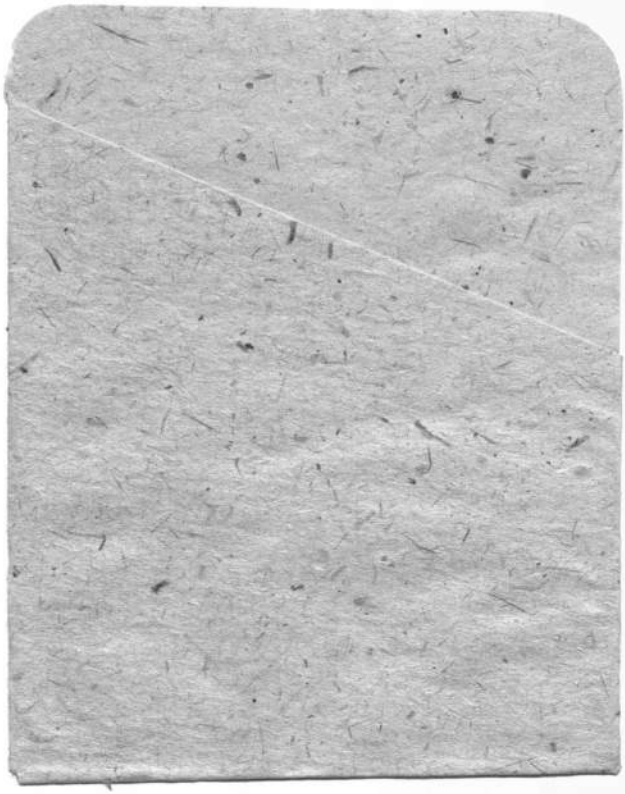
Г.А. ЮРГЕНСОН

# МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЁ ЗАБАЙКАЛЬЯ





Читинский государственный университет
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

**Г.А. Юргенсон**

# Минеральное сырье Забайкалья

Учебное пособие
**Часть I**
**Книга 2**

# Редкие элементы

Рекомендовано Дальневосточным региональным учебно-методическим центром (ДВ РУМЦ) в качестве учебного пособия для студентов специальностей 130201 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых», 130404 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых», 130405 «Обогащение полезных ископаемых», 020101 «Химия» вузов региона.
Протокол № 1 от 12.01.2006 г.

Чита, «Поиск», 2008

К33.2+26.303я73+33.3я73
Ю-66

УДК 549 (075.3)
ББК 26.303+33.34.я73
Ю 66

Утверждено к печати учеными советами
Читинского государственного университета и
Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН

Рецензенты:
Кандидат геолого-минералогических наук Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
**Б.Н. Абрамов**
Доктор технических наук, профессор ЧитГУ
**А.В. Фатьянов**
Доктор геолого-минералогических наук, профессор ЧитГУ
**А.И. Трубачёв**
Кандидат геолого-минералогических наук, доцент ЗабГГПУ
**В.А. Кривенко**

Ответственный за выпуск – **В.И. Летунов,**
кандидат химических наук, профессор ЧитГУ

**Юргенсон Г.А.**

Ю 66 Минеральное сырье Забайкалья: Учебное пособие. Часть I. Книга 2. Редкие элементы. – Чита: Поиск, 2008. – 240 с., ил.

ISBN 978-5-93119-218-5

Учебное пособие написано в соответствии с программой обучения студентов химических, горных и географических специальностей университетов с учетом современных требований к минеральному сырью, определяемых законодательной базой недропользования. Сделан акцент на оценку влияния геологоразведочных, добычных и обогатительных производств на окружающую среду. Рассмотрены свойства, распространенность, минералогия редких элементов. Дано краткое описание их важнейших месторождений, способы добычи и переработки сырья.

Для студентов химических, горных, географических, экологических и других специальностей, связанных с использованием минерального сырья, предпринимателей, менеджеров и всех, интересующихся полезными ископаемыми.

УДК 594(075.3)
ББК 26.303+33.34.я73

ФОНД
краеведения

© Юргенсон Г.А., 2008
© ЧитГУ, 2008
© ИПРЭК СО РАН, 2008
© Книжное издательство «Поиск», 2008

ISBN 978-5-93119-218-5

с. 755565

Читинская областная
библиотека
им. А.С. Пушкина

# Предисловие

В Первой книге Первой части учебного пособия «Минеральное сырье Забайкалья» (Главы 1–8) были даны общие сведения о минеральном сырье, его современной классификации, способах определения качества, добычи и переработки, а также месторождениях черных и цветных металлов на территории Забайкалья. В предлагаемой читателю Второй книге Первой части пособия (Глава 9) рассмотрен этот же спектр данных для минерального сырья редких элементов. В качестве источников информации использованы как опубликованная, так и фондовая литература, а также собственные данные автора. Все основные общие источники информации даны во введении к Первой части пособия и поэтому здесь не повторяются. Специальные источники, касающиеся рассматриваемых во Второй книге редких элементов, приведены в списках литературы к отдельным разделам и сведены в её конце.

# Глава 9. Минеральное сырье редких элементов

Забайкалье относится к тем регионам России, в которых широко проявлен гранитный магматизм, с которым связаны редкометалльные граниты, пегматиты и метасоматиты. Минерагения редких, особенно литофильных, элементов во многом еще не познана. Их месторождения находятся в зонах складчатого обрамления платформ и жестких глыб, в гранитоидах купольных структур. Возраст их широко варьирует, но основная масса месторождений связана с докембрийскими (архей – нижний протерозой) складчатыми и мезозойскими сводово-купольными структурами. Последние расположены в широкой зоне развития долгоживущего Монголо-Охотского минерагенического пояса глубокого заложения. Он приурочен к области сочленения Сибирской и Китайской платформ (см. рис. 7.3, с. 93, ч. I, книга 1).

## 9.1. Бериллий.

### *9.1.1. Свойства.*

Бериллий (Be, II, 4), металл, серебристо-белый, хрупкий, мягкий; сплавы обладают высокими твердостью и упругостью; проявляет амфотерные свойства, литофильный, валентность $2^+$.

Плотность 1848 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 589–637 МПа; температуры плавления 1278° С, кипения – 2970; теплопроводность 200 Вт/(м·К); обладает самой высокой из всех металлов теплоемкостью – 1,8 кДж/кг; удельное электрическое сопротивление $4{,}0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость – $1{,}3 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $11{,}5 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$; сечение захвата тепловых нейтронов весьма мало ($92 \cdot 10^{-32}$ м$^2$), ударная вязкость 10–50 кДж/м$^2$.

Бериллий – высокотоксичный элемент (I класс опасности); ПДК$_{с.с}$ – 0,001 мг/м$^3$; ПДК$_в$ – 0,0002 мг/дм$^3$. Аллергическое и канцерогенное воздействие раздражает кожу и слизистые оболочки, вызывает дерматоз, конъюнктивит, назофарингит, заболевания легких. Заболевания могут возникнуть через 10–15 лет после прекращения контакта.

### *9.1.2. Распространенность и запасы.*

Кларк бериллия земной коры 3,8 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,2, основных – 0,4, средних – 1,8, кислых – 5,5, осадочных (глинах и сланцах) – 3,0. Естественное содержание в почвах 0,8–5,6 г/т, в морской воде морей и океанов – $6 \cdot 10^{-7}$ мг/дм$^3$.

Мировые общие запасы (без стран СНГ) 1,1 млн. т BeO, в том числе подтвержденные – 180 тыс. т; ежегодное производство на уровне 800–830 т BeO. Наиболее крупные производители бериллиевых концентратов – США, Китай, Бразилия, страны СНГ, Зимбабве, Намибия.

### *9.1.3. Области использования.*

Структура потребления (%): в ядерной и аэрокосмической технике – 23; в нефтегазовой промышленности – 25; в электротехнике – 35; электронике – 17.

Является легирующей добавкой к сплавам на основе Cu, Ni, Zn, Al, Pb. Бериллий, его сплавы и BeO используют как оболочки твэлов в атомной энергетике, для изготовления упругих и прочных бериллиевых бронз, используемых, в частности, в поршневых авиационных моторах, пружинах маятников механических часов и др. В США около 80% получаемого Be используется для получения Be–Cu бронз. При строительстве фюзеляжа сверхскоростного пассажирского самолета Ту–144 было использовано большое количество различных сплавов на основе бериллия. BeO используют также для изготовления тиглей и спецкерамики. Be-органические соединения используются как катализаторы димеризации и полимеризации олефинов.

Насыщение бериллием поверхности стальных листов повышает их коррозионную стойкость. Используется в ракетостроении, для изготовления деталей сверхзвуковых самолетов, оболочек ракет, в ядерной технике (отражатели и замедлители нейтронов). Be используется также в акустоэлектронике.

### *9.1.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно более 80 минералов бериллия. Среди них преобладают силикаты, алюмосиликаты, фосфаты. Промышленное значение имеют 7 минералов: берилл ($Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$, до 14,1% BeO), хризоберилл ($BeAl_2O_4$, 7,0% Be, 19,7% BeO),

гельвин ($Mn_8[BeSiO_4]_6S_2$, 4,9% Be, 13,6% BeO), гентгельвин ($(Fe, Zn)_4(BeSiO_4)_3S$, 10–14,2% BeO, лейкофан ($NaCaBe[Si_2O_6]F$, 10–12% BeO), бертрандит ($Be_4[Si_2O_7](OH)_2$, 15% Be, 42% BeO) и фенакит ($Be_2[SiO_4]$, 16,3% Be, 45,5% BeO). К числу промышленно важных бериллиевых минералов относятся также сянхуалит ($Li_2Ca_3[BeSiO_4]_3F_2$, BeO – 15,79%), даналит $Fe_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$, BeO – 11,87–14,48), эпидидимит ($Na_2Be_2[Si_6O_{15}]\cdot H_2O$, BeO – 9,66–12,90). К числу минералов бериллия, перспективных в промышленном отношении, можно отнести также и бавенит ($Ca_4Be_2Al_2Si_9O_{26}(OH)_2$, BeO – 5,52–7,72). Кроме того, в случае высоких содержаний (не менее 0,3%) промышленно важным может стать и бромеллит, являющийся природной окисью бериллия. Имея высокую твердость (около 9) и плотность 3,02 г/см$^3$, может извлекаться гравитационным способом.

Промышленные типы месторождений – вулканогенно- и плутогенно-гидротермальный, грейзеновый, скарново-грейзеновый (апокарбонатные грейзены), пегматитовый. В Забайкалье распространены три последних.

По запасам BeO (тыс. т) месторождения подразделяют на уникальные – более 50, весьма крупные – 50–20, крупные – 20–5, средние – 5–1, мелкие – менее 1.

При поисках и разведке используют высокоэффективные методы нейтронно-спектрометрического опробования естественных обнажений, горных выработок и скважин, а также – в экспресс-анализах порошковых проб.

Промышленные руды – бертрандит-фенакитовые, хризоберилл-берилловые и гентгельвин-лейкофановые. По содержанию BeO (%) руды подразделяют на богатые – более 0,6, рядовые – 0,6–0,3, бедные – 0,3–0,1, убогие – 0,1–0,04. Кроме того, берилл попутно извлекается из комплексных редкометалльных, литиевых и тантал-ниобиевых руд.

### *9.1.5. Добыча и переработка руд.*

Месторождения разрабатывают открытым, подземным и комбинированным способами. Подготовку руд к переделу производят обогащением с применением комбинированных

технологий (рудоразборка, радиометрическая сепарация, флотация, гидрометаллургия). Извлечение бериллия из руд различных типов составляет 85–90% при содержании BeO в концентратах 10–12%. Вредными примесями в концентратах являются железо, алюминий, кремний, марганец, медь, никель, бор, уран, торий. При обогащении руд комплексного состава получают танталит-колумбитовые, сподуменовые, касситеритовые концентраты. Из скарново-грейзенового типа, а также бертрандит-фенакит-флюоритовых руд попутно с бериллиевым получают флюоритовый концентрат. Извлечение сопутствующего флюорита составляет до 90%.

Бериллиевые концентраты перерабатывают металлотермическим восстановлением фторидов (фторидный способ) или электролитическим способом. Для извлечения бериллия из бертрандита используют сульфатный способ. Металлический бериллий получают термическим восстановлением $BeF_2$ магнием, бериллий высокой чистоты – переплавлением в вакууме и вакуумной дистилляцией. Кроме того, металлический Be высокой чистоты выделяют из бериллий-органических соединений.

Товарным продуктом может быть гидроксид бериллия с 66,7% BeO, гидроксид обогащенный с 97,7% BeO или металлический бериллий – 99% Be, бериллий высокой чистоты – 99,999% Be. Для получения заготовок и изделий из бериллия используют методы порошковой металлургии. Соединения бериллия с одновалентными элементами ($R_2Be$) синтезируют взаимодействием $BeCl_2$ с магнийсодержащими соединениями в эфире.

К вредным примесям в окиси бериллия и техническом бериллии относят железо, алюминий, кремний, марганец, медь, никель, хром, азот, свинец, титан, кобальт.

### *9.1.6. Месторождения бериллия в Забайкалье.*

Бериллий относится к достаточно распространенным элементам, но редко образует крупные скопления. Традиционно он извлекался из минерала берилла. Но, как видно из приве-

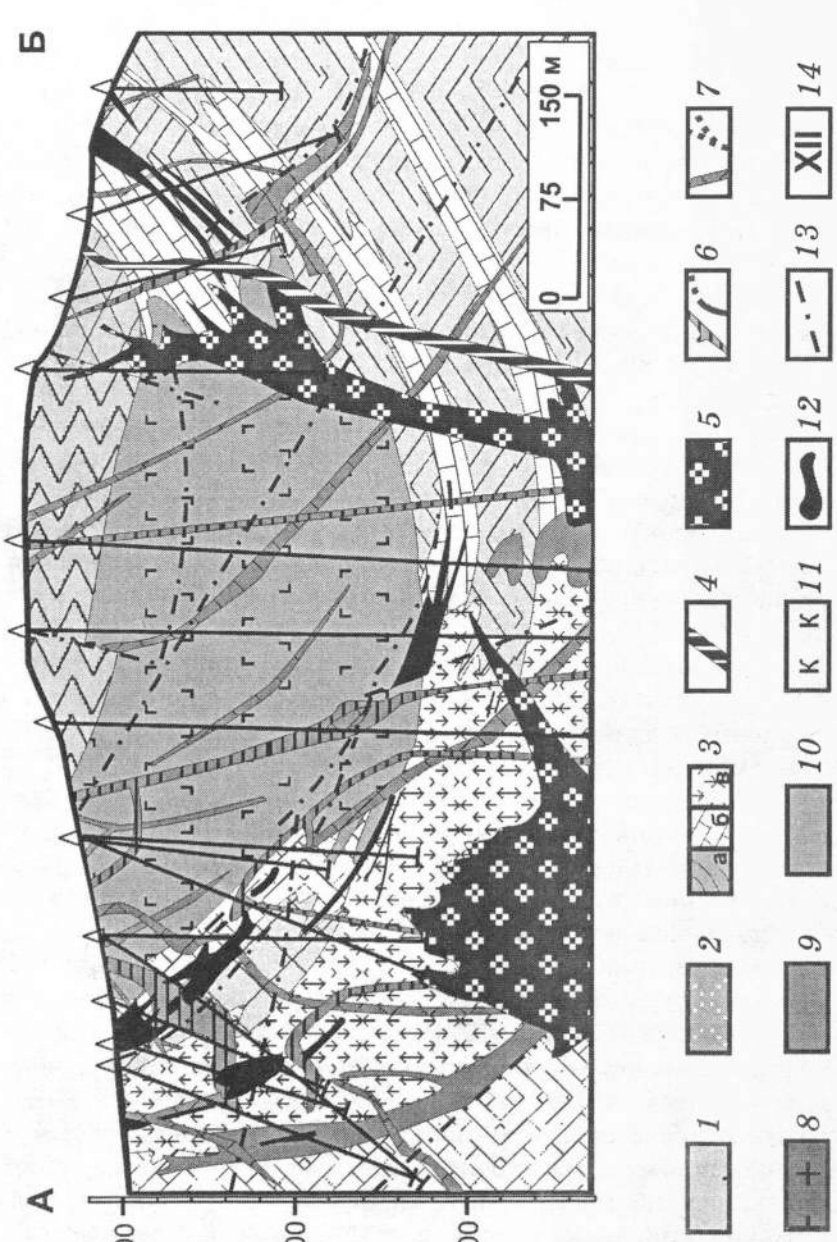
денных выше данных о составах основных минералов бериллия и их формул, наиболее важными его источниками с последней трети XX века стали фенакит и бертрандит. Промышленные скопления этих минералов встречаются достаточно редко. Тем не менее, именно в Забайкалье, на юго-востоке Республики Бурятия, в 140 км восточнее г. Улан-Удэ, находится крупнейшее **Ермаковское** месторождение фенакит-бертрандитовых руд (рис. 9.1).

Геологическое строение месторождения, состав руд и их генезис изучались многими исследователями. Наиболее полные сведения о месторождении представлены в производственных отчетах и в публикациях А.И. Гинзбурга, И.И. Куприяновой и др. [1969, 1975, 1977], В.И. Гальченко и др. [1968], А.Я. Косалса и др. [1978], Н.П. Заболотной [1974], М.И. Новиковой и др. [1975, 1994].

Месторождение локализовано в метаморфизованных карбонатно-терригенных отложениях условно рифей-палеозойского возраста, слагающих сравнительно большой (10–12 км$^2$) провес кровли в поле преобладающего распространения палеозойских гранитоидов, в прибортовой части мезозойской Кижингинской впадины, выполненной мезозойскими осадочно-вулканогенными отложениями (по данным А.И. Гинзбурга и др., 1965 г.) (рис. 9.1).

Оруденение локализовано в осадочной толще, ядро которой сложено песчаниками и кристаллическими сланцами, а крылья – доломитами. На месторождении, в главном карьере, достигающем глубины 90 м, в основном, вскрыты кристаллические сланцы и карбонатные породы средней части толщи.

Формирование интрузивных пород, развитых в районе Ермаковского месторождения, происходило в два этапа [Новиков и др., 1994; Рейф и др., 1999]: домезозойский, охватывающий значительный временной интервал от позднего протерозоя до палеозоя включительно, и мезозойский. На участке месторождения домезозойские интрузии представлены двумя их типами: габброидами и гранитоидами. Габбро и габбро-диориты являются наиболее ранними магматическими образованиями и слагают согласное межпластовое тело, приуроченное к ядерной


А
Б
900
800
700
0
75
150 м
1
2
3
а
б
в
4
5
6
7
8
9
10
К
К
11
12
13
XII
14

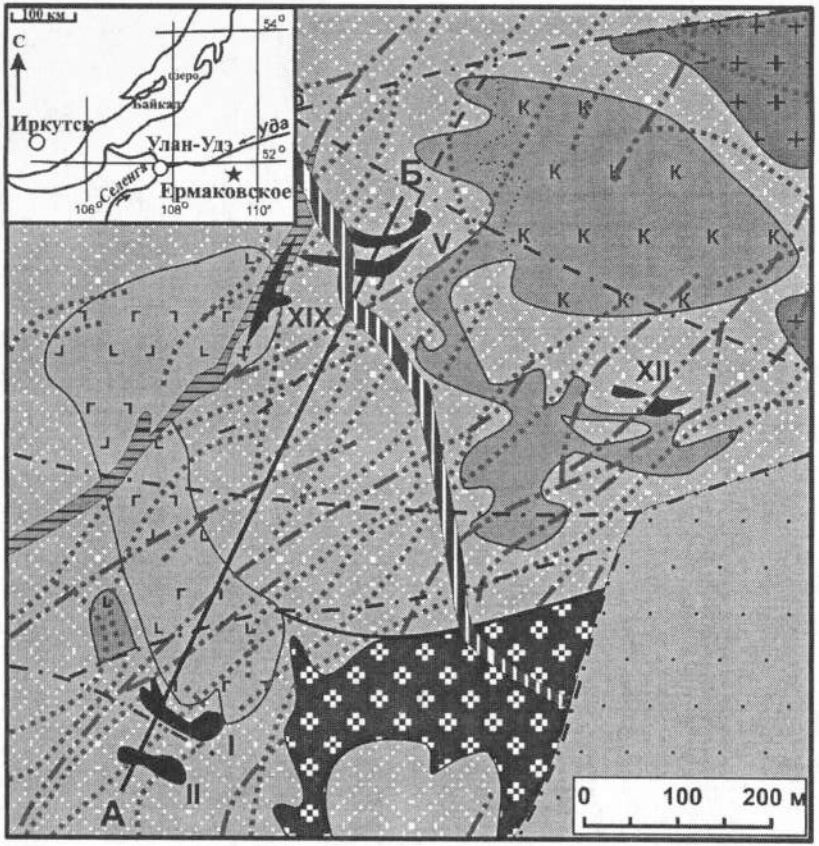



Рис.9.1. Геологическая карта и разрез Ермаковского F-Be месторождения, по В.И. Гальченко и И.Н. Сахаровскому, в интерпретации Ф.Г. Рейфа.

*1 – отложения кижигинской депрессии (К); 2 – стратифицированные (PR?) горные породы; 3 (на разрезе) – метапесчаники, сланцы (3а), известняки, доломиты (3б), скарны (3в); 4–5: мезозойские гранитоиды: дайки фельзит-порфиров (4), щелочные гранитоиды (5); 6–7: дайки кислого (6) и основного (7) состава; 8 – субщелочные гранитоиды (PZ?); 10 – диориты (PR?); 11 – калишпатиты; 12 – бертрандит-фенакит-флюоритовые залежи; 13 – разрывные нарушения; 14 – номера рудных зон.*

части синклинальной складки. Апофизы домезозойских гранитоидов представлены межпластовыми и секущими телами, по составу соответствующими биотитовым гранитам, реже лейкократовым плагиогранитам и роговообманково-биотитовым гранодиоритам.

Мезозойские интрузии представлены комплексом дорудных даек субщелочных пород среднего – кислого состава и штокоподобным телом синрудных эгириновых гранитов.

В восточной части месторождения граниты обнажены в виде небольшого (0,2 км$^2$) сложного по форме тела, сопровождающегося большим числом апофиз. По данным бурения, на глубине 100–150 м, как показало бурение скважин, граниты образуют вытянутый в северо-восточном направлении массив протяженностью 1000–1200 м и шириной 300–400 м [Новиков и др., 1994]. Он, в основном, сложен порфировидными лейкократовыми гранитами. На контакте с вмещающими породами и в маломощных апофизах граниты представлены мелко-среднезернистыми афировыми разностями.

Радиологические датировки, полученные Rb-Sr и U-Pb методами для даек (1), лейкогранитов штока (2) и слюдистых метасоматитов (3), практически совпадают: (1) – 225 ± 5 Ма; (2) – 224 ± 1 Ма; (3) – 224 ± 1 Ма [Дамдинова, 2005].

В I рудной зоне сосредоточено более 65% запасов месторождения. Основная масса руд в этой зоне представлена массивными апокарбонатными бертрандит-фенакит-флюоритовыми метасоматитами. Зона II, вторая по промышленной значимости, в основном уже отработана, представлена преимущественно крупнообломочной жильной брекчией. XII рудная зона сложена флюорит-кварцевыми агрегатами, практически лишенными бериллиевых минералов.

