмотря на относительно низкое содержание тяжёлых минералов (обычно 5–15 % в кварцевых песках), россыпи выгодно отрабатываются сравнительно простыми и дешевыми способами. Из прибрежно-морских россыпей и по сей день извлекают 100 % добываемого в зарубежных странах циркона, а также некоторое количество монацита.

Карбонатиты и коры их выветривания

Карбонатиты – продукты кристаллизации глубинных карбонатных расплавов (магм). Месторождения карбонатитов и их кор выветривания (***Nb***), а также коренных карбонатитовых месторождений (***La, Ce, Pr, Nd***). По сравнению с пегматитами и россыпями это были богатые и очень крупные месторождения, два из которых были быстро освоены промышленностью и стали основными источниками ниобиевого и редкоземельного сырья в мире: Араша в Бразилии и Маунтин-Пасс в США. Запасы полезных компонентов в них измерялись уже несколькими миллионами тонн при содержании в первом из них 2,5 % Nb_2O_5 (в коре выветривания), во втором 7–8 % TR_2O_3.

Щелочные интрузивные комплексы, включающие карбонатиты, залегают среди древних пород, возраст которых на сотни миллионов лет превышает возраст самих месторождений: мезозойский (120–90 млн лет) и палеозойский (550–250 млн лет) для пирохлоровых карбонатитов и позднепротерозойский (1400 млн лет) для бастнезитовых.

К настоящему времени на земном шаре известно около 20 месторождений пирохлоровых карбонатитов и их кор выветривания. Из коренных карбонатитовых месторождений, в которых содержание пирохлора в руде обычно не более 1–1,5 %, разрабатывается только месторождение Сент-Оноре в Канаде (0,9 % Nb_2O_5 в руде). В корах выветривания карбонатитов концентрация пирохлора увеличивается в несколько раз, поскольку породообразующие минералы кальция и магния при выветривании растворяются и выносятся. Вертикальная протяженность кор выветривания в тропических странах достигает сотен метров, а занимаемая ими площадь – нескольких десятков квадратных километров. Только одно

месторождение Араша в Бразилии способно обеспечивать современный уровень производства и потребления ниобия в течение 500 лет, а в мире известны ещё более крупные и богатые месторождения этого типа.

Среди бастнезитовых (редкоземельных) карбонатитов известны гигантские по запасам и очень богатые месторождения. В Китае в начале 80-х годов XX века освоено коренное карбонатитовое месторождение Баюнь Обо, запасы в котором составляют 36 млн т TR_2O_3 при содержании 5–6 %, а прогнозные ресурсы – около 100 млн т. Самое богатое по содержанию полезного компонента в руде редкометалльное месторождение Маунт-Уэлд было в 80-х годах разведано в Австралии. Богатые участки коры выветривания карбонатитов содержат 23,6 % TR_2O_3 в расчете на 1 млн т их запасов, а при содержании 16,7 % TR_2O_3 запасы увеличиваются до нескольких миллионов тонн. На месторождении Маунт-Уэлд известны также зоны с высокой концентрацией *тантала* (0,034 % Ta_2O_5) и *ниобия* (0,9 % Nb_2O_5).

В России редкие металлы добывают в бедном по содержанию, но крупном по запасам нескольких металлов Ловозерском месторождении лопарита. Оно расположено на Кольском полуострове и связано с крупным массивом нефелиновых сиенитов – магматических пород, в основном состоящих из алюмосиликатов натрия и калия. Такие массивы на Земле исключительно редки. Возраст Ловозерского массива – 300 млн лет. Ловозерское месторождение – главный в России промышленный источник многих видов редких металлов: *тантала, ниобия* и редкоземельных элементов (*лантана, церия, празеодима, неодима, самария, европия* и *гадолиния*).

Редкометалльные щелочные граниты

Редкометалльные щелочные граниты – это самые крупные по запасам месторождения *тантала* и *иттриевых* РЗМ, а также крупнейшие коренные месторождения *циркония*. В плане они, как правило, имеют округлую или овальную форму с поперечником от 1 до 5–6 км, а на глубину оруденение распространяется на сотни метров. Щелочногранитные месторождения характеризуются постоянным набором полезных компонентов и относительно устойчивым их содержанием: 0,02–0,04 % Ta_2O_5, 0,3–0,4 % Nb_2O_5, 0,5–1,3 % ZrO_2 и 0,2 % TR_2O_3. *Тантал* и *ниобий* в соотношении 1 : 10 концентрируются в пирохлоре и колумбите, *цирконий* – в цирконе.