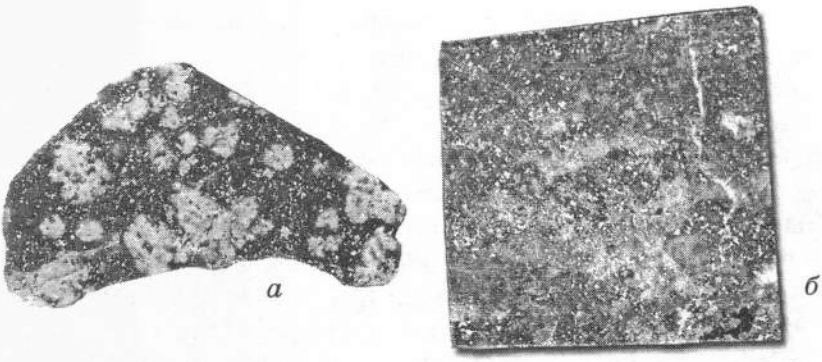
В указанных трех зонах Л.Б. Дамдиновой выделены 3 типа жил выполнения:

1 – фенакит-микролит-флюоритовые (I рудная зона);

2 – микроклиновые (II рудная зона);

3 – кварц-флюоритовые (XII рудная зона).

Фенакит и бертрандит в ассоциации с фиолетовым флюоритом, образующим промышленные концентрации, входят



*а* *б*

Рис. 9.2. Флюорит (темная основная масса)-бертрандит-фенакитовая (светлые пятна) руда. Уменьшено в 1,3 раза.

в состав богатейших массивных руд (рис. 9.2 *а* и *б*). На рис. 9.2 *а* видны крупные выделения фенакита и бертрандита в микроклин-флюоритовой массе, а на рис. 9.2 *б* выделения бериллиевых минералов мелкозернисты и присутствует пирит. Предварительное обогащение их производилось способом рудоразборки, и этот первичный концентрат через перевалочную базу станции Бада по железной дороге поставлялся в пос. Первомайский, где руды Ермаковского месторождения перерабатывались на обогатительной фабрике Забайкальского ГОКа в Читинской области. Но с начала 90-х гг. XX в. добыча и переработка их прекращена в связи с отсутствием потребителей, каковыми были военно-промышленный и авиакосмический комплексы СССР.

Средние содержания BeO в рудах Ермаковского месторождения составляют 1,2%, варьируя в рудах разных рудных зон. В зоне I, где руды представлены фенакит-бертрандит-флюоритовой ассоциацией, среднее содержание Be составляет 2–4%, в зоне II, где в рудах преобладает калиевый полевой шпат, содержание Be значительно ниже и находится в пределах 0,05–0,09%, а в фактически безрудной зоне XII, где жилы имеют, в основном, кварц-флюоритовый состав, бериллиевое оруденение чрезвычайно низкое ($\leq$ 0,01% Be) [Дамдинова, 2005].

К флюорит-бертрандитовой формации относится и **Ауникское** месторождение бериллия. Оно приурочено к экзоконтактам небольших штоков кварцевых сиенитов и сиенит-порфиров баргузинского комплекса. Рудные тела залегают среди известняков и глинисто-карбонатных сланцев в трех субпараллельных минерализованных зонах дробления. Первая зона имеет субвертикальное падение. Она прослежена по простиранию более чем на 600 м, по падению – до 200, мощность ее варьирует от 10 до 80 м. В зоне выявлено 18 рудных тел. Вторая зона включает 14 рудных тел. Она прослежена по простиранию почти на 1000 м, по падению – до 250. Третья зона имеет протяженность 400–500 м при мощности от 3 до 30 м. Она представлена 3 телами. Присутствуют руды двух типов: флюорит-фенакит-бертрандитовые, образовавшиеся по известнякам, и флюорит-полевошпатовые с фенакитом и бертрандитом, сформировавшиеся по скарнированным известнякам и ороговикованным сланцам. На балансе по состоянию на 01.01.1990 г. числятся запасы категории $C_1$ руды – 2,3 млн. т, окиси бериллия 4,3 тыс. т и, соответственно, категории $C_2$ – 5,6 млн. т и 9,3 тыс. т. Среднее содержание окиси бериллия в рудах 0,253%, флюорита – 10,11%. Ресурсы категории $P_2$ за счет рудных тел, расположенных к северу и юго-востоку от месторождения, составляют 2,5 млн. т руды и 6,3 тыс. т окиси бериллия.

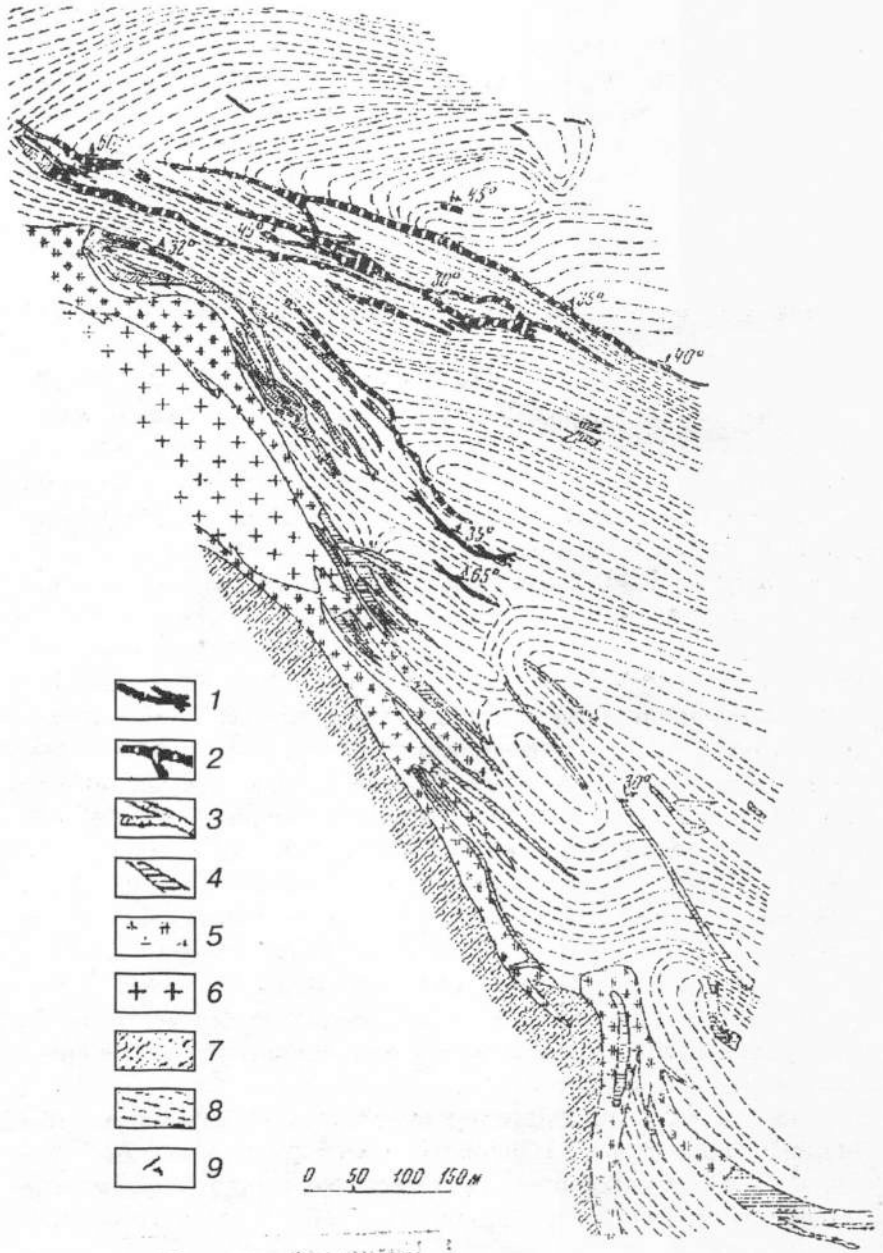
**Снежное** месторождение находится в Окинском районе Республики Бурятия. Оруденение связано со штокообразными телами гранитов повышенной щелочности огнитского комплекса. По данным В.Н. Серебренникова и Е.Л. Емельянова (1973 г.), в пределах блока, сложенного тектоническими брекчиями, выделены полевошпатовые метасоматиты (альбиты) с Ta-Nb и 3 рудных тела с бериллиевым оруденением. Мощность зон 10–25 м, протяженность 140–300 м. Мощность рудных тел 2–16 м при протяженности 60–140 м в длину. Простирание меридиональное. Оруденение неравномерное, вкрапленное, гнездовое. Наряду с бериллом, присутствует фенакит. Содержание бериллия соответствует промышленному. Объект слабо изучен.

На территории Забайкальского края фенакит известен в Досатуйском пегматитовом поле.

Проявления берилла связаны, в основном, с гранитными пегматитами или апогранитными грейзенами, редко апокарбонатными грейзенами. Как попутный компонент берилл извлекался из руд **Завитинского** месторождения Забайкальским ГОКом. Запасы бериллия в рудах этого месторождения при среднем содержании 0,05% BeO достаточны для обеспечения текущей потребности промышленности страны.

Из других объектов наиболее перспективно **Чалотское** месторождение бериллия, находящееся на юге Ононского района. Оно расположено в юго-восточном экзоконтакте Дурулгуевского многофазного гранитоидного массива кукульбейского комплекса во вмещающей триасовой песчаниково-сланцевой толще. Открыто Е.Н. Белых в 1950 г., разведано А.М. Гребенниковым в 1950–1958 годах. Относится к формации редкометалльных гранитных пегматитов. Пегматитовое поле, по данным А.М. Гребенникова (1995), вытянуто в северо-восточном направлении до 6 км при ширине 1,2 км. Имеет площадь 7,2 км$^2$ (рис. 9.3). Вскрыто 45 пегматитовых тел, часть которых показана на рис. 9.4. По 13 наиболее перспективным произведен подсчет запасов окиси бериллия и пятиокисей тантала и ниобия. На бериллий и тантало-ниобаты продуктивны блоковые альбитовые пегматиты. Мощность их до 16 м, протяженность 420–2000 м. Выдержаны по падению до глубины 300–400 м. Расстояние между жилами 20–100 м. Бериллий связан с бериллом. Среднее содержание BeO – 0,046%. Присутствуют колумбит и танталит-колумбит, с которыми связаны тантал и ниобий. Рудоразборный крупнокристаллический берилл (от 1,5 мм до 5 см и более) составляет 9% общей его массы. Кристаллы конусовидные и реже – призматические (рис. 9.5). Он приурочен к блоковому пегматиту, тяготеющему к осевой части и висячим бокам рудных тел.

Попутный берилл присутствует также в танталовых рудах Мало-Кулиндинского и Орловского месторождений (рис. 9.6, а и б, 9.7), оловянных рудах Гранитового олово-вольфрамового (содержание BeO – 0,023%, запасы – 1475 т), в миаролах, лин-


45°
32°
30°
35°
40°
35°
65°
30°
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0 50 100 150 м

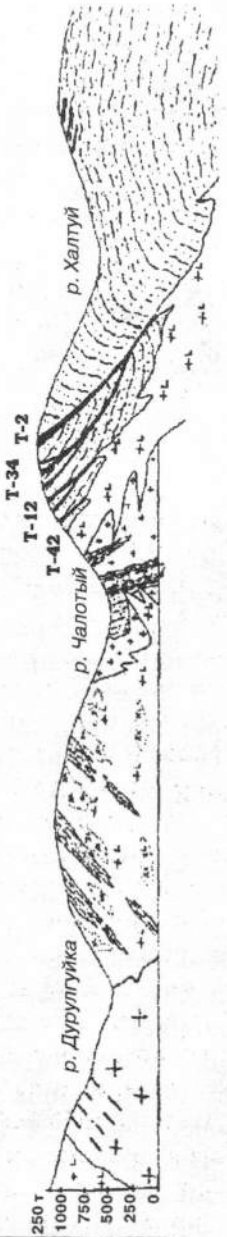



Рис. 9.4. Геологический разрез по Чалотскому месторождению и пегматитовому полю. По А.М. Гребенникову, 1995 г. Условные обозначения те же, что на рис. 9.3.

Рис. 9.3. Схематическая геологическая карта Чалотского месторождения. По А.М. Гребенникову, 1958г.

*Пегматиты: 1 – сильно замещенные с блоковой зоной (BeO 0,06%); 2 – блоковые замещенные (BeO 0,042–0,05%); 3 – неравномернозернистые и мелкоблоковые замещенные (BeO 0,034–0,038%); 4 – простые замещенные (BeO 0,005–0,010%); 5 – среднезернистые двуслюдяные пегматитоносные граниты; 6 – мелкозернистые гнейсовидные биотитовые граниты; 7 – гнейсовидные слюдистые песчаники; 8 – песчанико-сланцевая толща; 9 – элементы залегания.*

Читинская областная
БИБЛИОТЕКА
им. А. С. Пушкина
С. 755565

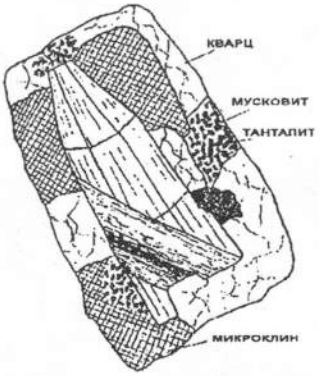



Рис. 9.5. Положение кристаллов берилла и колумбит-танталита в кварц-микроклиновом пегматите. Чалотское месторождение. Натуральная величина. По А.М. Гребенникову, 1995 г.

зовидных и жильных телах Шерловогорского гранитного массива (рис. 9.8) и в олово-полиметаллических рудах. Он развит также и в вольфрамовых рудах Спокойнинского месторождения, где нередко образует радиально-лучистые агрегаты тонко призматических кристаллов светло-желто-зеленого цвета. Определенный интерес может представлять Орогочинское проявление, локализованное в апикальной части Орогочинского гранитного массива, где содержание берилла в апогранитных грейзенах от 0,2 до 1,5%. Промышленные запасы бериллия могут быть установлены и в Яхактинском проявлении, где бериллоносные зоны с содержанием берилла в кристаллах до 10–15 см в длину имеют мощность 3–4 м при протяженности 70–400 м. Перспективно также Ушмунское проявление, где содержание берилла достигает 15 кг/т. Бериллий, в качестве примесного компонента, установлен в рудах месторождений молибдена. Он является одним из сопутствующих молибдену полезных компонентов в рудах Орекитканского штокверкового месторождения молибдена. Здесь, по данным К.Б. Булнаева [Месторождения Забайкалья, 1995], бериллий в форме берилла чаще всего находится в зоне экзо- и эндоконтакта рудоносной интрузии мезозойских гранитов в пирит-кварц-берилловых прожилках. В участках максимальной их концентрации

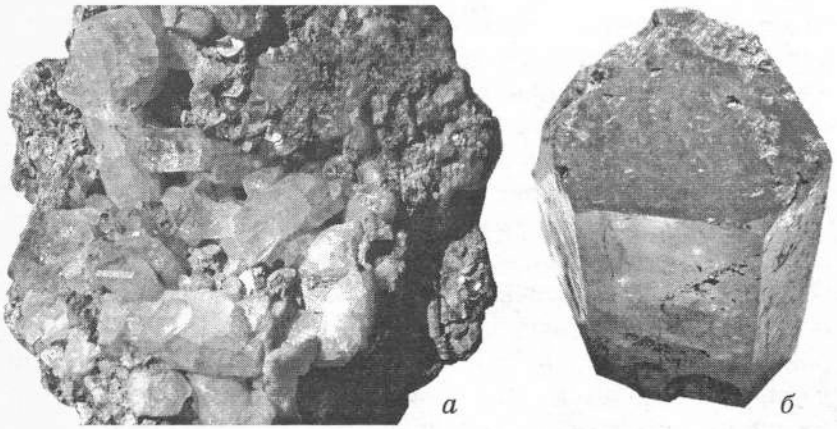



Рис. 9.6. Берилл Орловского месторождения:
*а) кристаллы светло-желтого берилла в кварц-лепидолитовом агрегате. Увеличено в 1,5 раза; б) кристалл гелиодора из полости в танталоносном пегматите. Натуральная величина.*

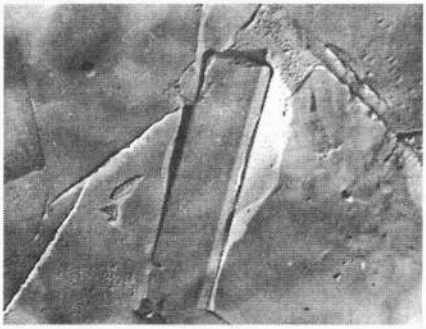


Рис. 9.7. Микрокристалл берилла в топазе из отвальных хвостов Орловского месторождения. Электронно-микроскопический снимок. Угольная реплика. Увеличение в 3500 раз.



Рис. 9.8. Сросток кристаллов аквамарина (большой слева) и гелиодора в кварце. Шерловая Гора. Натуральная величина.

содержание BeO находится в пределах 0,002–0,03%, редко повышаясь до 0,068%. В других частях молибденового штокверка содержание BeO не превышает 0,03%. Оценки промышленной значимости бериллия, как попутного компонента, не проводилось.

Бериллий в берилле, гельвине и гентгельвине присутствует в рудах Булуктаевского месторождения в Республике Бурятия. Развитие бериллиевой минерализации в бертрандит-фенакитовой форме установлено также в пределах Жарчихинского месторождения. По данным В.П. Верник и Г.С. Риппа [Месторождения Забайкалья, 1995], В.Г. Покалова [1992], бертрандит и фенакит находятся в участках наибольшего распространения кварц-флюорит-микроклиновых прожилков, образуя неправильной формы гнезда или цементируя интенсивно дробленые вмещающие породы.

По данным разведки, бериллиевая минерализация пространственно разобщена с молибденовой. Бериллий распространен в пределах месторождения неравномерно. Максимальные его содержания достигают 0,0n – 0,n%. Аномально высокие содержания обычно находятся в зонах калишпатизации и флюоритизации в периферических частях рудного тела. Поэтому пока не ясна роль бериллия как возможного сопутствующего полезного компонента.

При необходимости рудоразборный берилл можно получить попутно с добычей самоцветов на Шерловой Горе. Кроме того, бериллий содержится в рудах Шерловогорского оловополиметаллического месторождения. На начало разработки месторождения запасы BeO составляли 6371 т при содержании 0,0144%. В хвостах Шерловогорской обогатительной фабрики среднее содержание BeO составляет 10 г/т, запасы – 76,17 т. Кроме того, берилл не извлечен из отвалов переработки олововольфрамовоносных россыпей в пади Заводская.

Бавенитсодержащие скарны установлены в Аркиинском месторождении олова в Приаргунье, а также в олово-серебряных рудах Безымянного месторождения. В рудах Аркиинского месторождения, как установил А.Д. Сергеев, присутствует и бромеллит – BeO.

В 1961 году Ю.А. Билибин [1961] указывал на возможность нахождения гранитных штоков в районе Ары-Булакского штока редкометалльных гранитов. Он полагал, что они были пропущены при картировании или перекрыты меловыми отложениями. М.Д. Скурский полагал связь с ними редкометаллического, в том числе и бериллиевого, оруденения. В поле развития Ары-Булакской россыпи известны глыбы альбитизированных гранитов, гранит-порфиров с флюоритом, вмещающих их песчанико-сланцевых горных пород, содержавших (%) олово (до 0,14), тантал (0,01–0,016), литий (до 1), бериллий (0,1), в протолочках установлен топаз (до 274 г/т) [Скурский, 1996].

Ассоциация горных пород и находящихся в их составе редких элементов свидетельствует об их сходстве с Шерловогорским рудоносным гранитным массивом и его фациальными разновидностями (онгониты, гранит-порфиры, порфировидные граниты).

Добыча бериллия в Забайкалье предусматривается Федеральной программой по добыче, производству и потреблению лития и бериллия на 1997–2012 годы. В соответствии с нею бериллий отнесен к стратегическим металлам. Свертывание собственного бериллиевого производства, произошедшее вследствие политики реформ приватизации государственной собственности, привело Россию в зависимость от импорта этой продукции. Для обеспечения отечественных потребителей бериллия за счет импорта потребуется более одного миллиарда рублей ежегодно. Забайкальский регион является единственным в России, способным решить эту задачу на основе использования Завитинского, Этыкинского и Ермаковского месторождений на базе Забайкальского ГОКа. При этом годовая производительность по бериллию может достигнуть порядка 140 т в концентрате только на одном Этыкинском месторождении, не говоря о других бериллиеносных объектах. Ресурсы и запасы бериллия в Забайкалье составляют по состоянию на 01.01.2006 г. около 60 т. В Забайкальском крае – 26742 т. Стоимость бериллия в недрах Забайкальского края оценивается в 930033 млн. руб. (данные «Читанедра»).

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства бериллия?
2. Промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд бериллия.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд бериллия Забайкалья?
4. Каков минеральный состав руд бериллия?
5. Назовите месторождения и типы руд бериллия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется бериллий?

## Литература

### Основная

Бериллий. Токсикология, гигиена, профилактика, диагностика и лечение бериллиевых поражений / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия / А.И. Гинзбург, Н.П. Заболотная, И.И. Куприянова и др. – М.: Недра, 1975.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск, 1999.

Коган Б.И., Капустинская К.А., Топунова Г.А. Бериллий. – М.: Наука, 1975.

Коленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Минералогия гидротермальных месторождений бериллия / Под ред. А.И. Гинзбурга. – М.: Недра, 1976.

Минеральное сырье. Бериллий / И.И. Куприянова, Е.П. Шпаков, М.И. Новикова и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

**Дополнительная**

Дамдинова Л.Б. Условия и факторы, влиявшие на эффективность переноса и отложения Be из рудоносных растворов Ермаковского Fe-Be месторождения (по результатам изучения флюидных включений) – Автореф. ... дис. канд. геол.-минер. наук. – Улан-Удэ, 2005.

Клюев О.С. Первичные (эндогенные) геохимические ореолы месторождений бериллиевого оруденения / Геохимические критерии прогнозирования и поисков рудных месторождений. – М.: ИМГРЭ, 1973.

Левиуш И.Т., Эйгелес М.А. Исследования по флотации берилла / Флотация силикатов и окислов. – М.: Госгеолтехиздат, 1961.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2.

Методические рекомендации по проведению поисковых работ на бериллий / И.И. Куприянова, А.А. Шутин, М.И. Пахомов и др. – М.: ВИМС, 1992.

Определение бериллия в горных породах и бериллиевых рудах фотонейтронным методом. – М., 1968.

Цыбжитов В.Ж. Новые данные о флюорит-бертрандит-фенакитовой формации / Эволюция эндогенных процессов и оруденения в Забайкалье. – Улан-Удэ: БФ СО АН СССР, 1981. – С. 110–115.

## 9.2. Литий.

### *9.2.1. Свойства.*

Литий (Li, I, 3), металл, белый, серебристый, мягкий, проявляет щелочные свойства, литофильный, валентность $1^+$.

Плотность 534 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 5,0 МПа; температуры плавления 180° С, кипения – 1347; теплопроводность 84,7 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $8{,}55 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $2{,}56 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $56 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$; сечение захвата тепловых нейтронов $9{,}45 \cdot 10^{-26}$ м$^2$.

Литий – высокотоксичный элемент (II класс опасности), $ПДК_{р.з}$ пыли до 1 мг/м$^3$, $ПДК_{м.р}$ пыли – 0,1, $ПДК_{с.с}$ LiCl – 0,02 мг/м$^3$; $ПДК_{в}$ $Li^+$ – 0,03 мг/дм$^3$.

### *9.2.2. Распространенность и запасы.*

Кларк лития земной коры 32 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,5, основных – 15, средних – 20, кислых – 40, осадочных (глинах и сланцах) – 60. Естественное содержание в почвах 7,0–75 г/т.

Мировые подтвержденные запасы (без стран СНГ) 17,4 млн. т $Li_2O$, ежегодное производство составляет 20 тыс. т $Li_2O$. Наиболее крупные производители – США, Чили, Австралия, Германия, Япония. Среди стран СНГ на долю России приходится 96% запасов литиевого сырья.

### *9.2.3. Области использования.*

Структура потребления (%): производство стекла и керамики – 48, для консистентных смазок – 20; кондиционирование и очистка воздуха и газов – 9; изготовление аккумуляторных батарей, сплавов – 5; в качестве катализаторов для получения синтетического каучука – 2; фармацевтика и другие области применения – 16.

Металлический литий используют: для изготовления анодов для химических источников тока на основе неводных и твердых электролитов; как составную часть сплавов с Mg и Al, антифрикционных сплавов (баббитов), сплавов с кремнием для изготовления холодных катодов в электровакуумных приборах. Он применяется для дегазации, раскисления, рафинирования и модифицирования меди, медных, цинковых и никелевых сплавов с целью улучшения их структуры и повышения электропроводности. Литий применяется как катализатор полимеризации, например, изопрена, в процессе ацетилирования и др. Жидкий литий является теплоносителем в ядерных реакторах. Изотоп $^{6}Li$ используют для получения трития.

Алюмогидрид лития ($Li[AlH_4]$) применяют в оргсинтезе, для получения гидридов P, As, Si, Sn, Sb, в качестве восстановителя. Гидрид лития (LiH) используют как источник водорода для наполнения аэростатов и спасательного снаряжения, как восстановитель в оргсинтезе, для получения бороводородов. Гидроксид лития (LiOH) используют как поглотитель $CO_2$ в противогазах, подводных лодках, самолетах и космических кораблях. Монокристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) используют в качестве преобразователя энергии и звукопроводов, элементов модуляторов, дефлекторов и др. в электрооптике, модуляторов лазерного излучения, в пироэлектрических приемниках лучистой энергии. В этих же областях электроники, а также в акустооптике используют кристаллы танталата лития ($LiTaO_3$). Литий также используют для получения многоцелевой смазки – литола, изготовляющегося на основе загустевших нефтяных масел с добавкой 12-гидроксистеаратом Li (12% по массе). Амид лития $LiNH_2$ используется как катализатор.

### *9.2.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно 86 минералов лития. Среди них преобладают силикаты, алюмосиликаты, фосфаты. Промышленное значение имеют шесть минералов: сподумен ($LiAlSi_2O_6$, 2,4% Li или 8,1% $Li_2O$), лепидолит ($KLi_2Al[Si_4O_{10}](F, OH)_2$, 2,7% Li, 5,9% $Li_2O$, примеси Cs, Rb), амблигонит ($LiAl[PO_4](OH, F)$, 10,1% $Li_2O$), эвкриптит ($LiAl[SiO_4]$, 5,8% Li, 11,8% $Li_2O$), циннвальдит ($KLiFe_2Al[AlSi_3O_{10}](OH, F)_2$, 4,1% $Li_2O$), петалит ($Li[AlSi_4O_{10}$, 4,0–4,7% $Li_2O$). К числу литиевых минералов относятся сянхуалит ($Li_2Ca_3[BeSiO_4)_3F_2$, $Li_2O$ – 6,29%), хольмквистит ($Li_2(Mg,Fe)_3Al_2[Si_8O_{22}](OH)_2$, $Li_2O$ – 2,40–5,00.

Промышленные типы месторождений – редкометалльные гранитные пегматиты и рапа соляных отложений и озер. Наибольшее значение имеют последние.

По запасам $Li_2O$ (тыс. т) месторождения подразделяют на уникальные – более 1200, весьма крупные – 1200–600, крупные – 600–300, средние – 300–100, мелкие – 100–40.

При поисках и разведке (для эндогенных месторождений) эффективно использование гамма-съемки, гамма-каротажа и литохимии по первичным ореолам.

Промышленные руды: эндогенные – пегматитовые и грейзеновые; гидроминеральные – карбонатные, сульфатные, хлоридные.

По содержанию $Li_2O$ (%) эндогенные руды подразделяют на весьма богатые – более 1,5, богатые – 1,5–1,3, рядовые – 1,3–0,7, бедные – 0,7–0,5.

### *9.2.5. Добыча и переработка руд.*

Месторождения разрабатывают преимущественно открытым способом.

Подготовка руд к переделу производится дроблением, сортировкой богатых руд и обогащением бедного сырья с применением гравитационных, флотационных, термических и комбинированных технологий. Минералы лития в зависимости

от состава разлагают $H_2SO_4$ (кислотный способ) или спеканием с CaO и $CaCO_3$ (щелочной способ), $K_2SO_4$ (солевой способ), $CaCl_2$ (щелочно-солевой способ). В результате по первому способу получают раствор $Li_2SO_4$, освобождают его от примесей обработкой $Ca(OH)_2$ и $Na_2CO_3$. При выщелачивании спека водой в раствор переходит либо LiOH (в щелочном методе), либо $Li_2SO_4$ (в солевом методе), либо LiCl (в щелочно-солевом методе). Готовым продуктом во всех способах, кроме щелочного, является $Li_2CO_3$. Он служит источником для получения других соединений расплавленной смеси LiCl и KCl (иногда – $BaCl_2$). Последующую очистку от примесей производят вакуумной дистилляцией, ректификацией или зонной плавкой. Можно получить металлический литий также вакуум-термическим восстановлением $LiAlO_2$ алюминием при 13–66 Па и 1150–1200° С, $Li_2O$ – кремнием или алюминием в присутствии CaO при 950–1000° С и 0,1 Па. Из сподумена Li получают вакуум-термическим восстановлением ферросилицием в присутствии $CaCO_3$ при 1050–1150° С и 1,3–4,0 Па.

Извлечение лития из руд различных типов составляет 76–90% при содержании в концентрате 4,6–7% $Li_2O$. К вредным примесям в концентрате относят: $SiO_2$, $Al_2O_3$, $K_2O$, $Na_2O$, FeO, MgO, CaO, F, $P_2O_5$, MnO. Литиевые концентраты перерабатываются гидрометаллургическим способом. В товарных продуктах должно содержаться более 99 % карбоната, гидроксида, фторида лития, а в металлическом – 97% .

Вредными примесями в химических соединениях лития являются $SO_4$, CaO, $Na_2O+K_2O$, $Fe_2O_3$, $CO_2$, Al, $PO_4$, в металле – Cd, Na, Mg, Ca, Al, Fe, Mn, $SiO_2$, азот нитридный.

Вредными примесями в химических соединениях лития являются $SO_4$, CaO, $Na_2O+K_2O$, $Fe_2O_3$, $CO_2$, Al, $PO_4$, в металле – Cd, Na, Mg, Ca, Al, Fe, Mn, $SiO_2$, азот нитридный.

### *9.2.6. Месторождения лития в Забайкалье.*

Забайкалье представляет собою крупнейшую литиеносную провинцию России. Здесь находятся два крупных месторождения этого металла.

Одно из крупнейших в РФ по запасам лития **Завитинское** месторождение находится в бассейне р. Завитая в Борщовочном кряже, на территории Шилкинского района. Известно с 1897 г. В 1928–1929 гг. в процессе ревизионных работ было вскрыто большое число пегматитовых даек со сподуменом и месторождение оценено как литиевое. Детально описано Б.Н. Артемьевым (1930 г.), затем Г.С. Левиным (1935 г.), А.Е. Ферсманом (1940 г.). В 1933–1963 гг. в результате геологоразведочных работ выявлено и разведано 120 пегматитовых даек, 98 из которых вошли в подсчет запасов, 80 из них содержат преимущественно литиевую минерализацию, остальные – преимущественно бериллиевую. Уникальная жила **Полиминеральная** содержала большое количество ювелирного сырья: цветного турмалина, берилла, в том числе воробьевита и аквамарина. В ней находились также кунцит и горный хрусталь. Пегматитовые дайки локализованы в песчанико-сланцевой толще триаса и связаны с кукульбейским гранитным комплексом. Площадь месторождения 4,5 км$^2$. По простиранию жилы прослеживаются на 100–170 м, по падению – 100–400 м. Мощность жил от долей до десятков метров (среднее 9 м). Форма рудных тел сложная. Большинство представляют собой ветвящиеся жильные системы. Главные рудные минералы – сподумен и берилл; сопутствующие – петалит, касситерит, колумбит-танталит. Строение руды дано на рис. 9.9 а и б. Средние содержания (мас. %): $LiO_2$ – 0,6, BeO – 0,05, $Ta_2O_5$ – 0,0051, $Nb_2O_5$ – 0,011, Sn – 0,011. Главный рудный компонент – литий; остальные – сопутствующие ценные примеси.

Разработка месторождения была начата в 1937 г. Тогда из пегматитовых жил старательским способом добывался рудоразборный касситерит. Добыча сподумена производилась с 1940 г., Ta и Nb – с 1962 г., Be – с 1968 г. Руды обогащаются по комбинированной флотационной и электромагнитно-флотационной технологиям. В 1977 г. внедрена химико-металлургическая переработка танталовых концентратов. Наряду с редкими металлами из хвостов обогащения извлекались кварцево-полевошпатовые концентраты, пригодные для изготовле-

ния фаянса. Добыча руды производилась открытым способом. Годовая производительность по добыче и переработке руды в 1991 г. достигла 1200 тыс. т. В 1997 г. добыча прекращена. Запасы руды по состоянию на 01.01.1998 г. обеспечивают работу рудника на длительную перспективу.

Другим важнейшим месторождением лития является **Олондинское,** представленное одноименным пегматитовым полем. Расположено в бассейне р. Олондо в Каларском районе в зоне БАМ, в 80 км к северо-востоку от ж.-д. станции Чара. Открыто в 1964 г. Г.М. Савченко, поисковые работы провел И.Б. Орлов (1971–1973 гг.). Выявлено 20 микроклин-альбит-сподуменовых пегматитовых жил. Рудные тела образуют компактную жильную зону, в которой пегматиты составляют 20% общего объема. Кроме лития в пегматитах присутствуют тантал, ниобий, мусковит. Возможны находки промышленных скоплений цветного ювелирного турмалина. Прогнозные ресурсы оцениваются в 110 млн. т руды. Содержание $Li_2O$ составляет

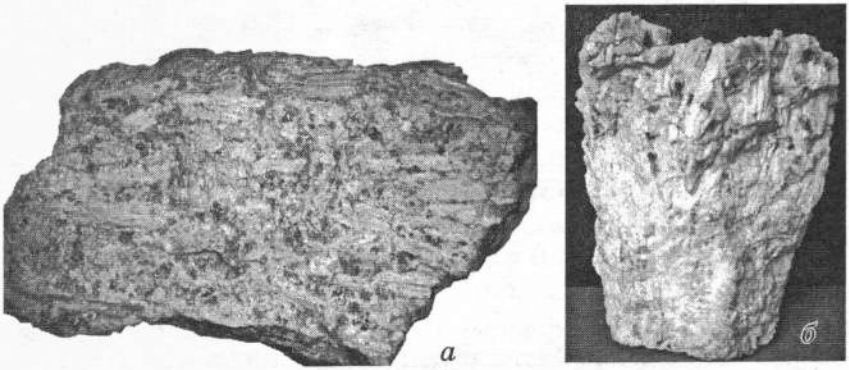



Рис. 9.9. Крупнокристаллическая сподуменовая руда.

*а) вытянутые кристаллы сподумена расположены субпараллельно в полевошпатовом агрегате пегматита; б) пучкообразное расположение кристаллов сподумена (белое) в кварц (черные зерна) – мусковитово-полевошпатовой массе. Завитинское месторождение. Уменьшено в 2 раза.*

0,01–0,7%. Содержание $Ta_2O_5$ – 0,023%, танталит-колумбита – 678 г/т. Ресурсы обеспечат работу ГОКа с годовой производительностью 2 млн. т руды в течение 50-ти лет. В пределах участка Рудный, наиболее детально изученного на площади 0,8 км$^2$, по данным М.Д. Скурского [1996], «сосредоточено семь мусковит-альбит-сподуменовых тел мощностью от 2 до 30 м и протяженностью от 250 до 750 м» (с. 384). Содержание $Li_2O$ составляет 0,5–1,0%. Рудоносны также околожильноизмененные горные породы. Их мощность достигает 15 м. Содержание лития – до 0,4%. Пегматитовое поле пересекается трассой БАМ. Способ разработки – открытый. Перспективы на выявление новых запасов танталового оруденения в ассоциации с литием значительны.

Резервом Завитинского месторождения является **Этыкинское** месторождение лития в пределах одноименного рудного узла, которое расположено в экзоконтакте массива амазонитовых гранитов позднеюрского возраста. Рудные образования представлены кварцево-топазово-циннвальдитовыми грейзенами и апогранитами (рис. 9.10). Основными концентраторами лития являются циннвальдит и лепидолит. Более полное описание месторождения дано в разделе 9.4. Для месторождения подсчитаны запасы $C_1+C_2$ $LiO_2$ в сотни тысяч тонн при содержании 0,5%, учтены прогнозные ресурсы в количестве 80 тыс. т со средним содержанием 0,84% $Li_2O$ [Скурский, 1996]. Разработаны временные кондиции. Освоение месторождения облегчается наличием готовых объектов промплощадки в пос. Золотореченск, которые были задействованы в 2001 году.

В 8 км к юго-востоку от Этыкинского месторождения известно **Княжевское** месторождение лития. Оно локализовано в экзоконтакте Ачиканского массива амазонитовых гранитов позднеюрского возраста и является непосредственным продолжением Ачиканского месторождения тантала. Рудные тела приурочены к грейзенам и грейзенизированным песчаникам и алевролитам нижней юры. Они прослежены по простиранию до 550 м, по падению – 250 м при мощности до 40 см. Основная масса грейзенов сложена циннвальдитом и лепидолитом. Со-

держание $Li_2O$ – от долей процента до 3,2%, среднее – около 1%. Запасы $LiO_2$ категории $C_2$ при содержании 0,79% составляют более 50 тыс. т. Оценены также и значительные прогнозные ресурсы.

Перспективные проявления лития сосредоточены также и в Балейском рудном районе, где находятся в Кангинском поле редкометалльных пегматитов. Здесь на правом берегу р. Шилка, в 10 км южнее г. Шилка, известно более 200 жил, связанных с гранитами кукульбейского комплекса. Пегматитовое поле имеет длину более 12 км при ширине до 6 км. В его пределах находится семь участков (Боец, Сиреневый и др.). Литий связан с лепидолитом или сподуменом. Прогнозные ресурсы поля оценены в 46 тыс. т при среднем содержании около 0,2%.

Значительны запасы лития в рудах Орловского месторождения, содержание которого в рудах находится в пределах 0,23–0,30%. Основными носителями лития в них являются лепидолит, реже циннвальдит. Содержание лепидолита в лепидолит-альбит-микроклиновых гранитах – 7,5–25%. Лепидолит из руд не извлекается и уходит в хвостохранилище.

Добыча лития, как и бериллия, предусматривается Федеральной программой ЛИБТОН по производству и потреблению лития, бериллия, тантала, олова, ниобия на 1997–2012 годы. В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 16 января 1996 года № 50-р литий отнесен к стратегическим металлам. В связи с этим ставится задача использовать собственные минерально-сырьевые источники для производства литиевых концентратов. Забайкалье, в частности, Читинская область, является единственным регионом России, где можно не только возродить их выпуск, используя как реконструированные ранее действовавшие мощности Забайкальского ГОКа, так и новую Этыкинскую обогатительную фабрику с годовой производительностью 750 тыс. т руды в год, перерабатывающую комплексные редкометалльные руды Этыкинского месторождения. Запасы и ресурсы лития в Забайкальском крае по состоянию на 01.01.2006 г. – 420654 тонны. Стоимость их оценивается в 107629 млн. рублей.

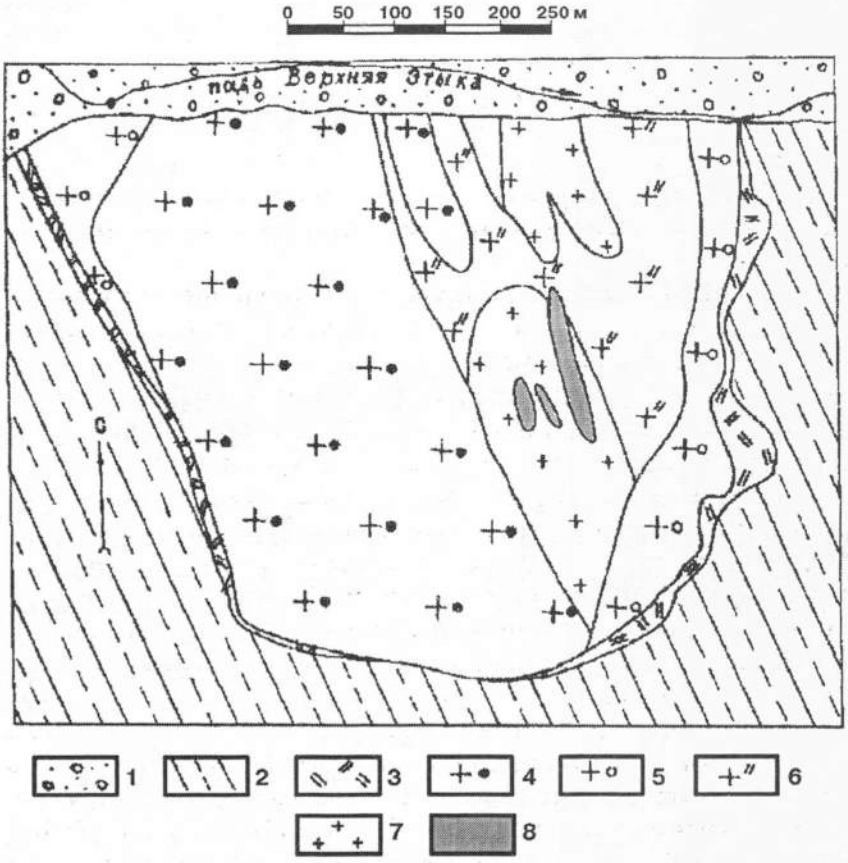

0 50 100 150 200 250 м
падь Верхняя Этыка
С
1
2
3
4
5
6
7
8

Рис. 9.10. Схематическая геологическая карта Этыкинского редкометалльного месторождения. По: [Месторождения Забайкалья, 1995].

*1 – современные отложения; 2 – песчанико-сланцевые отложения; 3 – экзоконтактовые топаз-кварц-слюдяные грейзены; 4 – порфиробластовые лепидолит-амазонит-альбитовые граниты внутренних частей массива такситовой текстуры и нерасчлененные; 5 – порфиробластовые лепидолит-амазонит-альбитовые граниты внешней части массива (рудные); 6 – мелкозернистые лепидолит-амазонит-альбитовые и альбит-амазонитовые граниты (рудные); 7 – мелкозернистые окварцованные лепидолит-амазонит-альбитовые граниты; 8 – амазонит-альбит-кварцевые породы зон окварцевания.*

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства лития?

2. Промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд лития.

3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд лития Забайкалья?

4. Каков минеральный состав руд лития?

5. Назовите месторождения и типы руд лития в Забайкалье.

6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется литий?

## Литература

### Основная

Быховский Л.З., Линде Т.П., Петрова Н.В. Перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы лития // Минеральные ресурсы России. – 1997. – № 6.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Минеральное сырье. Литий / А.А. Кременецкий, Т.П. Линде, Н.А. Юшко и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Каленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2.

Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А. Геохимия лития, рубидия, цезия. – М.: Недра, 1980.

Солодов Н.А., Бурков В.В., Овчинников Л.Н. Геологический справочник по легким литофильным редким металлам. – М.: Недра, 1986.

**Дополнительная**

Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным элементам / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Л.Ф. Борисенко и др. – М.: Недра, 1990.

Бойцов В.Е., Пилепенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Учебное пособие. – М.: НИА – Природа, 1999. – 216 с.

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003. – 134 с.

Нетрадиционные типы редкометалльного минерального сырья / Н.А. Солодов, Т.Ю. Усова и др. – М.: Недра, 1991.

Скурский М.Д. Недра Забайкалья. – Чита, 1996.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

## 9.3. Рубидий и цезий.

### *9.3.1. Рубидий.*

#### *9.3.1.1. Свойства.*

Рубидий (Rb, I, 37), металл, серебристо-белый, мягкий; проявляет щелочные свойства, литофильный, валентность $1^+$.

Плотность 1532 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 0,216 МПа; температуры плавления 39° С, кипения – 688; теплопроводность 58,2 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $12{,}5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $2{,}49 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент расширения $90 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$, сечение захвата тепловых нейтронов – $7.3 \cdot 10^{-29}$ м$^2$.

Рубидий – высокотоксичный элемент (II класс опасности). ПДК пыли (мг/м$^3$): $ПДК_{р.з}$ – 3–4, $ПДК_{м.р}$ – 1–2, $ПДК_{с.с}$ – 0,1; $ПДК_{в}$ RbCl – 0,1 мг/дм$^3$.

#### *9.3.1.2. Распространенность и запасы.*

Кларк рубидия земной коры 150 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 2, основных – 45, средних – 100, кислых – 200, осадочных (глинах и сланцах) – 200. Естественное содержание в почвах 36–150 г/т.

Мировые запасы (без стран СНГ) 173 тыс. т $Rb_2O$, годовое производство составляет первые тысячи тонн рубидия. Наиболее крупные производители – США, Канада. Запасы рубидия в России составляют 99% от общемировых.

### *9.3.1.3. Области использования.*

Основные области использования – фотоэлектрические и низковольтные приборы, катализаторы в химической промышленности, научные исследования в новых областях современной энергетики, медицине, биологии.

Наиболее важными для практического использования рубидия являются его фотоэлектрические свойства, что обусловило его применение в фотоэлектрических приборах. Рубидий используют в светочувствительном поверхностном слое фотокатодов. Он обладает геттерными свойствами и поэтому его вводят в вакуумные радиолампы и другие низковольтные приборы для удаления остатков следов воздуха. Используется рубидий, как и цезий, в производстве газоразрядных электрических устройств, выпрямителей и других аппаратов.

Рубидий характеризуется стабильностью основных свойств его атомов, вследствие чего он применяется при разработке прецизионных стандартов частоты и времени. В химической промышленности рубидий и его соединения используются в качестве катализаторов и промоторов в реакциях органического и неорганического синтеза. Радиоактивный изотоп $^{86}Rb$ нашел применение в гаммадефектоскопии, измерительной технике, стерилизации лекарств и пищевых продуктов. Препараты с рубидием применяют как снотворные и болеутоляющие средства. Изучается возможность использования рубидия в термоэмиссионных преобразователях энергии. Высокие теплофизические свойства рубидия обусловили исследование возможности использования его в качестве теплоносителя и рабочей среды в высокотемпературных турбоэнергетических установках.

### *9.3.1.4. Минералы рубидия.*

Рубидий находится в виде изоморфной, частью – внеструктурной примеси преимущественно в калиевых и калий-литиевых минералах: микроклине, ортоклазе ($KNaAlSiO_3O_8$, 0,0n% Rb), лепидолите ($KLi_2Al[Si_4O_{10}](F,OH)_2$ – до 0,078–4,5% Rb, циннвальдите ($KLiFe^{2+}Al[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ – до 0,098% Rb

или 1,04% $Rb_2O$, мусковите $(K,Mg,Fe)Al_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ – до 0,439–0,062% Rb или 1,37% $Rb_2O$, поллуците $(CsAlSi_2O_6$, до 2,03% $Rb_2O$), сподумене ($LiAlSi_2O_6$, до 0,008 $Rb_2O$), нефелине ($KNa_3[AlSiO_4]_4$ – до 0,0n Rb), псевдолейците ($K[AlSi_2O_6]$ – 0,09–0,12 $Rb_2O$), в карналлите ($KMgCl_{36}H_2O$ – до 0,009% Rb). Промышленное значение имеют, в основном, лепидолит, реже – циннвальдит, а также карналлитсодержащие калийные соли и нефелинсодержащие сиениты.

Рубидий не образует собственных месторождений. Он находится в месторождениях других видов сырья. Известны промышленные типы рубидийсодержащих месторождений: редкометалльно-пегматитовый, апатит-нефелиновый и карналлитовый.

По запасам $Rb_2O$ (тыс. т) месторождения подразделяются на весьма крупные – более 1000, крупные – 1000–100, средние – 100–10, мелкие – менее 10.

Промышленные руды рубидия – комплексные цезий-рубидиевые (поллуцитовые и слюдяные) и рубидийсодержащие (апатит-нефелиновые и карналлитовые). В Забайкалье – тантал-литиевые, нефелин-псевдолейцитовые. По содержанию $Rb_2O$ (%) руды подразделяют на богатые – 0,5–0,2, средние – 0,2–0,01 и бедные – 0,01–0,006.

### *9.3.1.5. Добыча и переработка руд.*

Месторождения разрабатывают в связи с основными рудами. Основным способом передела руд является гидрометаллургический. Подготовку руд к переделу производят обогащением с использованием комбинированной гравитационно-флотационной технологии. Извлечение рубидия из руд различных типов находится в пределах 6–20% при содержании его в концентрате до 6%.

Рубидийсодержащие концентраты перерабатывают гидрометаллургическим и пирометаллургическим способами. Товарный гидрометаллургический концентрат должен содержать 91% рубидия, быть свободным от вредных примесей в нем, к которым относятся – Na, Cs, K, Mg, Ba. Металлургический рубидий получают металлотермическим способом.

### *9.3.2. Цезий.*

#### *9.3.2.1. Свойства.*

Цезий (Cs, I, 55), металл, золотистый, блестящий, мягкий; проявляет щелочные свойства, литофильный, валентность $1^+$.

Плотность 8240 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 186–300 МПа; температуры плавления 799° С, кипения – 3426; теплопроводность 11,4 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $7{,}3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $2{,}17 \cdot 10^{-7}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $8{,}5 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$; сечение захвата тепловых нейтронов $29 \cdot 10^{-28}$ м$^2$.

Цезий – высокотоксичный элемент (I–II классы опасности). ПДК$_{р.з}$ $AsCs_3$ – 0,03 мг/м$_3$, гидроксида – 0,3, ПДК$_{м.р}$ пыли – 1, ПДК пыли – 0,1 мг/м$^3$.

#### *9.3.2.2. Распространенность и запасы.*

Кларк цезия земной коры 4 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,1, основных – 1, средних и кислых – 5, осадочных (глинах и сланцах) – 12. Естественное содержание в почвах 2,9–3,7 г/т.

Мировые запасы цезия (без стран СНГ) около 315 тыс. т, ежегодное производство составляет около 10 т. Наиболее крупные производители – Канада, США, Англия, Германия. В России запасы цезия составляют 99% от мировых и запасов СНГ.

#### *9.3.2.3. Области использования.*

Структура потребления (%): новые области использования – 66; электронная техника – 23; химическая промышленность – 11.

Цезий используется в различных фотоэлектрических устройствах, таких как фотоэлементы, фотоумножители,

сцинтилляционные кристаллы-счетчики, вакуумные трубки, приборы для телевидения, радиохимии, электроники. В оптике используются призмы из хлористого цезия. Применяется в производстве керамики, в химических и металлургических процессах. Пары цезия используются в генераторах лазерного излучения. Cs-радиоизотопы используются в гаммадефектоскопии, измерительной технике. Цезий применяется в термоэлектрических силовых установках, в ионных топливо-ракетных двигателях для космических кораблей. Он нашел применение в детекторах ядерного излучения, фотоэлементах, волоконно-оптической связи. Цезий используют также в производстве газоразрядных электрических устройств, выпрямителей и т.д. Нитрат, сульфат и хлорид цезия применяются в качестве катализаторов реакций органического синтеза при получении органических смол. В новых областях техники и научных исследований цезий используется в биотехнологии, разработке магнитогидродинамических преобразователей энергии.

### *9.3.2.4. Минералы и типы руд.*

Известно 15 минералов цезия. Цезий, в отличие от рубидия, имеет ограниченный изоморфизм с калием и склонен к образованию собственных минералов. Среди них преобладают (8 видов) силикаты (поллуцит, $CsAlSi_2O_6$, до 43% $Cs_2O$, цезийкуплетскит $(Cs,Na,K)_3(Mn,Fe)_7(Ti,Nb)_2[Si_4O_{12}]_2(O,OH,F)_7$, до 11,60% $Cs_2O$) и алюмосиликаты (наньпингит ($CsAl_2Si_3O_{10}F_2$, 25,3 $Cs_2O$)). Среди собственных силикатов цезия наиболее важен поллуцит. Из других силикатов важен лепидолит $(KLi_2Al[Si_4O_{10}](F,OH)_2$, содержащий до 1,5% Cs, воробьевит $((Na,Li,Cs)_{0,4}Be_{2,8}Al_2[Si_6O_{18}]H_2O$ – до 4,6% $Cs_2O$). Из алюмосиликатов в качестве возможных источников цезия отметим циннвальдит $(KLiFe^{2+}Al[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$, содержащий до 0,006% Cs или 0,10% $Cs_2O$), мусковит – $((K,Mg,Fe)Al_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ – до 0,024–0,057% Cs или до 0,41% $Cs_2O$). Кроме того, цезий содержится в сподумене ($LiAlSi_2O_6$, 0,056% $Cs_2O$), в карналлите

($KMgCl_{36}H_2O$ – до 0,00018% Cs). Высоким содержанием цезия (18,7–19,7% $Cs_2O$) отличается также открытый в Мексике ванадат урана и цезия маргаритасит ($CsUVO_6 \cdot H_2O$). Промышленное значение имеют поллуцит, лепидолит, сподумен, циннвальдит, мусковит. Кроме того, высокие концентрации цезия (% $Cs_2O$) установлены в таких породообразующих минералах, как астрофиллит (0,51–2,5), биотит (0,52–1,8), микроклин (более 1), жильбертит (0,18–1,21), рибекит (до 0,29).

Цезий редко образует собственные месторождения. Он находится в месторождениях других видов сырья. Промышленные типы цезийсодержащих месторождений – редкометально-пегматитовый, апатит-нефелиновый.

Промышленные руды подразделяют на поллуцитсодержащие и комплексные цезий-рубидиевые (поллуцитовые и слюдяные). По содержанию $Cs_2O$ (%) руды подразделяют на богатые – 0,6–0,1, бедные – 0,1–0,001, убогие – 0,001–0,0003.

По запасам $Cs_2O$ (тыс. т) месторождения подразделяют на уникальные – 50–25, весьма крупные – 25–10, крупные – 10–3, средние – 3–1, мелкие – 1–0,1.

### *9.3.2.5. Добыча и переработка руд.*

Месторождения разрабатывают открытым и реже подземным способами.

Подготовку руд к переделу производят рудоразборкой, отделяя богатые руды от бедных. Бедные обогащают, применяя флотационные технологии. Извлечение $Cs_2O$ из руд различных типов составляет 65–85% при содержании его в концентрате более 25%. Богатые фракции руды и флотационные концентраты перерабатывают гидрометаллургическим способом. Товарный гидрометаллургический концентрат (цезий мышьяково-кислый) должен содержать более 99% $Cs_2O$. Металлический цезий получают металлотермией.

Вредными примесями мышьяково-кислого цезия являются Al, In, V, Co, Ni, Cu, Pb, Sn, Mn и Fe; цезии металлическом – Na, Rb, K.

### *9.3.2.6. Месторождения рубидия и цезия в Забайкалье.*

В рудах **Орловского** месторождения редкие щелочи присутствуют в количествах, позволяющих их добывать попутно (%): $Rb_2O$ – 0,16–0,03; $Cs_2O$ – 0,005. Они сконцентрированы, в основном, в лепидолите и циннвальдите, уходящих в отвал. Другим источником этих металлов может быть **Этыкинское** месторождение. Рудоносные граниты содержат 0,0108–0,0192% Rb. Средние содержания рубидия в литиевых слюдах этого месторождения, по данным А.М. Гребенникова [Месторождения Забайкалья, 1995], составляет (%) 1,54 и 1,36 в криофиллите и лепидолите, соответственно, в тантало- и литиеносных гранитах **Ачиканского** месторождения содержание рубидия находится в пределах 0,108–0,200% . М.Д. Скурский [1996] для проявления **Зимнее** в **Богдатско-Аркиинском** рудном районе приводит содержания рубидия 0,01–0,08% и цезия 0,008% в танталоносных литионит-топаз-альбитовых амазонитовых гранитах.

Важным источником рубидия может быть **Голевское** месторождение алюмокалиевых руд, описанное выше (8.3.10.6, Ч. I, Кн.1, с. 229–231). Содержание $Rb_2O$ в псевдолейците составляет 0,09–0,12% [Месторождения Забайкалья, 1995]. Это же относится и к массивам сыннырита – алюмокалиевых руд в Республике Бурятия, где разведаны Мухальское, Калюмнинское и Трехглавое месторождения.

Оценка запасов цезия и рубидия по Орловскому и Шумиловскому месторождениям дана в табл. 9.1, где числитель – вариация, знаменатель – среднее.

Таким образом, приведенный выше краткий обзор проявлений рубидия и цезия в известных промышленных редкометалльных месторождениях позволяет уверенно прогнозировать их практически значимые ресурсы и запасы на территории Забайкалья. При этом только Орловское месторождение может рассматриваться как среднее месторождение по рубидию и мелкое по цезию. А в пределах Ачиканского месторождения можно прогнозировать до 100 тыс. т $Rb_2O$.

Таблица 9.1

**Запасы рубидия и цезия в некоторых месторождениях Забайкалья**

| Месторождение | Содержание, $Cs_2O$, $Rb_2O$, % | Запасы $Cs_2O$, $Rb_2O$, т | Добыто, т |
|---|---|---|---|
| Цезий | | | |
| Орловское | 0,005 | 1400 | 3,3* |
| Рубидий | | | |
| Орловское | $\frac{0,16-0,03}{0,095}$ | 27160 | 6270* |
| Шумиловское | | 10000 | |

* Примечание: находится в хвостохранилище Орловского ГОКа.

Потенциальными источниками редких металлов, в том числе рубидия и цезия, являются литионит-топаз-альбитовые кварцевые порфиры, онгониты и кислые стекла, обогащенные этими металлами. По данным М.Д. Скурского [1996], в грейзенизированных кварцевых порфирах содержится до 0,154% рубидия. В цезиеносных кислых стеклах установлено до 0,1% $Cs_2O$.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства цезия и рубидия?
2. Промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд цезия и рубидия?
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд рубидия и цезия Забайкалья?
4. Каков минеральный состав руд цезия и рубидия?
5. Назовите месторождения и типы руд цезия и рубидия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используются цезий и рубидий?

## Литература

**Основная**

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Каленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Минеральное сырье. Рубидий и цезий / А.А. Кременецкий, Т.П. Линде, А. Юшко и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кременецкий А.А. Геохимия лития, рубидия, цезия. – М.: Недра, 1980.

Нетрадиционные типы редкометалльного минерального сырья / Н.А. Солодов, Т.Ю. Усова и др. – М.: Недра, 1991.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

**Дополнительная**

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

Скурский М.Д. Недра Забайкалья. – Чита, 1996.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

## 9.4. Ниобий и тантал.

Названные в заголовке два редких металла в природе обычно ассоциируют, вследствие довольно близких химических и физических свойств. Это определяет их сродство друг к другу и в общем случае общие пути миграции и способы концентрирования в одних и тех же минералах. Последнее обстоятельство обусловливает их сонахождение в рудных месторождениях. Естественно и наличие индивидуальных черт. Если тантал источником и местом накопления, в основном, имеет кислые, гранитные горные породы, то ниобий имеет ярко выраженную тенденцию быть связанным с щелочными магмами и их продуктами, в частности, с различными сиенитами. Кроме того, установлена высокая ниобиеносность карбонатитов. Тем не менее, несмотря на существующую тенденцию к некоторой разобщенности в этой связи, они присутствуют в одних и тех же месторождениях, но в разных соотношениях. В месторождениях, связанных с литий-фтористыми гранитами, может преобладать тантал, тогда как в щелочных горных породах и карбонатитах всегда преобладает ниобий. В целом в природе ниобий количественно преобладает над танталом.

### *9.4.1. Ниобий.*

#### *9.4.1.1. Свойства.*

Ниобий (Nb, V, 41), металл, серебристый, мягкий; проявляет амфотерные свойства, литофильный, устойчивая валентность $5^+$.

Плотность 8570 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 735–750 МПа; температуры плавления 2468° С, кипения – 4742; тепло-

проводность 53,7 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $12,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $2,76 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $7,07 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Устойчив к коррозии.

Ниобий – токсичный элемент (II–IV классы опасности). ПДК $NbB_2$ – 4 мг/м$^3$, NbN – 10 мг/м$^3$; ПДК$_в$ NbN – 0,01 мг/дм$^3$.

### *9.4.1.2. Распространенность и запасы.*

Кларк ниобия земной коры 20 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 1,0, основных – 20, средних – 20,0, кислых – 20,0, осадочных (глинах и сланцах) – 20,0. Естественное содержание в почвах 17–53 г/т, в морской воде – 0,00001 мг/дм$^3$.

Мировые подтвержденные запасы $Nb_2O_5$ (без стран СНГ) – 3,6 млн. т, годовое производство ниобия в 1985 г. составляло около 15 тыс. т металла, в 1989 г. – 16,247, в 1994 г. – 14,5 тыс. т, в 2000 г. – 35 тыс. т. В России количество учтенных запасов ниобия достаточно велико, но запасы по качеству уступают зарубежным. Наиболее крупные производители ниобия – Бразилия и Канада. Мировое потребление в 1994 г. составляло 17 тыс. т ниобия.

### *9.4.1.3. Области использования.*

Ниобий применяют, в основном, как легирующий металл для производства жаропрочных сплавов, а также в оптоэлектронике, акустике, электронных устройствах и атомной энергетике. В виде феррониобия он используется, в основном, в черной металлургии для легирования сталей. Из них низколегированные идут на производство нефте- и газопроводных труб большого диаметра (1420 мм) для магистральных трубопроводов. Они выдерживают высокие давления при перекачке природного газа, морозостойки и долговечны. Феррониобий, наряду с титаном, входит в состав жаропрочных суперсплавов.

Ниобий теперь используют для легирования не только малоуглеродистых, но и обычных, углеродистых и нержавеющих сталей. Низколегированные ниобиевые стали эффективно используются в высотном строительстве, мостостроении, горном и дорожном машиностроении, железнодорожном транспорте, автомобилестроении, в подводном и наземном глубоком бурении, авиационной технике, аппаратуре для нефтехимической и вообще – химической промышленности. С конца XX века ниобий используется для производства высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов, например, никель-ниобиевых, вместо дорогостоящих сплавов на основе дефицитного кобальта, используемых в реактивных двигателях, деталях ракет и других авиакосмических аппаратах. Очищенный от тантала металлический ниобий и сплавы на его основе применяются, наряду с цирконием и его сплавами, как конструкционный материал в атомной энергетике для изготовления оболочек ТВЭЛов ядерных реакторов. Листовой ниобий используется при изготовлении форсажных камер в силовых агрегатах авиакосмической техники. Сплавы ниобия с оловом, титаном и цирконием, обладающие сверхпроводимостью при температуре жидкого азота, широко используются для изготовления сверхпроводящих соленоидов для мощных электромагнитов, охлаждаемых жидким гелием. Они применяются в магнитных сепараторах, ускорителях заряженных частиц, МГД-генераторах.

Разработана технология для выращивания монокристаллов ниобия (рис. 9.11), а также ниобатов лития и свинца, используемых в качестве электрооптических материалов для производства современных оптоэлектронных приборов, управляющих пучками лазерного излучения, и акустоэлектронных устройств. Кристаллы ниобата лития применяют в ювелирном деле как имитации бриллиантов. Наряду с победитом и карбидом тантала, производят карбид ниобия, заменяющий их при изготовлении металлорежущих инструментов. Ниобий в качестве составляющей низкотемпературных сверхпроводников используется в атомной энергетике.

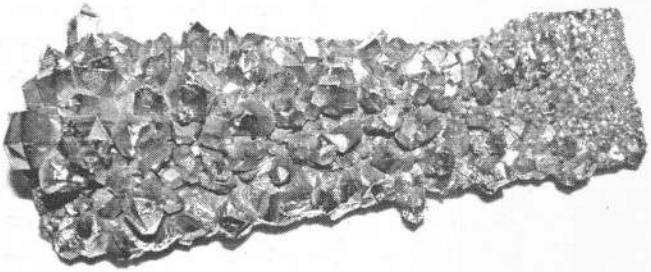


Рис. 9.11. Агрегат кристаллов ниобия.
Увеличено в 1,5 раза.

### *9.4.1.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно более 70 минералов ниобия. Среди них преобладают оксиды, гидроксиды, силикаты. Промышленное значение имеют 25 минералов группы перовскита и пирохлора, титанотанталониобатов, танталониобатов, ниоботитаноцирконатов.

В группе перовскита наибольшее значение имеет лопарит ((Na, Ce, Ca) (Ti, Nb)$O_3$, 8,63–12,81% $Nb_2O_5$, 0,51–1,95% $Ta_2O_5$), группа пирохлора (пирохлор (Ca, Na, U, TR)$_{2-m}$ (Nb, Ta, Ti)$_2O_6$(O, F)$_{1-n}\cdot nH_2O$, 37,3–71,45% $Nb_2O_5$, 0,48–11,72% $Ta_2O_5$), титанотанталониобаты (эвксенит, Y(Nb, Ta, Ti)$_2$ (O, OH)$_6$, 3,83–28,56% $Nb_2O_5$ и 1,08–47,31 $Ta_2O_5$, самарскит ((Y, TR, U, Ca, $Fe^{2+}$) (Nb, Ta, $Fe^{3+}$, Ti)$O_4$, 29,6–45,90% $Nb_2O_5$ и 2,54–21,50% $Ta_2O_5$), группа колумбита-танталита ((Fe, Mn), (Nb, Ta)$_2$ $O_6$, 0,23–77,20% $Nb_2O_5$ и 0,83–84,80% $Ta_2O_5$), ниоботитанцирконаты (FeNb – циркелит, $Ca_2$ $Zr_2$(Fe, Ti, Nb)$_2O_{14}$.

Промышленные типы месторождений: эндогенных – магматический, карбонатитовый, альбитовый; экзогенных – остаточные коры выветривания и россыпи. Наибольшее значение имеют эндогенные месторождения и россыпи.

По запасам $Nb_2O_5$ (тыс. т) месторождения подразделяют на уникальные – более 10000, крупные – 10000–1000, средние – 1000–100, мелкие – менее 100.

Особенности при поисках и разведке заключаются в эффективности применения радиометрических методов.

Промышленные руды – пирохлоровые, лопаритовые. В случае широкого развития колумбита важны колумбит-танталитовые руды. По содержанию $Nb_2O_5$ (%) руды подразделяют на весьма богатые – более 1,5, богатые – 1,5–0,8, средние – 0,8–0,45, бедные – 0,15–0,03.

### *9.4.1.5. Способы добычи и переработки руд.*

Месторождения разрабатывают открытым, подземным и комбинированным способами.

Руды к переделу готовят обогащением с применением комбинированной технологии (магнитная сепарация, гравитация, флотация).

Извлечение оксида ниобия из руд различных типов достигает 80% при содержании в концентрате до 60% $Nb_2O_5$. Вредными примесями в концентрате являются кремнезем, диоксид титана, фосфор, сера, оксиды (Al, Fe, Ca), пентаксид тантала, калий, натрий, фтор, хлор, кобальт, углерод.

При обогащении руд комплексного состава попутно получают оловянные, цирконовые, апатитовые концентраты. Ниобиевые концентраты перерабатывают гидрометаллургическими, хлоровозгоночными и металлургическими способами. Сопутствующий тантал, содержащийся в концентратах, переходит в гидрометаллургические концентраты, из которых его извлекают экстракционными и другими способами. В товарных продуктах ниобий находится в пентаксиде ниобия – 99% $Nb_2O_5$, гидроксиде ниобия – 75–80% ($Nb_2O_5$+$Ta_2O_5$), феррониобии 85–95% $Nb_2O_5$. Выращивают также кристаллы ниобия с заданными свойствами (см. рис. 9.11).

Вредными примесями в готовой ниобиевой продукции являются кремнезем, диоксид титана, фосфор, сера, оксиды алюминия, железа, кальция, пентоксид тантала, калий, натрий, хлор, кобальт, углерод, медь, марганец, молибден, магний, вольфрам, олово, ванадий.

### *9.4.2. Тантал.*

#### *9.4.2.1. Свойства.*

Тантал (Ta, V, 73), металл, серебристый, мягкий; проявляет амфотерные свойства; сидеро- и литофильный, устойчивая валентность $5^+$.

Плотность 16654 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 400–1230 МПа; температуры плавления 2996$^0$ С, кипения – 5425; теплопроводность 57,5 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $12{,}45 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, удельная магнитная восприимчивость $1{,}07 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $6{,}6 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Тантал – токсичный элемент (IV класс опасности). ПДК$_{р.з}$ Ta и $Ta_2O_5$ – 10 мг/м$^3$.

#### *9.4.2.2. Распространенность и запасы.*

Кларк тантала земной коры 2,5 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,018, основных – 0,48, средних – 0,7, кислых – 3,5, осадочных (глинах и сланцах) – 3,5.

Мировые подтвержденные запасы $Ta_2O_5$ (без стран СНГ) на 1995 г. – около 74 тыс. т, годовое производство в концентратах на 1994 г. составляет 349 т металла. Наиболее крупные производители – Австралия, Китай, Бразилия, Канада, Таиланд, Малайзия. Мировое потребление – около 1 тыс. т тантала.

#### *9.4.2.3. Области использования.*

Тантал обладает уникальными свойствами. Он тугоплавок, устойчив к коррозии, особенно к воздействию кислот, пластичен, прочен. Из металлического порошка тантала формуются аноды электролитических танталовых конденсаторов, применяемых в электронной авиакосмической технике. Эти конденсаторы являются важнейшими компонентами интегральных

схем микроэлектроники. Тантал применяют преимущественно в радиоэлектронике как высокоспециализированный материал. Карбид тантала используется в металлообрабатывающей промышленности в виде металлорежущего инструмента. Температура плавления этого вещества около 4000° С. Поэтому он используется для производства огнеупорных материалов, штампов, других износоустойчивых деталей.

В химическом машиностроении металлический тантал, обладающий высокой коррозионной стойкостью, используют для плакирования оборудования, применяемого на заводах по производству серной кислоты, аммиака и других агрессивных веществ. Металлический тантал и суперсплавы на его основе используются в производстве авиакосмической техники как материал для ответственных деталей реактивных двигателей и ракет (лопатки турбин и др.), форсажных камер и т.п. Монокристаллы танталата лития, как и ниобата лития, используются в опто- и акустоэлектронике, а также в ювелирной промышленности.

Тантал используется в фармацевтике и медицинской промышленности, а также в самой медицине, в частности, в ортопедической хирургии, сосудистой хирургии как скрепляющий материал, не отторгаемый живой тканью. В кардиологии используют миниатюрные электростимуляторы сердечной деятельности, корпуса которых сделаны из тантала.

### *9.4.2.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно более 50 минералов тантала. Среди них преобладают оксиды. Промышленное значение имеют 15 минералов группы пирохлора, титанотанталониобатов, оловотанталатов, танталониобатов. Важнейшими из них являются танталит (Fe, Mn) $Ta_2O_6$, минерал ряда колумбит-танталит, содержащий более 40% $Ta_2O_5$ (при $Ta_2O_5 : Nb_2O_5 > 1$), воджинит, или уоджинит (Ta, Nb, Mn, Sn, Fe)$_2O_4$, содержащий 67,1–74,1 % $Ta_2O_5$, микролит (Na, Ca $Ta_2O_6F$), содержащий 68,6–80,6 $Ta_2O_5$, и другие минералы Ta.

В комплексных рудах Та находится преимущественно в пирохлоре (Ca, $NaNb_2O_6F$), содержащем до 11,72% $Ta_2O_5$. В таких рудах $Ta_2O_5$ – 0,015–0,030%, $Ta_2O_5 : Nb_2O_5$ – 1 : (13–15). В пегматитовых танталовых рудах в качестве попутных компонентов присутствуют Be, Li, Cs, Rb, Sn и др. Эти руды обычно хорошо обогащаются методами гравитации с получением концентратов с соотношением $Ta_2O_5 : Nb_2O_5$ от 1 : 1 до 1 : 3.

Танталовые руды танталоносных гранитов обычно мелкозернисты и содержат мелкую вкрапленность минералов Та в кварцево-полевошпатовых агрегатах, нередко с топазом. Попутные компоненты – Li и Rb в слюдах, Sn – в касситерите и кварцево-полевошпатовый и слюдяной продукты. Комплексные тантал-ниобиевые руды содержат редкие земли цериевой и иттриевой подгрупп, цирконий, криолит.

Промышленные типы месторождений: эндогенных – пегматитовый, магматический, карбонатный, а также формации ультраметаморфогенных редкометалльных щелочных метасоматитов; экзогенных – остаточные коры выветривания и россыпи. Наибольшее значение имеют эндогенные типы и россыпи.

По запасам $Ta_2O_5$ (тыс. т) месторождения тантала подразделяют на уникальные – более 100, крупные – 100–30, средние – 30–4, мелкие – менее 4.

При поисках и разведке высоко эффективны радиационные методы.

Промышленные руды – танталитовые, воджинит-танталитовые, микролитовые, лопаритовые. По содержанию $Ta_2O_5$ (%) руды подразделяют на весьма богатые – более 0,4, богатые – 0,4–0,25, средние – 0,25–0,1, бедные – 0,1–0,01.

### *9.4.2.5. Способы добычи и переработки.*

Месторождения разрабатывают открытым, подземным и комбинированным способами. Подготовку руд к переделу производят обогащением с применением комбинированных технологий (гравитация, флотация, магнитная и электрическая сепарация).

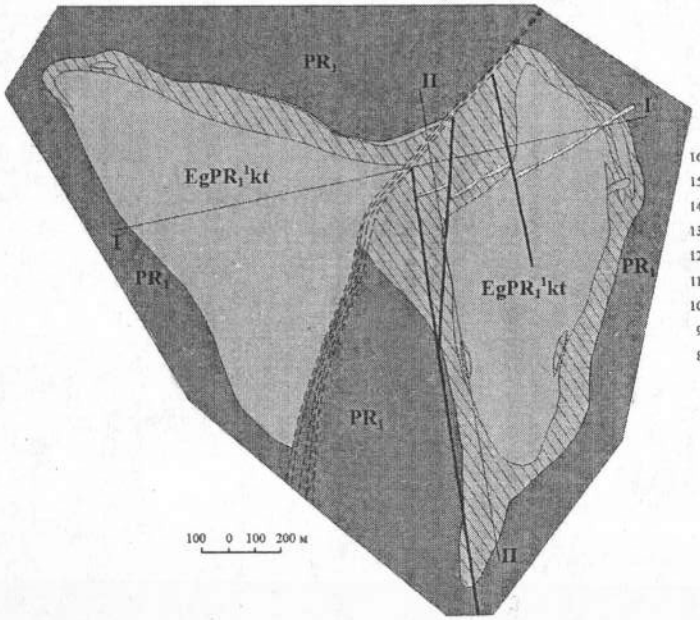
Извлечение тантала из руд различных типов достигает 95% при содержании в концентрате до 70% $Ta_2O_5$. К вредным примесям в концентрате относятся фосфор, сера, кремнезем, оксид титана. При обогащении руд комплексного состава попутно получают оловянные, цирконовые, золотосодержащие концентраты. Танталовые и танталсодержащие концентраты перерабатывают гидрометаллургическими, металлургическими способами и хлоридовозгонкой. Сопутствующий ниобий, содержащийся в концентратах, переходит в гидрометаллургические концентраты, из которых его извлекают экстракционными и другими способами.

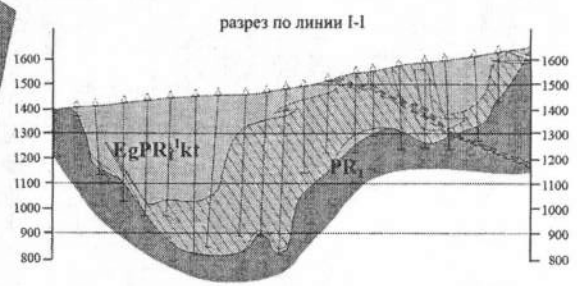
Товарные продукты содержат (%): пентоксид тантала – 99,5%, фтортанталат калия – более 45,5% Та, металлический тантал – 99,9 Та.

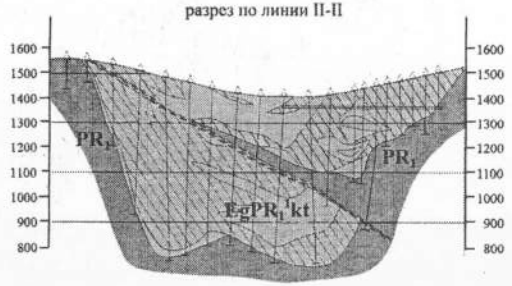
Вредные примеси в танталовой продукции – вольфрам, железо, кобальт, кремний, марганец, медь, молибден, никель, свинец, хром, ванадий, ниобий, алюминий, титан, кальций, магний.

### *9.4.3. Месторождения ниобия и тантала в Забайкалье.*

Среди танталовых руд в Забайкалье известны собственно танталовые ($Ta_2O_5$ : $Nb_2O_5$ не менее 1 : 4) и комплексные тантало-ниобиевые ($Ta_2O_5$ : $Nb_2O_5$ от 1 : 4 до 1 : 20). К собственно танталовым относятся пегматитовые и танталовые руды редкометалльных гранитов. Собственно пегматитовые танталовые руды в Забайкалье связаны с Мало-Кулиндинским месторождением, а редкометалльных гранитов – с Орловским, Этыкинским и другими. Комплексные танталониобиевые руды находятся в Катугинском редкометалльно-редкоземельно-криолитовом месторождении. В рудах собственно танталовых месторождений $Ta_2O_5$ : $Nb_2O_5$ составляет 1,0–1,2 при среднем содержании (%): $Ta_2O_5$ – 0,012, $Nb_2O_5$ – 0,01, редкометалльных гранитов, соответственно, 1,5–3,0 при содержании $Ta_2O_5$ – 0,0173–0,168 %. Известно 6 месторождений и более 200 рудопроявлений, основная часть которых приурочена к оловянно-вольфрамово-редкометалльному и редкометалльно-железо-медному поясам.


PR1
II
I
EgPR1¹kt
I
PR1
EgPR1¹kt
PR1
PR1
II
100 0 100 200 м


разрез по линии I-I
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
EgPR1¹kt
PR1


разрез по линии II-II
1600
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
800
PR1
PR1
EgPR1¹kt

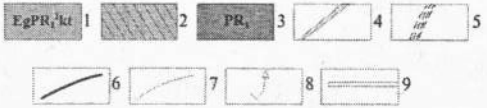

EgPR1¹kt 1
2
PR1 3
4
5
6
7
8
9

Рис. 9.12. Геологическая карта Катугинского месторождения. По: [Геологическое строение..., 2002]

*1–2: нижнепротерозойский интрузивный комплекс: 1 – щелочные граниты слабоорудененые; 2 – редкометалльные и редкоземельные рудные тела; 3 – гнейсы и кристаллические сланцы нижнего протерозоя; 4 – дайка габбро-диабазов; 5 – зона дробления и милонитизации; 6 – разломы; 7 – геологические границы; 8 – буровые скважины на разрезах; 9 – подземные горные выработки на разрезах.*

Незначительное количество рудопроявлений отмечается в других рудных провинциях региона. По запасам и прогнозным ресурсам ниобия и тантала ведущее место принадлежит формациям ультраметаморфогенных редкометалльных щелочных метасоматитов и редкометалльных гранитов, в меньшей мере – формациям редкометалльных щелочных гранитов и сиенитов, редкометалльных пегматитов.

Формация ультраметаморфогенных редкометалльных щелочных метасоматитов развита в редкометалльно-железомедном поясе Забайкалья. Наиболее изученным и крупным является **Катугинское** поле метасоматитов, к которому приурочено одноименное месторождение ниобия, тантала, редких земель, циркония и криолита. Находится оно в 80 км к югу от ж.-д. станции Чара. Вмещающими породами являются гнейсы и кристаллические сланцы раннепротерозойского возраста. В них выявлена рудная залежь протяженностью 7 км и мощностью до 600 м. Она разделена на три рудных тела, которые представлены щелочными метасоматитами эгирино-амфиболово-микроклинового состава. Мощность их – от 6 до 650 м, прослежены по простиранию на 5 км, до глубины 900 м (рис. 9.12). Главные рудные минералы: пирохлор, циркон, криолит, гагаринит, редкоземельный флюорит. Руды вкрапленные, содержат (%): $Ta_2O_5$ – 0,019; $Nb_2O_5$ – 0,3; $ZrO_2$ – 1,09; U – 0,098; Th – 0,0197; $TR_2O_3$ – 0,273 (в т.ч. $Y_2O_3$ – 0,009), криолита – 2,05. Выделяется один технологический тип руды и разработана единая гравитационно-магнитно-флотационная схема. Получены концентраты: 1) тантал-ниобиевый, содержащий (%): $Nb_2O_5$ – 25,74; $Ta_2O_5$ – 1,82; $ZrO_2$ – 8,71; $TR_2O_3$ – 6,61; 2) редкометалльный, содержащий (%): $TR_2O_3$ – 15,0; $Nb_2O_5$ – 0,42; $Ta_2O_3$ – 0,3; $ZrO_2$ – 0,59; 3) криолитовый, содержащий 33,36% криолита; 4) цирконовый, содержащий 60% $ZrO_2$; 5) кварцево-полевошпатовый [Чечёткин и др., 1997]. При этом извлечение пятиокиси тантала составляло 57%, пятиокиси ниобия – 53,6%, суммы оксидов редких земель – 54,6%, двуокиси циркония – 75,2%, криолита – 5–7%.

Готовая продукция может быть получена в виде фтортанталата калия (45,5 % тантала), технической пятиокиси ниобия,

цирконового концентрата (60% $ZrO_2$), раствора нитратов редких земель, уранового концентрата (75,5% U), криолита.

Разведанные запасы руды позволяют отнести месторождение к уникальным. Запасы руды составляют 1250 млн. т, $Ta_2O_5$ – 241,3 тыс. т, $Nb_2O_5$ – 3718,2 тыс. т, $ZrO_2$ – 13654,3 тыс. т, криолита – 25711,6 тыс. т, сумма $TR_2O_3$ – 3374,6 тыс. т, в том числе и $Y_2O_3$ – 1147,2 тыс. т. Оно благоприятно для отработки открытым способом (около 75% запасов при коэффициенте вскрыши – 1,46 $м^3/т$) и может полностью удовлетворить промышленность России по танталу, ниобию, цирконию, редким землям и криолиту. При производительности карьера 3 млн. т руды в год возможно получение 18 тыс. т пирохлорового, 15 тыс. т редкоземельного концентратов. В переводе на готовую годовую продукцию это даст: 244 т тантала во фтортанталате калия, 4,9 тыс. т технической пятиокиси ниобия, 61,5 тыс. т цирконового концентрата, 7,3 тыс. т суммы оксидов редких земель, 7,5 тыс. т криолита.

Имеется возможность открытия промышленных россыпных месторождений циркона по периферии Катугинского редкометалльного месторождения.

Формация редкометалльных гранитов развита в оловянно-вольфрамово-редкометалльном поясе. Месторождения редкометалльных гранитов характеризуются крупными масштабами при относительно низких содержаниях полезных компонентов в рудах, благоприятны для открытой отработки. По преобладающему минеральному составу месторождения подразделяются на танталовый и бериллиевый типы.

Промышленное значение имеют месторождения танталитового типа: **Орловское, Этыкинское, Ачиканское**. Рудные тела представлены альбитизированными амазонитовыми гранитами и связанными с ними кварцевыми альбититами, кварцево-амазонитовыми магматическими образованиями, которые обогащены колумбит-танталитом, микролитом.

Наиболее известным промышленным месторождением рассматриваемого типа является **Орловское**, руды которого содержат, наряду с танталом и ниобием, также и литий. Оно находится на территории Агинского автономного округа

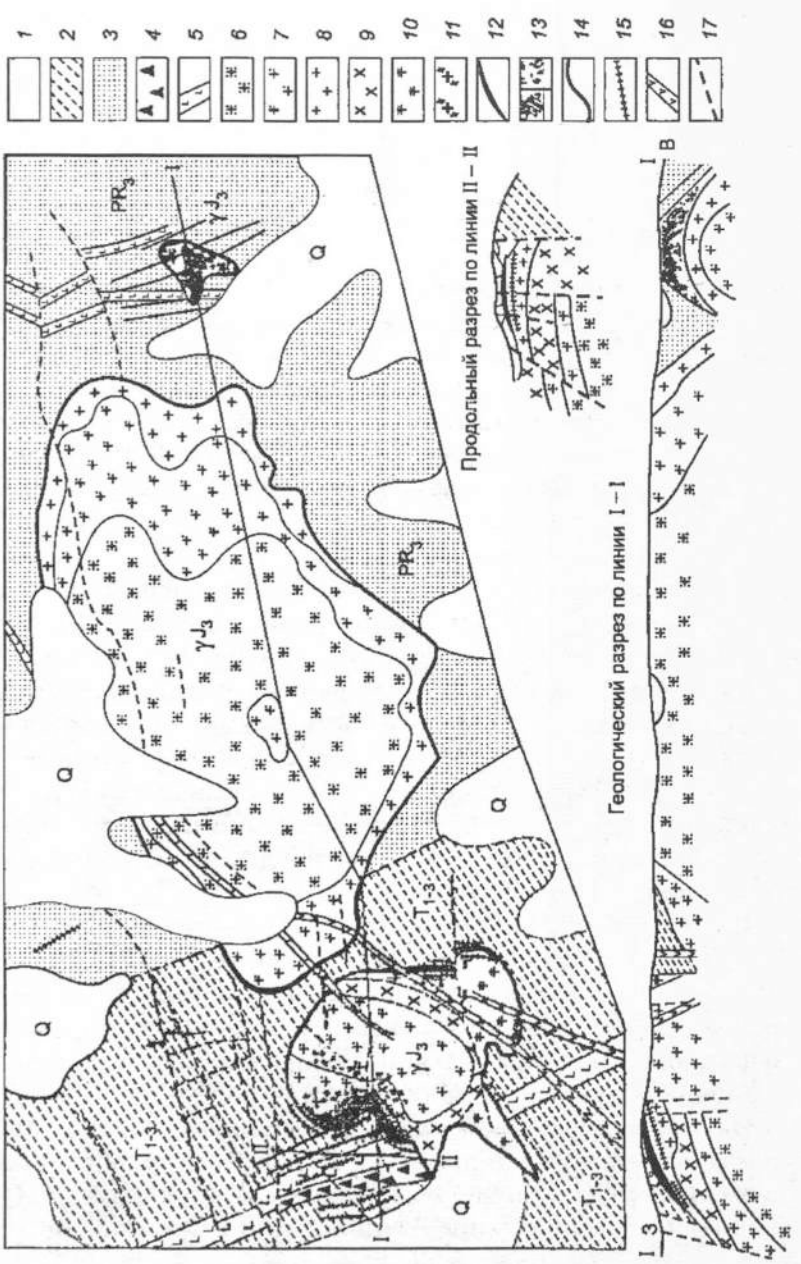

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
Q
PR3
γJ3
T1-3
Продольный разрез по линии II – II
Геологический разрез по линии I – I
I
II
З
В

Рис. 9.13. Схематическая геологическая карта Орловско-Спокойнинского рудного узла. По: А.М. Гребенникову, И.Н. Титову, В.И. Белых, А.Ц. Жаргалову, В.Н. Ванюкову (1964 г.)

*1 – современные делювиальные отложения; 2 – толща песчаников, алевролитов, с прослоями метаэффузивов; 3 – толща песчаников и алевролитов; 4 – туфобрекчии; 5 – лампрофиры; 6 – биотитовые порфировидные граниты; 7 – двуслюдяные порфировидные граниты; 8 – мусковитовые граниты с вольфрамитом и бериллом; 9 – порфиробластовые мусковитовые граниты с колумбитом; 10 – амазонит-альбитовые граниты с лепидолитом, мусковитом и колумбит-танталитом (три переходные разности); 11 – мусковитовые грейзенизированные граниты с вольфрамитом и бериллом; 12 – лепидолит-альбитовые граниты с колумбит-танталитом и микролитом; 13 – грейзены: а – кварцево-мусковито-циннвальдитовые с вольфрамитом; 14 – кварцевые альбититы (дайки) и кварцевые жилы; 15 – кварц-амазонитовые тела с оторочкой циннвальдита; 16 – дайки базальтовые; 17 – разломы, сбросы.*

в 40 км к западу от ж.-д. ст. Могойтуй и в непосредственной близости от поселка городского типа Ново-Орловский. Открыто в 1960 г. В.А. Орловым. Открытие месторождения связано с изучением окрестностей Спокойнинского месторождения А.А. Беусом, А.А. Ситниным, Л.Н. Черник, Н.А. Китаевым и геологами ЧГУ. Месторождение находится в зоне эндоконтакта Хуху-Челотуйского купола гранитов Хангилайского гранитного массива кукульбейского комплекса (рис. 9.13, 9.14). Представлено лепидолит-альбит-микроклиновыми пегматитами и гранитами, образующими рудную зону. Промышленная ее часть прослежена по простиранию на 800 м и по падению на 200–500 м. Мощность 36–85 м. Среднее содержание $Ta_2O_5$ – 0,014%. Породообразующими минералами гранитов являются (%): лепидолит – 7,5–25, кварц – 20–25, альбит – 25–50, микроклин-амазонит – 5–10, топаз – 3–5. Руды сложены микролитом (112–322 г/т), колумбит-танталитом (246–1115 г/т) (рис. 9.15). Формы кристаллов колумбит-танталита разнообразны и изменяются в связи с последовательностью их образования (рис. 9.16) [Поваренных, 1991]. Размеры широко варьируют до микроскопически мелких, не извлекающихся при обогащении (рис. 9.17). Среди акцессорных минералов присутствуют монацит, флюорит, ильменит, вольфрамит, касситерит, рутил, эвксенит, берилл, циркон. Состав руды (%): $Ta_2O_5$ – 0,015–0,017; $Nb_2O_5$ – 0,007–0,009; $Li_2O$ – 0,23–0,30; $Rb_2O$ – 0,16–0,03; $Cs_2O$ – 0,005. Черновой гравитационный концентрат содержал $Ta_2O_5$ – 0,69% при товарном извлечении 61–66%. А.М. Гребенниковым выделено четыре сорта руд, из них по I, II и III сортам запасы руд 92,65% и 92,3% $Ta_2O_5$, при содержании 0,014% [Месторождения Забайкалья, 1995]. В недрах по состоянию на 01.01.1998 г. оставалось 28 млн. т руды. Отработка начата 31.08.1962 г. С начала 1990-х годов Орловский ГОК периодически не действовал. Резервом предприятия являются крупные запасы забалансовых руд на флангах и нижних горизонтах, извлечение по ним (с содержанием 0,007% $Ta_2O_5$) не отличается от рядовых руд, а также в хвостохранилище ГОКа и россыпи с запасами до 233 т $Ta_2O_5$ с содержанием 50–120 г/м$^3$ танталовых минералов.

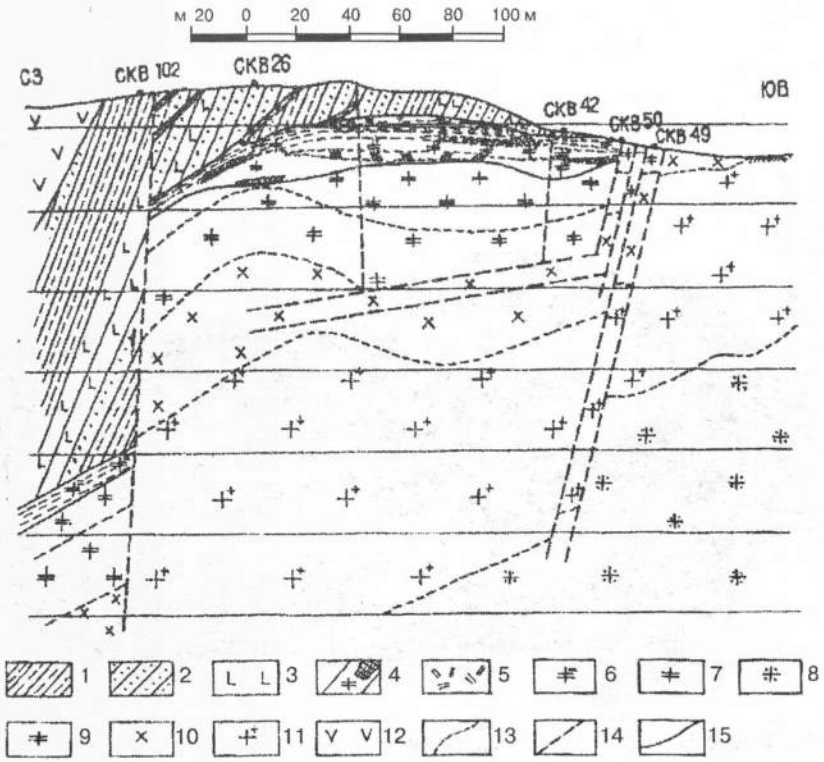



Рис. 9.14. Схематический геологический разрез Орловского месторождения по линии скважин № 102, 26, 42, 50, 49. По: [Месторождения Забайкалья, 1995].

*Вертикальная зональность:*

*1 – сланцы; 2 – песчаники; 3 – кварцевые порфиры; 4 – кварц-амазонитовые образования; 5 – лепидолит-топазово-кварцевые грейзены; 6 – лепидолит-альбитовые граниты с колумбит-танталитом и микролитом; 7 – амазонит-альбитовые граниты с лепидолитом и колумбит-танталитом; 8 – порфировидные биотитовые граниты; 9 – амазонит-альбитовые граниты с лепидолитом и мусковитом; 10 – порфиробластовые мусковитовые граниты (горошковые); 11 – двуслюдяные порфировидные граниты; 12 – лампрофиры; 13 – границы метасоматических фаций гранитов; 14 – линии тектонических нарушений; 15 – нижний контур рудной залежи.*

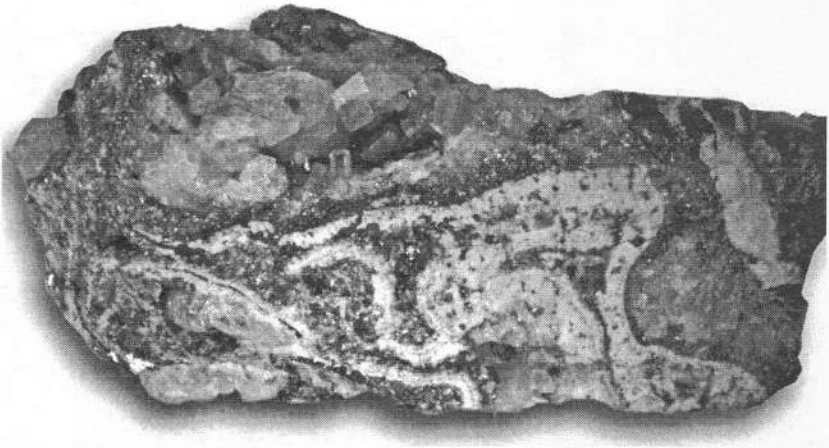


Рис. 9.15. Фестончато-полосчатой текстуры литиево-танталовая руда. Орловское месторождение. Натуральная величина.

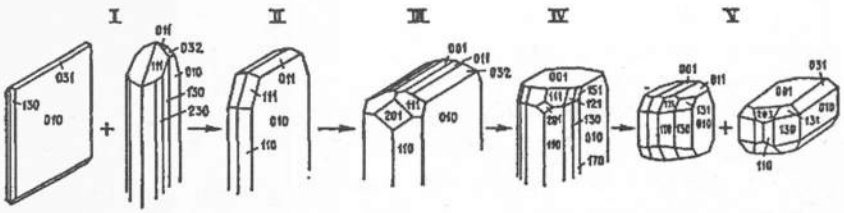



Рис. 9.16. Схематический эволюционный ряд форм кристаллов минералов группы колумбита-танталита Орловского массива. По М.Ю. Поваренных [1991].

Габитусные типы:

I (столбчато-игольчатого и пластинчатого обликов) {010}+{031}+ {130}+{hk0};

II (таблитчатого облика) {010}+{110}+{011};

III (толсто-таблитчатого облика) {010}+{110}+ {0kl}+{111};

IV (таблитчато-столбчатого облика) {010}+{001}+ {hk0}+{hkl};

V (изометрического и короткостолбчатого обликов) {001}+{010}+{0kl }+{hk0}+{hkl}+{h0l}.

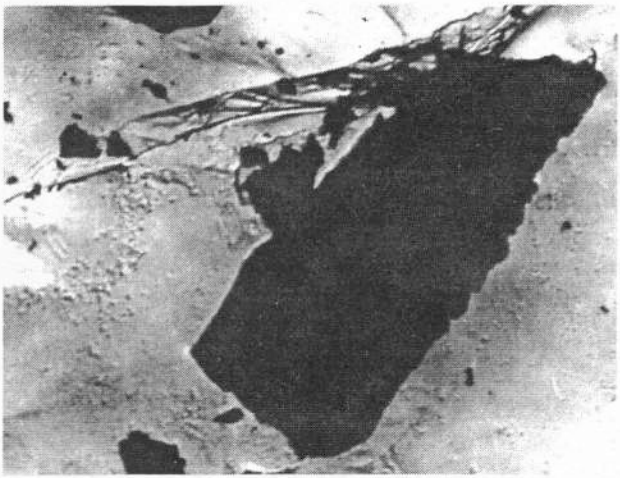


Рис. 9.17. Зерно танталита в мусковите. Электронно-микроскопический снимок. Угольная реплика. Увеличение в 3500 раз. Снимок В.Н. Аношкина. Лаборатория минералогии ЗабНИИ Мингео СССР.

**Этыкинское** редкометалльное месторождение находится в Балейском районе. Оно представляет собою одноименный Этыкинский массив танталоносных амазонит-альбитовых гранитов площадью несколько более 1 км$^2$. Он приурочен к Этыкинской редкометалльной тектонически ослабленной зоне, находящейся в песчаниково-сланцевой толще нижне-среднеюрского возраста. В плане массив имеет субизометричную форму. В восточном экзоконтакте осадочная толща грейзенизирована и превращена в топаз-кварц-слюдяные грейзены мощностью до 10–15 м. Эрозионный срез предполагается около 100 м (см. рис. 9.10). По данным А.А. Ситнина и др. [Месторождения Забайкалья, 1995], массив имеет довольно четко выраженное зональное строение. Все зоны хорошо видны на рис. 9.10. Рудными (танталоносными) являются порфировидные лепидолит-амазонит-альбитовые граниты (апограниты по авторам) внешней части массива (зона 5 на рис. 9.10) и мелкозернистые равномернозернистые лепидолит-амазонит-альбитовые и амазонит-альбитовые граниты (зона 6 на рис. 9.10). Рудные граниты составляют около 1/3 площади массива. Остальные две трети сложены неравномернозернистыми амазонит-альбитовыми гранитами с криофиллитом. Они отличаются бедной тантал-ниобиевой минерализацией. На глубине эти граниты обогащены кварцем. Главные рудные минералы представлены пирохлором-микролитом, танталит-колумбитом, касситеритом, лепидолитом, протолитионотом. Содержания в рудах варьируют для (%) $Ta_2O_5$ – 0,015 – 0,018, $Nb_2O_5$ – 0,0188 – 0,0200. Распределение оруденения имеет тенденцию к зональности (рис. 9.18).

Формация редкометалльных пегматитов включает большинство мелких месторождений и рудопроявлений тантала и ниобия. Но, несмотря на широкое распространение, практическое значение их невелико. Типичным примером данного типа является **Мало-Кулиндинское** месторождение тантала. Оно находится на правобережье р. Онон, в 7 км от устья р. Малая Кулинда и 10 км к северо-востоку от ж.-д. станции Оловянная Оловяннинского района. Как месторождение Sn известно с 1811 г. На редкие металлы изучалось в 1949–59 гг. на участке Подгра-

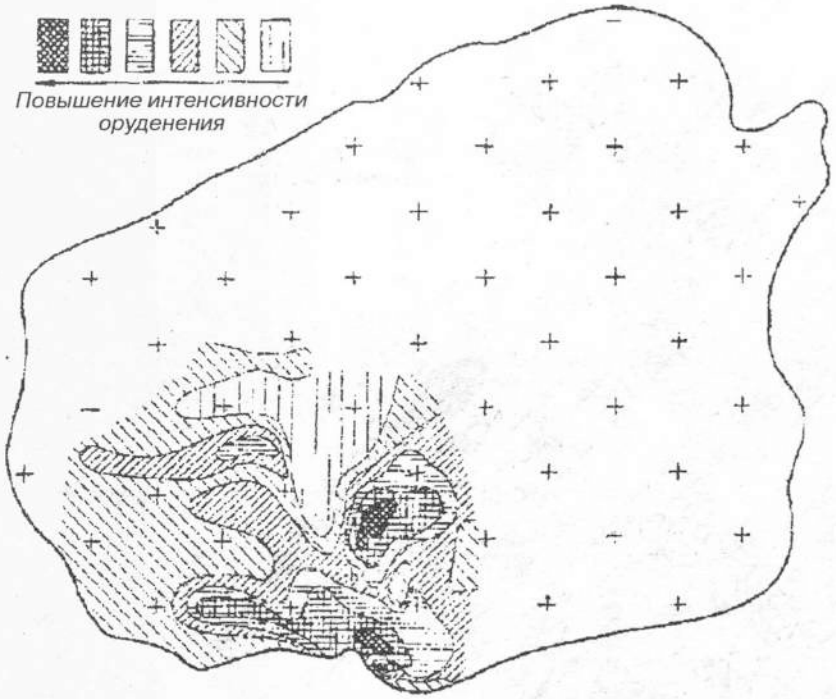



Рис 9.18. Распределение тантала на поверхности Этыкинского месторождения. По А.М. Гребенникову (1995 г.).

нитном (пегматитовое тело № 36, жилы № 31–190, 40 и др.). Разведкой и изучением занимались А.И. Гинзбург, И.М. Зуб, В.В. Сун-Кин-Зян, И.И. Климов, Б.В. Щекин, А.С. Бабкин, А.М. Гребенников, В.Ф. Ефимов и др.

Описание месторождения приводится по данным А.М. Гребенникова [Месторождения Забайкалья, 1995]. Повышенные содержания тантала находятся в микроклиново-альбитовых и альбитовых разностях пегматитов, залегающих в песчаниках кулиндинской свиты. Большинство жил являются «слепыми», то есть не имеют выхода на дневную поверхность (рис. 9.19). Крупные тела прослежены по простиранию на 500–1000 м. Мощность их 10–35 м. Разведано 30 пегматитовых тел альбитового комплекса и мусковит-кварцевых грейзенов. Наиболее

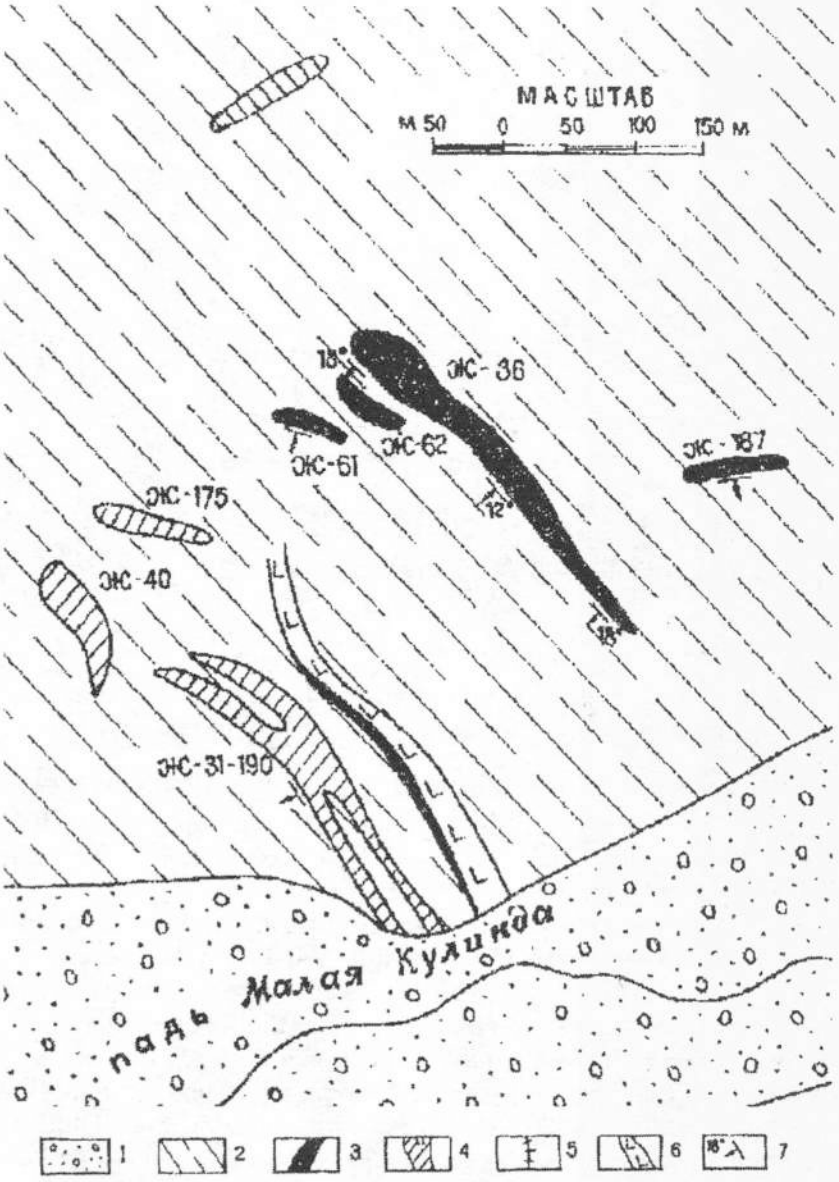

МАСШТАБ
м 50 0 50 100 150 м
ЭС-36
ЭС-62
ЭС-61
ЭС-187
ЭС-175
ЭС-40
ЭС-31-190
падь Малая Кулинда
1
2
3
4
5
6
7

Рис. 9.19. Схематическая геологическая карта Мало-Кулиндинского месторождения. По А.М. Гребенникову (1995 г.).

*1 – четвертичные отложения; 2 – песчано-глинистые биотитовые сланцы с прослоями метапесчаников и метаконгломератов; 3– замещенные альбитовые и мусковитовые грейзенизированные пегматиты с колумбит-танталитом и бериллом; 4 – частично замещенные пегматиты с колумбит-танталитом и бериллом; 5 – альбититы с тонковкрапленным колумбит-танталитом и бериллом; 6 – диабазы (дайки);*

продуктивная жила № 36Д состоит из 8 ветвей длиной 100–700 м по простиранию и 50–300 м по падению. Распределение полезных компонентов неравномерное. Содержание $Ta_2O_5$ на поверхности – 0,017%, на глубоких горизонтах – 0,012%. В танталите содержание $Ta_2O_5$ – 53–65%, Ta/Nb – 2,3–11. Основная масса тантала (84,4%) связана с танталит-колумбитом. В дробленой руде 60,1% танталита свободно от сростков с другими минералами. Максимальная степень раскрываемости минерала в классах 0,2–0,1 мм. На участке Подгранитном Орловским ГОКом производилась добыча руды карьером из жилы № 36Д на горизонтах 720–780 м. По запасам Ta относится к средним (> 1000 т $Ta_2O_5$). Танталит-колумбит не радиоактивен. Кроме танталит-колумбита получали касситеритовый концентрат с содержанием 5900–6900 г/т. Переработка руд месторождения проводилась по гравитационной схеме, извлечение составляло 55–65%. Производительность по руде составляла 150–200 т/сут. Добычу танталовой руды вела артель «Пегматит». В дальнейшем она была остановлена, хотя запасы не выработаны.

Значительный интерес, как возможное промышленное месторождение тантала, представляет **Зимнее** рудопроявление, расположенное в междуречье падей Мотогор и Большой Ильдикан. Лепидолит-топаз-альбит-амазонитовые граниты рассекают доломиты и известняки, на контакте с которыми развиты флюорит-слюдяные грейзены, содержащие повышенные концентрации бериллия и олова. В амазонитовых редкометалльных гранитах присутствуют, кроме топаза, лепидолита и флюорита, также хризоберилл ($BeAl_2O_4$), танталит, колумбит, микролит, касситерит, лопарит и другие редкометалльные минералы. Содержание в этих гранитах (%): $Ta_2O_5$ – 0,011–0,023, $Nb_2O_5$ – 0,005–0,032, $Li_2O$ – 0,01–0,2, Rb – 0,085 [Скурский, 1996]. Эти граниты являются аналогом слагающих описанного выше Этыкинского месторождения. По аналогии с ним ресурсы Зимнего проявления достаточно велики.

Источником тантала и ниобия могут быть пегматитовые тела **Кангинского** поля. В них среднее содержание $Ta_2O_5$ составляет 0,023%, а ресурсы оцениваются в 5000 т. Так же

оцениваются ресурсы тантала и **Олондинского** пегматитового поля (5000 $Ta_2O_5$ при содержании 0,01%).

Месторождения формации редкометалльных щелочных гранитов и сиенитов (**Олекминское** месторождение, рудопроявления Сакунского и Мурунского массивов) изучены недостаточно и требуют дополнительных исследований.

Олекминское месторождение находится в 100 км севернее ж.-д. станции Ксеньевка Забайкальской железной дороги в Тунгиро-Олекминском районе, в междуречье Верхней Моклы и Олекмы. Здесь распространены субщелочные и щелочные лейкократовые граниты, граносиениты, сиениты с щелочными амфиболами (рибекитом, арфверсонитом), аляскитовые граниты нерчуганского интрузивного комплекса юрского возраста. С ними связаны рудоносные зоны, содержащие колумбит, микролит, танталит-колумбит, самарскит ($YFeNb_2O_8$), фергюсонит ($YNbO_4$), танталит, циркон ($ZrSiO_4$), торит ($ThSiO_4$), ильменит, бастнезит ($CeCO_3F$), лепидолит, касситерит, ксенотим ($YPO_4$), флюорит ($CaF_2$). В рудоносной зоне содержание (%): $Ta_2O_5$ – 0,17; $Nb_2O_5$ – 0,14. Установлены значительные примеси циркония, гафния, редких земель, олова. Для переработки руд разработана комбинированная гравитационно-флотационная схема обогащения и получены комплексный Ta-Nb концентрат марки ТАК-4 при извлечении $Ta_2O_5$ – 30,3% и $Nb_2O_5$ – 26,8%, а также Ta-Nb продукт для химико-металлургической переработки с извлечением $Ta_2O_5$ – 11,5%, $Nb_2O_5$ – 12,9%. При этом общее извлечение составляет 50%. М.Д. Скурский [1996], рассматривая Олекминское месторождение как аналог крупного промышленного Улуг-Таызекского в Тыве, прогнозирует большие запасы.

В Чикойском рудном районе, в бассейне р. Менза, распространены редкометалльные литионит-топаз-альбитовые и мусковит-топаз-альбитовые граниты. С подобными редкометалльными гранитами связано **Шумиловское** месторождение. Здесь содержание $Ta_2O_5$ достигает 0,015–0,017%. Танталоносными являются и редкометалльные граниты Горначихинского рудного поля в Куналейском рудном узле (Скурский, 1996).

Прогнозные ресурсы и минерагенический потенциал тантало-ниобатов оценены в 8 рудных районах: Кодаро-Удоканском, Чарском, Верхне-Олекминском, Кукульбейском, Богдатско-Аркиинском, Чикойском, Бальджиканском. Они исчисляются в сотни тыс. т $Ta_2O_5$, в млн. т – $Nb_2O_5$. Этого достаточно для удовлетворения потребностей страны на длительную перспективу. Запасы и ресурсы ниобия в Забайкальском крае по состоянию на 02.01.2006 г. составляли 626387 т, а стоимость их оценивалась в 579573 млн. рублей. Для тантала запасы составляли 55834 т, а стоимость оценивалась в 205140 млн. рублей.

## Контрольные вопросы

1. Назовите основные химические, физические и экологические свойства тантала и ниобия.
2. Каковы промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд тантала и ниобия?
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд тантала и ниобия Забайкалья?
4. Каков минеральный состав руд тантала и ниобия?
5. Назовите месторождения и типы руд тантала и ниобия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используются тантал и ниобий?

## Литература

### Основная

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Кушпаренко Ю.С., Петрова Н.В. Технология переработки редкометалльных руд. – М.: АО «Геоинформмарк», 1994.

Минеральное сырье. Ниобий и тантал / В.С. Кудрин, Ю.С. Кушпаренко, Н.В. Петрова и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

Ниобий и тантал / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов, А.В. Елютин, А.М. Захаров. – М.: Металлургия, 1990.

Новое в развитии минерально-сырьевой базы редких металлов. – М.: ИМГРЭ, 1991.

Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. – М.: Недра, 1987.

Удоканское медное, Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России / В.В. Архангельская, Ю.В. Быков, Р.Н. Володин и др. – Чита, 2004.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. III / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

**Дополнительная**

Бойцов В.Е., Пилепенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Учебное пособие. – М.: НИА – Природа, 1999.

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

Нетрадиционные типы редкометалльного минерального сырья / Н.А. Солодов, Т.Ю. Усова и др. – М.: Недра, 1991.

Солодов Н.А. Минерагения редкометалльных формаций. – М.: Недра, 1985.

Скурский М.Д. Недра Забайкалья. – Чита, 1996.

## 9.5. Ванадий.

### *9.5.1. Свойства.*

Ванадий (V, V, 23), металл, серебристый, мягкий, проявляет амфотерные свойства, литофильный, в меньшей степени халько- и сидерофильный, устойчивые валентности $3^+$, $4^+$ и $5^+$.

Плотность 6110 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 600 МПа; температуры плавления 1887° С, кипения – 3377; теплопроводность 30,7 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $24{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $6{,}28 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $8{,}3 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Ванадий – высокотоксичный элемент (I класс опасности). $ПДК_{м.р}$ 0,5 мг/м$^3$, $ПДК_{с.с}$ – 0,002 мг/м$^3$; $ПДК_{в}$ – 0,1 мг/дм$^3$.

### *9.5.2. Распространенность и запасы.*

Кларк ванадия земной коры 90 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 40, основных – 200, средних – 100, кислых – 40, осадочных (глинах и сланцах) – 130. Естественное содержание в почвах 38–460 г/т.

Мировые общие запасы $V_2O_5$ (без стран СНГ) 48 млн. т, подтвержденные – 10. Значительны запасы в Забайкальском крае. Ежегодное мировое производство – более 28 тыс. тонн. Наиболее крупные производители – ЮАР, Китай, Австралия, Новая Зеландия.

### *9.5.3. Области использования.*

Структура потребления (%): сталеплавильная промышленность – 85; производство специальных сплавов – 10; химическая промышленность – 5.

### 9.5.4. Минеральный состав и типы руд.

Известно 129 минералов ванадия. Среди них преобладают ванадаты. Промышленное значение имеют десять минералов. Корвусит ($V^{4+}V^{5+}_6O_{17}\cdot 6H_2O$, 7,62–11,55% $VO_2$ и 50,68–73,56% $V_2O_5$, примеси $UO_3$ до 3,12% и $MoO_3$ до 3,12%), ванадинит ($Pb_5[VO_4]_3Cl$, 10,7% V, 19,3% $V_2O_5$), карнотит ($(K_2(U)_2)_2[VO_4]\cdot 3H_2O$, 11,3% V, 20,2 $V_2O_5$, 52,6% U, 63,4% $UO_2$), тюямунит ($Ca(UO_2)_2[VO_4]_2\cdot 8H_2O$, 19,1% $V_2O_5$, 60,0% $UO_2$), деклуазит ($PbZnVO_4OH$, примеси Cu, As), роскоэлит, или росколит, ванадиевый мусковит ($KV_2AlSi_3O_{16}(OH)_2$, до 15–17% $V_2O_3$, примеси Ba), патронит ($VS_4$, 28,4% V), моттрамит ($PbCuVO_4OH$, примеси Zn и As), ванадийсодержащий титаномагнетит ($Fe[Fe, Ti, V]_2O_4$, до 1,74% $V_2O_3$ и 0,98% $V_2O_5$, 6,98–27,77% $TiO_2$), или ванадомагнетит ($Fe[Fe,V,Ti]_2O_4$ до 8,80% $V_2O_5$ и 28,7 $TiO_2$), шодерит ($Al_2VO_4\cdot 8H_2O$).

Промышленные типы месторождений – магматический, метасоматический и осадочный. Наиболее крупные скопления ванадиевых руд характерны для магматического типа.

По запасам $V_2O_5$ (т) месторождения подразделяют на весьма крупные – миллионы, крупные – сотни тысяч, средние – десятки тысяч, мелкие – тысячи.

Промышленные руды – титаномагнетитовые, ильменит-титаномагнетитовые, магнетитовые, ильменит-магнетитовые, роскоэлитовые, шодерит-монтмориллонитовые, деклуазит-ванадинитовые, карнотитовые, геотехногенные (отвальные шламы, зольные остатки и др.).

Средние содержания ванадия в рудах разных типов в диапазоне 0,02–2,8%.

### 9.5.5. Добыча и переработка руд.

Разработку месторождений ванадийсодержащих руд производят преимущественно открытым способом.

Подготовку титаномагнетитовых руд (основного источника ванадийсодержащего сырья) к переделу производят обогащением с применением магнитной технологии. Извлечение ванадия из руд различных типов достигает 75% при содержании его в концентрате до 0,6%. К вредным примесям в концентрате отно-

сят титан. При обогащении руд комплексного состава получают железорудный, урановый, полиметаллический концентраты; бокситы, алуниты, битумные продукты. Извлечение основного сопутствующего элемента – железа составляет 70–80%. Концентрат перерабатывают на феррованадиевый электрометаллургическим способом.

Ванадийсодержащие феррованадиевые концентраты перерабатывают двойным металлургическим переплавом железных концентратов и гидрометаллургическим способом – шлаков. Гидрометаллургический концентрат содержит 97–98% $V_2O_5$. Вредные примеси в нем – FeO, MnO, $SiO_2$, $Cr_2O_3$, $P_2O_5$, сера, хлор, K+Na, мышьяк. Товарным продуктом является феррованадий с содержанием 35% ванадия. Вредные примеси в феррованадии – кремний, фосфор, сера, углерод, алюминий, мышьяк.

Таблица 9.2

**Основные группы ванадийсодержащих сталей**

| № пп. | Наименование групп марок стали | Номер ГОСТ |
|---|---|---|
| 1. | Стали (прокат) повышенной прочности для сварных, клепаных строительных и машиностроительных конструкций, для нефтегазопроводных труб, в т.ч. обсадных и бурильных | ГОСТ 19281-89<br>ГОСТ 27772-88 |
| 2. | Конструкционные стали | ГОСТ 4543-71 |
| 3. | Стали для железнодорожных рельсов, колес и бандажей | ГОСТ 24182-80<br>ГОСТ 10791-89<br>ГОСТ 398-96 |
| 4. | Инструментальные стали | ГОСТ 5950-73 |
| 5. | Стали теплоустойчивые | ГОСТ 20072-74 |
| 6. | Стали рессорно-пружинные | ГОСТ 14959-79 |
| 7. | Стали быстрорежущие | ГОСТ 19265-73 |
| 8. | Стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные | ГОСТ 19281-89 |
| 9. | Стали прецизионные | ГОСТ 10994-74 |

Сопутствующие элементы – железо, уран, медь, свинец и другие металлы, содержащиеся в концентратах, переходят в ванадийсодержащий концентрат, из которого извлекаются пирометаллургическим способом. К вредным примесям в окончательном продукте относится FeO.

Ванадий влияет на свойства сталей, в основном, за счет того, что он входит в них в составе карбонитридов. Карбонитриды – это смеси карбидов и нитридов ванадия (V(CN)). Дисперсные карбонитриды ванадия имеют размеры 4–5 нм. Равномерно распределяясь в объеме зерен стали, они тормозят движение дислокаций в них. Эти дислокации, проходя между частицами карбонитридов ванадия, изгибаются, образуют петли и накапливаются вокруг его частицы, и не двигаются дальше. Это и приводит к повышению предела текучести стали и придает им упругость и прочность. Основные группы марок ванадийсодержащих сталей даны в табл. 9.2. Многочисленные исследования свойств сталей показали, что упрочнение обеспечивают небольшие добавки ванадия, обычно не превышающие 0,2%. Они приводят к повышению прочности на 10–30% как в горячекатаном нормализованном состоянии, так и после закалки с отпуском (рис. 9.20). При этом доля собственно дисперсионного упрочнения в общем упрочнении составляет 15–25%, а доля зернограничного упрочнения – 30–0%. Более высокое содержание ванадия может привести к охрупчиванию стали.

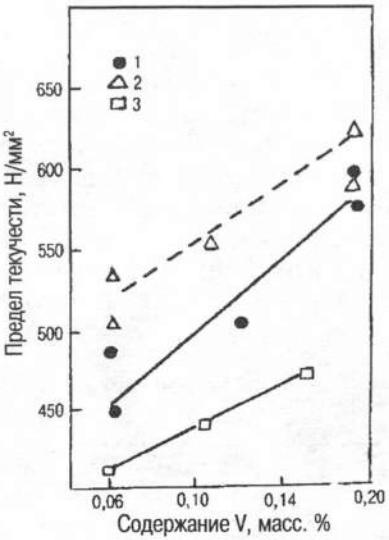



Рис. 9.20. Влияние содержания ванадия в стали на предел текучести сортового проката толщиной 30 мм, %:

| | C | N | Al |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,24 | 0,007 | 0,007 |
| 2 | 0,24 | 0,015 | 0,007 |
| 3 | 0,013 | 0,007 | 0,02 |

### *9.5.6. Месторождения ванадия в Забайкалье.*

С ванадийсодержащими титаномагнетитами связаны промышленные скопления ванадия в Забайкалье. Они сосредоточены в Чинейском железо-титан-ванадиевом месторождении, рассмотренном выше. Ванадий является одним из главных полезных компонентов титаномагнетитовых руд Чинейского месторождения. Главные рудные минералы – титаномагнетит и ильменит. Разведанные запасы железо-титано-ванадиевых руд участка Магнитный Чинейского месторождения

Таблица 9.3

**Состав руд Вершино-Ингамакитской части Чинейского месторождения**

| Номер рудного тела | Мощность | $Fe_{общ.}$ | $TiO_2$ | $V_2O_5$ | Cu | Ni | Co | Pt | Pd |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | % | | | | | | г/т | |
| 1 | 15,5 | 17,36 | 2,93 | 0,35 | 0,19 | 0,023 | 0,012 | 0,03 | 0,06 |
| 2 | 20,3 | 16,05 | 2,57 | 0,28 | 0,4 | 0,019 | 0,008 | 0,042 | 0,066 |
| 3 | 22,0 | 16,99 | 2,92 | 0,28 | 0,04 | 0,020 | 0,009 | 0,10 | 0,286 |
| 4 | 12,4 | 17,21 | 2,57 | 0,26 | 0,15 | 0,026 | 0,010 | 0,152 | 0,191 |
| 5 | 13,2 | 17,43 | 2,97 | 0,32 | 0,05 | 0,022 | 0,009 | 0,076 | 0,172 |
| 6 | 49,2 | 19,68 | 3,95 | 0,30 | 0,07 | 0,014 | 0,011 | 0,016 | 0,008 |
| 7 | 24,0 | 16,25 | 2,91 | 0,26 | 0,04 | 0,011 | 0,007 | 0,030 | 0,046 |
| 8 | 91,1 | 19,27 | 3,86 | 0,37 | 0,05 | 0,013 | 0,008 | 0,063 | 0,064 |
| 9 | 93,4 | 18,82 | 3,44 | 0,34 | 0,08 | 0,014 | 0,009 | 0,080 | 0,010 |
| 9а | 14,4 | 22,24 | 4,36 | 0,40 | 0,12 | 0,013 | 0,009 | 0,079 | – |
| 9б | 16,4 | 17,16 | 2,91 | 0,31 | 0,08 | 0,011 | 0,007 | 0,065 | 0,008 |
| 10 | 5,5 | 30,84 | 6,95 | 0,57 | 0,75 | 0,008 | 0,011 | – | 0,003 |
| 11 | 6,9 | 16,45 | 2,62 | 0,22 | 0,13 | 0,006 | 0,010 | 0,024 | 0,017 |
| 12 | 12,2 | 18,01 | 3,23 | 0,26 | 0,09 | 0,012 | 0,009 | 0,017 | – |
| 13а | 17,6 | 19,88 | 4,13 | 0,35 | 0,07 | 0,022 | 0,010 | 0,030 | 0,057 |
| 13б | 64,0 | 23,87 | 4,69 | 0,48 | 0,10 | 0,016 | 0,012 | 0,010 | 0,010 |
| 14 | 12,0 | 21,70 | 3,59 | 0,25 | 0,18 | 0,035 | 0,012 | 0,026 | 0,006 |

(рис. 9.21) составляют 783 млн. т. Запасы пятиокиси ванадия в них – 4,07 млн. т при среднем содержании ее 0,52%, железа – 255 млн. т (среднее содержание 32,63% и двуокиси титана – 59,9 млн. т (среднее содержание 7,3%). Это позволяет оценить разведанную часть участка Магнитный как весьма крупное месторождение ванадия. Около 75% запасов можно отработать открытым способом при предельном коэффициенте вскрыши 7 т/т, при среднем – около 3,8 т/т. Производительность карьера в 6 млн. т руды в год обеспечит производство 2 млн. т железа, 404 тыс. т двуокиси титана и 32,4 тыс. т пятиокиси ванадия, что превышает ежегодное мировое производство (28 тыс. т). Другие части Чинейского месторождения также содержат промышленные концентрации ванадия. В качестве примера в табл. 9.3 приведены данные о концентрациях рудных элементов в титаномагнетитовых рудах Вершино-Ингамакитской части месторождения. Перспективы открытия новых месторождений ванадия в Забайкальском крае также связаны с массивами основных горных пород.

## Контрольные вопросы

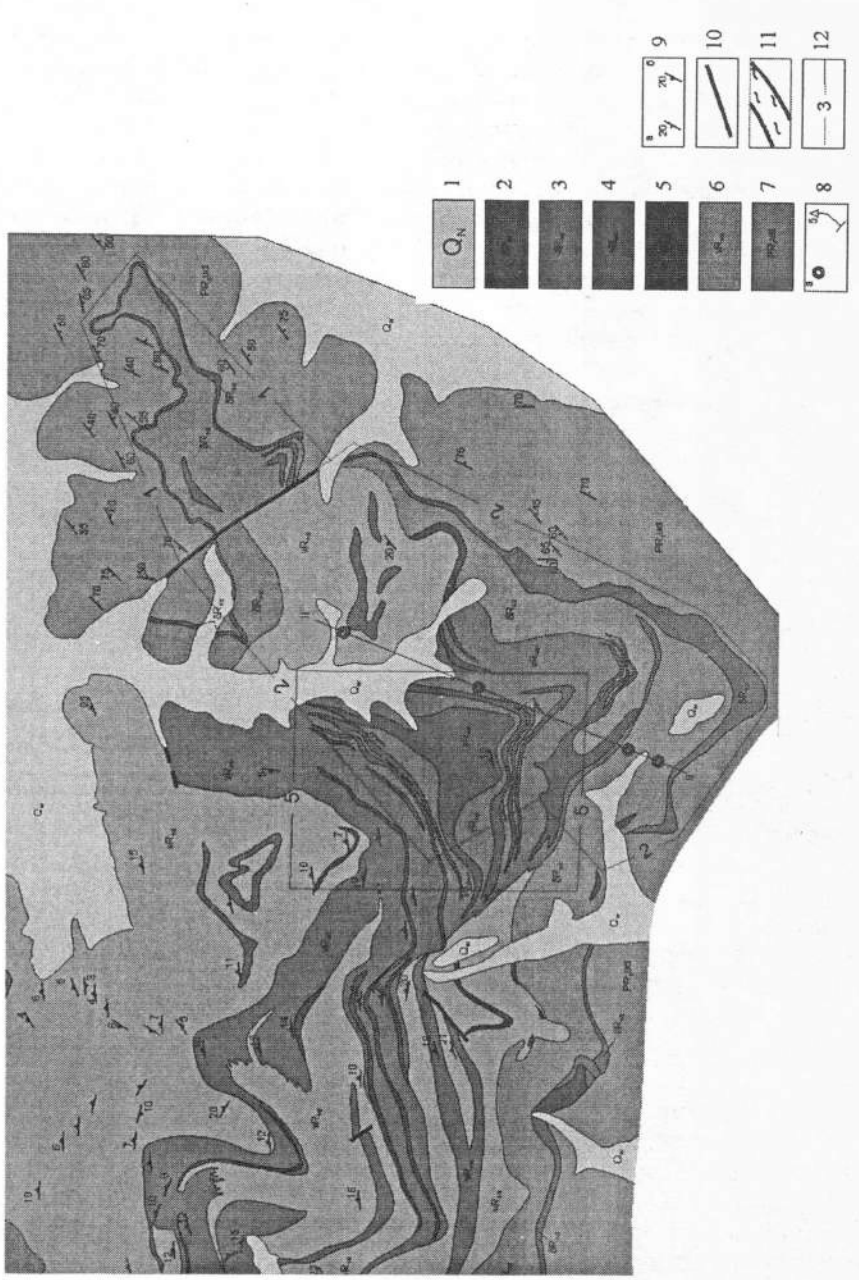
1. Назовите основные химические, физические и экологические свойства ванадия.
2. Назовите промышленные типы месторождений ванадия.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд ванадия в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают ванадий?
5. Назовите месторождения и типы руд ванадия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется ванадий?

## Литература

### Основная

Борисенко Л.Ф. Ванадий (минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений). – М.: Недра, 1973.

Борисенко Л.Ф. Основные направления повышения комплексного использования железных руд / Рудная геохимия и геология магматогенных месторождений. – М.: Наука, 1980.


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

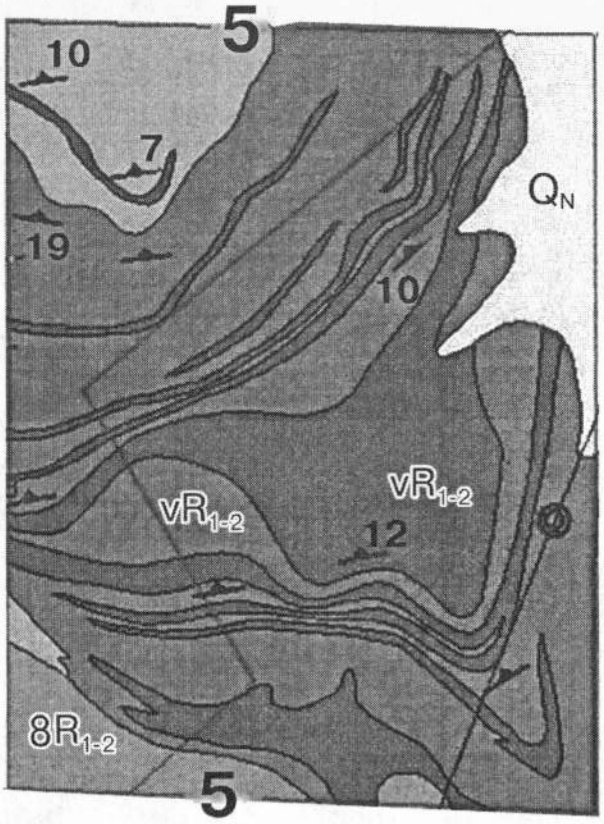



Рис. 9.21. Геологическая карта участка Магнитный Чинейского месторождения. По: [Минерально-сырьевая..., 2003].

*1 – четвертичные аллювиальные и ледниковые отложения: валуны, галька, пески, суглинки; 2 – контактовая серия: диориты, габбро-диориты, габбро-нориты, медно-сульфидные руды; 3 – краевая серия: диориты, габбро-диориты, габбро-нориты; 4 – железистая серия: нориты, габбро, габбро-нориты расслоенные, титано-магнетитовые руды; 5 – титано-магнетитовые рудные тела; 6 – надрудная серия: лейкократовые габбро, габбро-нориты, габбро-диориты, диориты расслоенные; 7 – вмещающие породы удоканского комплекса: сланцы, метапесчаники, метаалевролиты; 8 – скважины; а – на карте, б – на разрезах; 9 – элементы залегания: а – слоистости и контактов пород, б – расслоенности магматических пород; 10 – разломы; 11 – мощные региональные разломы с широкими зонами дробления; 12 – границы участков месторождения и их номер согласно списку.*

*Участки месторождения: 1 – Рудный; 2 – Верхнечинейский; 3 – Сквозной; 4 – Контактовый; 5 – Магнитный; 6 – Этырко.*

Борисенко Л.Ф. Руды ванадия. – М.: Наука, 1983.

Борисенко Л.Ф., Слотвинский-Сидак Н.П. Минерально-сырьевые ресурсы ванадия и способы получения его соединений. – М.: ВИЭМС, 1991.

Борисенко Л.Ф., Слотвинский-Сидак Н.П., Поликашина Н.С. Минеральное сырье. Ванадий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Ванадий в черной металлургии / Н.П. Лякишев, Н.П. Слотвинский-Сидак, Ю.Л. Плинер и др. – М.: Металлургия, 1983.

Дерябин Ю.А., Смирнов Л.А., Дерябин А.А. Перспективы переработки Чинейских титаномагнетитов. – Екатеринбург: Средне-Уральское книжное издательство, 1999.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

**Дополнительная**

Производство и использование ванадиевых шлаков / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябик, А.А. Филиппенко и др. – М.: Металлургия, 1985.

Резниченко В.А., Шабалин Л.И. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология. – М.: Наука, 1986.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. III / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Холодов В.Н. Осадочный рудогенез и металлургия ванадия. – М.: Наука, 1973.

## 9.6. Рений.

### *9.6.1. Свойства.*

Рений (Re, VII, 75), металл, серебристый; проявляет амфотерные свойства, халько- и сидерофильный, устойчивые валентности $4^+$ и $7^+$.

Плотность 21020 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 1320–2000 МПа; температуры плавления 3180° С, кипения – 5627; теплопроводность 47,9 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $19{,}3\cdot10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $4{,}56\cdot10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $6{,}63\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$. Устойчив к коррозии: не корродирует в HCl и HF любых концентраций на холоде и при нагревании до 100° С. В $HNO_3$, горячей концентрированной $H_2SO_4$, в перекиси водорода металл растворяется с образованием рениевой кислоты. Растворяется в щелочах.

ПДК рения не нормируют за исключением $ПДК_{р.з}$, составляющие 4 мг/м$^3$.

### *9.6.2. Распространенность и запасы.*

Кларк земной коры 0,0007 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): основных – 0,00071, кислых – 0,00067.

Мировые извлекаемые запасы рения более 10 тыс. т, годовое производство составляет 30–35 т. Наиболее крупные производители – Казахстан, США. Россия, в связи с распадом СССР, утратила важнейшие действующие источники рения, одним из которых является Джезказганское месторождение, отошедшее вместе с Казахстаном. В России возможными источниками рения являются медистые песчаники Удокана и месторождения молибдена.

### *9.6.3. Области использования.*

Рений применяют в качестве эффективных катализаторов в нефтехимическом производстве (крекинг-процессе). Рений, как тугоплавкий металл, применяют в производстве электронных приборов. Сплавы Re с W используют в электронике, для изготовления термопар, успешно работающих для измерения температур до 2500° С, электроконтактов и деталей точных приборов. Сплавы Re с W, Mo, Ta обладают исключительной электропрочностью и применяются в авиакосмической технике.

### *9.6.4. Минералы и типы месторождений.*

Известны четыре минерала рения: джезказганит ($Cu(Re,Mo)S_4$, содержание рения до 55%), моносульфид и оксид рения, самородный рений. Промышленное значение имеют молибденит – главный минерал-концентратор и основной источник его получения, а также борнит, в качестве включений в котором в рудах Джезказганского месторождения присутствует джезказганит. Рений не образует собственных месторождений, а находится в месторождениях других видов сырья.

Промышленные типы ренийсодержащих месторождений: эндогенных – медно-молибденовый порфировый и медный стратиформный; экзогенных – молибден-урановый. Наибольшее значение имеют первые два типа.

Промышленные руды – концентраты с содержанием рения (г/т): молибденовый – 100, медный – 1,5–2,5, свинцовый – 3,5–5,5.

### *9.6.5. Добыча и переработка руд.*

Рений получают из молибденитовых (0,01–0,04% Re) и медных (Re 0,002–0,003%) концентратов. Подготовку руд к переделу производят по технологии обогащения основных типов ренийсодержащих руд. При окислительном обжиге

молибденитовых или медно-сульфидных концентратов рений уходит с печными газами в виде $Re_2O_7$, температура кипения которого 360° С. Семиокись рения концентрируется в продуктах (шламах и растворах) в пылеуловительных системах. Ренийсодержащие концентраты и металлургические пыли перерабатывают гидрометаллургическим способом. Первичный рениевый технологический концентрат – это раствор с содержанием рения в сотни граммов на кубический метр. Для этого применяют выщелачивание слабой серной кислотой с добавкой в качестве окислителя минерала пиролюзита. Если печные газы, содержащие $Re_2O_7$, направляются в производство серной кислоты, рений концентрируется в промывной кислоте электрофильтров. В случае применения технологии с использованием улавливания рения в шламах и растворах в пылеуловительных системах также получают концентрат его в виде растворов. Из ренийсодержащих растворов рений извлекают сорбцией или экстракцией. Конечным продуктом гидрометаллургического передела является перренат аммония $NH_4ReO_4$. Его восстанавливают до получения порошка рения, который затем превращают методом порошковой металлургии в компактные заготовки металлического рения. Используют также переплавку рения в электронно-лучевых печах. Извлечение рения из руд различных типов составляет 40–60% при содержании его в концентрате до 2 кг/т.

Товарный продукт содержит рений (%): аммоний рениево-кислый – 69, оксид (VII) рения – 69, металлургический рений – 99,9.

Вредные примеси в рениевой продукции: алюминий, железо, калий, кальций, кремний, магний, марганец, медь, молибден, натрий, никель, фосфор, сера, вольфрам.

### *9.6.6. Источники рения в Забайкалье.*

Выше указывалось, что главными источниками рения являются медистые песчаники и медно-молибден-порфировые руды. К первым относятся руды Удоканского месторождения, в которых рений концентрируется в халькопирите и борните.

Содержание рения в борнит-халькозиновых рудах около 0,1 г/т, изредка – чуть более 1–2 г/т. Низкие содержания рения в рудах Удоканского месторождения связаны с его метаморфическими преобразованиями в условиях биотитовой субфации фации зеленых сланцев. Частью это связано также с выносом рения в процессе формирования зоны окисления. Собственного минерала рения в них не установлено. При обогащении сульфидных руд он переходит в сульфидные концентраты, содержащие 1–2,1 г/т рения. Извлечение его возможно в процессе их переработки.

В рудах Жирекенского медно-молибденового месторождения рений концентрируется в молибдените. Среднее содержание его в этом минерале 82 г/т. По данным В.В. Иванова и др. [1969], в молибденитах этого месторождения среднее содержание рения составляет 63 г/т (табл. 9.4), а с учетом этих и других данных среднее по молибдениту Жирекенского месторождения составляет 70 г/т. Рений концентрируется в молибденовом концентрате. При содержании молибдена в концентрате до 50% содержание рения в нем составит около 40 г/т.

Ренieносность комплексных руд Бугдаинского месторождения изучена, но не полно. Тем не менее, содержание рения в молибденитовом концентрате 8,09–12,5 г/т [Вещественный.., 2001]. Согласно технологии кучного выщелачивания смешанных и сульфидных забалансовых руд, извлечение рения в продуктивные растворы при перколяционном выщелачивании достигает 81%. При использовании колонно-чанового выщелачивания продолжительность процесса уменьшается в 4–5 раз, а извлечение рения составляет 95–98%. Все это указывает на возможность получения рения в существенных количествах. В результате доразведки месторождения силами Казаковского ГГП в 1990–1997 гг. подсчитаны прогнозные ресурсы рения в количестве 6,36 тонны. Но при рассмотрении запасов по этому месторождению рений не включен в число попутных компонентов, извлечение которого экономически целесообразно.

В молибденитах месторождений молибденит-кварцевой формации, частью переходной к золото-кварцево-сульфидной,

Таблица 9.4

**Содержание рения в молибденитах месторождений молибденит-кварцевой, переходных к золото-кварцево-сульфидной и грейзеновой вольфрамовой формаций (Геохимия..., 1964, Иванов и др.,1969) с добавлениями автора**

| Месторождение | Re, г/т | | Исследователь |
|---|---|---|---|
| | размах | среднее | |
| Гутайское | 63–86 | 74 | С.М. Баситова |
| Давендинское | 15–170 | 84 | Ю.А. Казаченко, Д.Е. Морачевский, Н.А. Хрущов и др. |
| Шахтаминское | 15–80 | 44 | И.И.Егорова, Л.Н.Московская |
| Амуджиканское | 40–170 | 105 | Ю.А. Казаченко, Д.Е. Морачевский, Н.А. Хрущов |
| Больше-Кудеченское | 70 | | -«- |
| Аманан-Макитское | 38–70 | 47 | Д.Е. Морачевский, Н.А. Хрущов, С.М. Баситова |
| Студенческое (Петровское) | 180 | | То же |
| Студенческое (Улекчинское) | 110–280 | 195 | То же |
| Костромихинское | 65–110 | 85 | Д.Е. Морачевский |
| Ключевское | 46,8–105 | 76 | Ю.А. Казаченко, Д.Е. Морачевский |
| Белухинское | 6 | | Д.Е. Морачевский |
| Букукинское | 3–70 | 37 | В.Н. Горохова |
| Бугдаинское | 0,5–80 | 21 | А.К. Сахнов, И.С. Васильев |
| Кудикан | 18 | | Н.А. Хрущов и др. |
| Сырыгичинское | 33–280 | 106 | Д.Е. Морачевский, Н.А. Хрущов и др. |
| Жирекенское | 17–122 | 70 | В.И. Сотников и др. |

содержание рения находится в пределах 0,0015–0,0280% (см. табл. 9.4).

Предполагается, что существенный вклад в запасы и ресурсы рения должно внести при дальнейшем его исследовании Орекитканское месторождение молибденовых руд в Республике Бурятия. Однако принадлежность его к грейзеновой формации снижает эту вероятность.

Таким образом, наиболее важными источниками рения в Забайкалье являются комплексные медно-молибденовые руды Жирекенского месторождения. При освоении собственно молибденовых месторождений в случае достаточного объема рудной массы важными источниками рения могут стать Сыргичинское и, возможно, Амуджиканское, Аманан-Макитское и другие. Основное внимание следует обратить на возможную рениеносность меднопорфировых месторождений – Быстринского, Култуминского и других рудных районов.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства рения?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд рения.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд рения в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают рений?
5. Назовите месторождения и типы руд рения в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется рений?

## Литература

### Основная

Иванов В.В., Поплавко Е.М., Горохова В.И. Геохимия рения. – М.: Наука, 1969.

Иванов В.В., Поплавко Е.М. Рений в месторождениях

цветных металлов и горных ископаемых / Комплексные месторождения халькофильных редких элементов. – М.: Наука, 1982.

Иванов В.В., Поплавко Е.М., Малевский А.Ю. Минеральное сырье. Рений / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Химия, технология и аналитический контроль рения. – М., 1990.

**Дополнительная**

Бойцов В.Е., Пилепенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Учебное пособие. – М.: НИА – Природа, 1999.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Месторождения Забайкалья / Подред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

## 9.7. Таллий.

### *9.7.1. Свойства.*

Таллий (Tl, III, 81), металл, серебристо-серый, на воздухе быстро тускнеет, мягкий; проявляет щелочные свойства, лито- и халькофильный, валентности $1^+$ и $3^+$. Открыт в 1861 г. У. Круксом.

Плотность 11850 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 25–44,7 МПа; температуры плавления 303,6° С, кипения – 1457; теплопроводность 46,1 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление при 0°С $18{,}0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость – $3{,}13 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $28 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Таллий – высокотоксичный элемент (I класс опасности). ПДК$_{р.з}$ – 0,01 мг/м$^3$, ПДК$_{с.с}$ – 0,0004 мг/м$^3$; ПДК$_в$ – 0,0001 мг/дм$^3$.

### *9.7.2. Распространенность и запасы.*

Кларк таллия земной коры 1,0 г/т. Средние содержания его в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,01, основных – 0,2, средних – 0,5, кислых – 1,5, осадочных (глинах и сланцах) – 1,0. Естественное содержание в почвах (%): 0,1–0,6 г/т, в морской воде – 0,000n, организмах животных – 0,4.

Мировые подтвержденные запасы таллия в цинковых рудах (без стран СНГ) составляют 644 т, извлекаемые – 377. В России запасы таллия превышают мировые. Годовое производство составляет 15–16 т. Наиболее крупными производителями являются Канада, Мексика, Австралия, Япония,

Бельгия. В странах СНГ таллий производится в Казахстане. Производство таллия снижается вследствие токсичности самого металла и его соединений. Тем не менее, с 1985 г. мировое потребление таллия не изменилось и в 1998 г. составляло около 12 тонн.

### *9.7.3. Области использования.*

В технике применяется в виде различных химических соединений. Главной областью его применения является электроника, где он в виде оксисульфида таллия («таллофид») используется в полупроводниках. В США для этих целей используется до 70% таллия. Селениды, сульфиды, теллуриды таллия также являются компонентами полупроводниковых материалов для фотосопротивлений полупроводниковых выпрямителей, видиконов.

Монокристаллы твердых растворов TlBr–TlI и TlCl–TlBr (больше известны как КРС–5, КРС–6) используются для изготовления деталей в приборах и аппаратуре, работающих в инфракрасной области излучений. Кристаллы TlCl и TlCl–TlBr используются в радиаторах счетчиков свечения Черенкова. Затвердевающая при −59°С амальгама таллия применяется в низкотемпературных термометрах. Металлический таллий используют для получения подшипниковых и легкоплавких сплавов, а также в кислородомерах для определения кислорода в воде. Радиоактивный изотоп $^{204}Tl$ применяется в радиоизотопных приборах. Раствор в виде смеси муравьиново- и малоновокислого таллия (жидкость Клеричи) используется для разделения тяжелых (более 2,9 г/см$^3$) минералов по плотности в минералогическом анализе и выделении их монофракций.

Около 10% производимого таллия используется в фармацевтической промышленности. Он используется в производстве красителей, в электролизе меди, в производстве серной кислоты в качестве катализатора, в некоторых сплавах для повышения их устойчивости к коррозии. Таллийсодержащие сверхпроводники имеют относительно высокую стабильность, стойкость к

воздействию магнитных полей, высокие критические температуры (до 125 К). Они энергетически высокоэффективны.

Сплавы таллия с йодистым цезием в последние годы нашли применение в ядерной физике, детекторах для телескопов, усилителей для химических лазеров.

Структура потребления (%): в производстве полупроводников – 70, в фармацевтической промышленности – 10; в сплавах, при изготовлении стекла, красителей, подшипников и в других областях – 20.

### *9.7.4. Минералы и промышленные типы руд.*

Известно 7 минералов таллия. Среди них преобладают халькогениды. Из собственных минералов таллия, которые могут иметь промышленное значение, отметим круксит (Cu, Tl, Ag)$_2$Se или $TlCu_7Se_4$. Он содержит 44,2% меди, 1,4–5,1% серебра, 16,3–18,5% таллия и 30,9–33,3% селена. Присутствует в некоторых месторождениях с другими селенидами. Кроме того, в случае ощутимых скоплений могут вносить вклад в содержания таллия в рудах лорандит ($TlAsS_2$, 58,75–59,76% Tl), врбаит (Tl(As,Sb)$_3$S$_5$, 29,52% Tl), хатчинсонит $Tl(PbAs_4S_9)$, 18–25% Tl, содержит также до 8,88% Ag), авиценнит ($Tl_2O_3$), 79,52% Tl).

Таллий в качестве примесей до первых десятых процента присутствует в гетитах, развивающихся по ярозитам и плюмбоярозитам олово-полиметаллических и серебро-полиметаллических руд. До 0,4% таллия концентрируется в некоторых псиломеланах, развивающихся по галенит-сфалеритовым рудам. В манганите из Джезды (Казахстан) определено 0,0038% таллия [Минералы, 1967], в гранате из пегматита в Саянах установлено 4 г/т таллия [Минералы, 1972]. До 0,11% Tl обнаружено в оливине из кимберлитов Якутии [Минералы, 1972]. В астрофиллите из нефелиновых сиенитов Хибин найдено до 0,006% таллия [Минералы, 1972].

Промышленное значение имеют минералы-концентраторы таллия: галенит, сфалерит, дисульфиды железа с содержанием таллия до 150–200 г/т (табл. 9.5).

Таблица 9.5

**Основные минералы-концентраторы таллия**
(по: [Минералогия редких..., 1964])

| Минералы | Максимально установленное содержание таллия, % | Наиболее обычное содержание таллия, % | Парагенезис таллия в минерале |
|---|---|---|---|
| Силикаты | | | |
| Мусковит | 0,05 | 0,001 | K, Rb, Cs |
| Лепидолит | 0,15 | 0,015 | То же |
| Биотит | 0,01-0,05 | 0,001 | « « |
| Циннвальдит | 0,01 | 0,005 | « « |
| Ортоклаз | 0,005 | 0,0005–0,001 | « « |
| Микроклин | 0,01 | 0,001–0,005 | « « |
| Амазонит | 0,03 | 0,005–0,08 | « « |
| Поллуцит | 0,1 | 0,01 | « « |
| Окислы | | | |
| Пенломелан-вад | 0,03 | 0,0005–0,001 | Mn(Pb) |
| Пиролюзит | 0,01 | 0,001 | То же |
| Манганит | 0,005 | 0,0005 | « « |
| Карбонаты | | | |
| Родохрозит | 0,01 | 0,0005–0,001 | « « |
| Сульфиды | | | |
| Галенит | 0,3 | 0,001–0,005 | Pb, Bi, Sb |
| Сфалерит | 0,1 и выше | 0,0001–0,001 | Zn, Pb, As, Sb |
| Пирит | 0,45 | 0,0001–0,0005 | Fe, Pb, As, Sb |
| Марказит | 0,532 | 0,005 | |
| Мельниковит | 0,50 | ? | ? |
| Халькопирит | 0,005 | 0,0001–0,0005 | Fe, Cu, As, Sb, Zn |
| Пирротин | 0,002 | 0,0001–0,001 | Fe, As, Sg, Pb |

Таллий не образует собственных месторождений, а находится в месторождениях других видов полезных ископаемых. Промышленные типы таллийсодержащих месторождений – стратиформный (в карбонатных и терригенно-карбонатных породах), вулканогенно-осадочный (в метаморфических, вулканогенных и терригенных толщах), метасоматический (в известняках и скарнах).

По запасам таллия (т) месторождения подразделяют на весьма крупные – более 2500, крупные – 2500–500, средние – 500–50, мелкие – менее 50. Промышленные таллийсодержащие руды – свинцово-цинковые, медные и медно-колчеданные, серно-колчеданные.

### *9.7.5. Способы добычи и переработки руд.*

Подготовку руд к переделу производят по технологиям обогащения основных типов таллийсодержащих руд, прежде всего сульфидных руд и руд цветных металлов и железа. Извлечение таллия из руд различных типов составляет 5–90% при содержании его в концентрате 4–25 г/т. В металлургическом производстве таллий концентрируется в пылях обжига, плавки, возгонки в виде $Tl_2$ и TlCl. Пыли перерабатывают гидро- и электрометаллургическими способами. Одним из распространенных методов является выщелачивание таллия из пылей крепкой серной кислотой, в результате чего в раствор переходит до 80–85% таллия. Раствор очищают и осаждают таллийсернистым натрием. В результате получают обогащенный таллием продукт, пригодный для последующей переработки и получения товарного продукта. Он должен содержать 99,9–99,9999% таллия. Для извлечения таллия из пылей свинцового производства сначала сульфатизируют их в кипящем слое при 300–350° С. Затем сульфидную массу выщелачивают водой и из этого раствора экстрагируют таллий 50% -ным раствором трибутил фосфата в йодированном керосине. После этого реэкстрагируют серной кислотой (300 г/л) с добавкой 3% -ной $H_2O_2$. Из реэкстрактов таллий выделяют цементацией на цинковых листах. Затем его переплавляют под слоем NaOH и получают

таллий чистотой 99,99%. Более глубокую очистку металла проводят электролитическим рафинированием и кристаллизационной очисткой.

Вредные примеси в таллии – Pb, Cd, Cu, Zn, Fe.

### *9.7.6. Источники таллия в Забайкалье.*

Промышленные попутные концентрации таллия выявлены в полиметаллических месторождениях. Запасы были учтены в рудах Воздвиженского, Михайловского, Спасского, Ново-Широкинского (табл. 9.6) и других месторождений, где он связан с галенитом. Содержание таллия варьирует в пределах 3–27 г/т, иногда до 55 г/т.

Таблица 9.6

**Запасы таллия в рудах некоторых месторождений Забайкалья**

| Месторождения | Содержание, г/т | Запасы, т |
|---|---|---|
| Воздвиженское | 27 | 58,2 |
| Михайловское | 19 | 2,014 |
| Спасское | 3 | 15,5 |
| Ново-Широкинское | | 28,1 |
| Всего: | | 103,814 |

Таллий из полиметаллических руд эффективно извлекается в свинцовый концентрат с содержанием 10–210 г/т при извлечении до 70–80%. Общие запасы – 103,814 тонны.

М.М. Озерова установила (1980 г.), что в рудах глубоких горизонтов (+630 м) Ключевского месторождения золота содержится до 0,0005% таллия при общем возрастании доли сульфидов с 5,6 до 11,54%, а золота и серебра, соответственно, с 1,6 до 2,24 г/т и 1,4 до 4,4 г/т.

По данным ВНИИЦветмета, таллий в концентрациях 0,001–0,003% присутствует в рудах Шерловогорского месторождения (Г.А. Мельников, 1960 г.). Основная масса его находится в сфалеритах поздних генераций. При содержании

10 г/т оценка запасов таллия этого месторождения только по полиметаллическим рудам составляла 258,41 т. С учетом того, что отработано около 60% руд, остаточные запасы таллия этого месторождения можно оценить в 104 т. Таким образом, общие запасы таллия в Забайкалье оцениваются в 207 тонн.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства таллия?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд таллия, редких и редкоземельных элементов.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд таллия в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают таллий?
5. Назовите месторождения и типы руд таллия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется таллий?

## Литература

### Основная

Иванов В.В., Видякин Н.С. Минеральное сырье. Таллий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Каленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Комплексные месторождения халькофильных редких элементов / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Э.Ф. Минцер и др. – М.: Недра, 1982.

Межуева Г.С., Егорова М.Н., Роговой В.М. Об учете и оценке попутных редких элементов в горно-металлургических и геологоразведочных работах. – М.: ИМГРЭ, 1990.

Минерально-сырьевая база редких элементов СНГ и зарубежных стран / Под ред. В.М. Рогового. – М.: ИМГРЭ, 1992.

Разведка и оценка комплексных месторождений цветных металлов / А.М. Севица, В.В. Иванов, В.Н. Иванов и др. – М.: Недра, 1990.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

**Дополнительная**

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Чумаченко Н.М., Полетаев В.В., Свирский М.А. и Кривокобыльский А.С. Важнейшие геологоструктурные особенности рудных полей свинцово-цинковых месторождений Приаргунья / Рудные месторождения Забайкалья и методы их поисков. – Записки Заб. филиала Геогр. общ-ва СССР. – Вып. XCIII. – 1973. – С.12–41.

Кузнецов К.Ф., Мейтув Г.М. Геохимия редких элементов в свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья. – М.: Наука, 1967.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 2., Кн. 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

## 9.8. Галлий.

### *9.8.1. Свойства.*

Галлий (Ga, III, 31), металл, серебристо-белый, мягкий; проявляет амфотерные свойства, лито-, сидеро-, халькофильный, устойчивая валентность $3^+$. На воздухе при обычной температуре стоек. Выше 260° С в сухом кислороде медленно окисляется. Предсказан в 1870 г. Д.И. Менделеевым (экалюминий), открыт в 1875 г. П.Э. Лекоком де Буабодраном.

Плотность твердого металла 5904 кг/м$^3$, жидкого при 29,8° С – 6095, т.е. при затвердевании объем увеличивается; твердость по Бринеллю 56,8–68,7 МПа; температуры плавления 29,8° С, кипения – 2403; теплопроводность 40,6 Вт/(м·К); удельная теплоемкость твердого галлия 376,7 дж/кг·К – в интервале 0–24° С, жидкого – 410 дж/кг·К; удельное электрическое сопротивление жидкого галлия $27 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, твердого – $53{,}4 \cdot 10^{-8}$; удельная магнитная восприимчивость – $3{,}9 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $11{,}5 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Сечение захвата тепловых нейтронов 2,71 барна ($2{,}7 \cdot 10^{-28}$ м$^2$).

Галлий – токсичный элемент (III класс опасности). ПДК$_{р.з}$ GaAs – 2,0 мг/м$^3$, $Ga_2O_3$ – 3,0.

### *9.8.2. Распространенность и запасы.*

Кларк галлия земной коры 19 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 2,0, основных – 18, средних – 20, кислых – 20, осадочных (глинах и сланцах) – 30, щелочных – 40, метаморфических – 20. Естественное содержание в почвах 10–50 г/т.

Мировые запасы галлия (без стран СНГ) 165 тыс. т, годовое производство составляет 60 т. Наиболее крупные производители – США, Намибия, Заир, Индия.

### *9.8.3. Области использования.*

Соединения галлия, такие как GaAs, GaP, GaSb, являются эффективными полупроводниками. Галлий и его производные обладают фотоэффектом в запирающемся слое, в инфракрасной области. Поэтому они применяются в электронике, волоконной и инфракрасной оптике, высокочастотной технике. Арсенид галлия занимает в производстве полупроводников третье место после элементарных кристаллических кремния и германия. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия обладают быстродействием, в 10 раз превосходящем кремниевые. Они обладают высокой радиационной стойкостью в сочетании со способностью сохранять хорошие рабочие характеристики в широком диапазоне температур – от отрицательных до +1000° С. Полупроводники на основе галлия используются в оптоэлектронных приборах – лазерах, светодиодах, в СВЧ-технике (микроволновые диоды и быстродействующие транзисторы), в сверхбольших и сверхскоростных интегральных схемах, приборах солнечной энергетики, в частности, в высокоэффективных каскадных солнечных батареях. Кристаллы GaAs используются в инфракрасной оптике. Арсенид галлия внедряется в оборонную промышленность, входя в конструкции приборов нового поколения средств электронного противодействия, радиолокационных станций, систем связи, боеприпасов точного наведения. Светодиоды и полевые транзисторы в интегральных схемах на основе GaAs в средствах связи военного назначения считаются незаменимыми. Он используется в инжекционных лазерах, оптических фильтрах и модуляторах лазерного излучения.

Низкая температура плавления галлия сделала его привлекательным материалом для использования в качестве теплоносителя в энергетических ядерных реакторах, производстве легкоплавких сплавов для изготовления терморегуляторов, термометров, гидравлических затворов, хлоридных припоев.

### *9.8.4. Минералы и типы руд.*

Известно четыре минерала галлия. Среди них преобладают сульфиды. Промышленное значение имеют галлийсодержащие минералы: зёнгеит ($Ga(OH)_3$, 66,8–77,63% $Ga_2O_3$), галлит ($CuGaS_2$, 35,32% Ga), сфалерит, халькопирит, бёмит, гидраргиллит, гиббсит, диаспор, нефелин, содалит, ярозит, алунит, касситерит и др.

Средние содержания галлия (табл. 9.7) в сфалерите месторождений Забайкалья находятся в пределах 0,9–100 г/т. Максимальные значения присущи сфалеритам полиметаллических месторождений или сульфидно-касситеритовых месторождений олова (Хапчерангинское, Шерловогорское) и молибдена с четко проявленной галенит-сфалеритовой стадией минерализации. Содержания галлия в других промышленно важных минералах достигают (г/т): в халькопирите – до n·100, нефелине – до 1000, содалите ($Na_8[AlSiO_4]_6Cl_2$) – до 700, алуните $[(K,Na)Al_3(SO_4)(OH)_6$ – до 56 при среднем 17, касситерите – до 36, в гидраргиллите – до 0,022%, бёмите – 0,005–0,0086%, сподумене – 0,08% $Ga_2O_3$, берилле – 0,00n%, ганите ($ZnAl_2O_4$, до 0,03% Ga), гиббсите ($Al(OH)_3$, до 0,01% $Ga_2O_3$, диаспоре (AlOOH) до 0,01% Ga, магнетите ($FeFe_2O_4$, до 0,01% Ga). Среднее содержание галлия в бокситах – 0,001–0,005%.

По данным К.Ф. Кузнецова [Геохимия..., 1964], галлий концентрируется не только в сфалерите, но и в других сульфидах, если эти месторождения локализованы в карбонатных породах (до 0,01%), а также рассеивается в хлорите, турмалине, аксините и других силикатах и алюмоборосиликатах, если рудные тела локализованы в силикатных или карбонатно-сланцевых породах.

В зоне окисления полиметаллических месторождений, по данным М.Ф. Куликовой, галлием обогащены свинцовые (биндгеймит, бедантит, 2–50 г/т) и железо-марганцевые (10–100 г/т) охры.

Галлий не образует собственных месторождений, а находится в рудах других видов минерального сырья.

Промышленные типы галлийсодержащих месторождений – осадочный (бокситы), магматический (нефелинсодер-

Таблица 9.7

**Содержание галлия в главных рудообразующих сульфидах полиметаллических месторождений Забайкалья**
(составлена с использованием данных Н.М. Чумаченко и др. [1973])

| Месторождение | Минерал | Содержание, Ga, г/т |
|---|---|---|
| Савинское № 5, Почекуевское | Пирит | 10 |
| | Арсенопирит | 10 |
| | Пирротин | 17 |
| | Сфалерит | 17 |
| | Галенит | 2 |
| Кличкинское, Мыльниково-Хоркиринское | Пирит | 5 |
| | Арсенопирит | 10 |
| | Сфалерит | 4 |
| | Галенит | н. д. |
| Кадаинское, Северо-Акатуевское | Пирит | 9 |
| | Арсенопирит | 7 |
| | Сфалерит | 7,4 |
| | Галенит | н.д. |
| Благодатское, Екатерино-Благодатское, Воздвиженское, Михайловское | Пирит | 16 |
| | Арсенопирит | 10 |
| | Сфалерит | 25 |
| | Галенит | 15 |

жащие породы и руды), гидротермальный (цинково-свинцово-медные и олово-полиметаллические руды). Промышленные галлийсодержащие руды – бокситы, нефелинсодержащие руды и породы, свинцово-цинковые, колчеданно-полиметаллические, редкометалльно-полиметаллические с минералами галлия и германия.

### *9.8.5. Способы добычи и переработки руд.*

Месторождения разрабатывают попутно с основными видами полезных ископаемых.

Галлий получают преимущественно из алюминатных растворов, содержащих около 0,25 г/л $Ga_2O_3$, куда переходит 70–80% галлия при производстве алюминия. Перерабатывают растворы карбонизацией, электролизом и плавкой в вакууме.

Из оборотных маточных растворов, получаемых при переработке бокситов по способу Гоайера, после выделения $Al(OH)_3$, галлий в составе амальгамы выделяют электролизом, на ртутном катоде. Из щелочных растворов $Ga(OH)_3$, получаемых после обработки амальгамы водой, осаждают $Ga(OH)_3$. Ее растворяют в щелочи и выделяют из нее галлий электролизом. Если бокситовую или нефелиновую руду перерабатывают содово-известковым способом, галлий накапливается в последних фракциях осадка, образующегося в результате ее карбонизации. Чтобы обогатить осадок гидроокисей алюминия и галлия, его дополнительно обрабатывают известковым молочком ($Ca(OH)_2$). В результате большая часть $Al(OH)_3$ остается в осадке, а галлий переходит в раствор. Из него пропусканием $CO_2$ выделяют концентрат галлия, содержащий 6–8% $Ga_2O_3$. Этот окисел отделяют и растворяют в щелочи. Из $Ca(OH)_3$ галлий выделяют электролитически. Чистый металл получают, кроме плавки в вакууме, также зонной плавкой или вытягиванием монокристаллов из расплава при температуре, близкой к затвердеванию галлия. Арсенид галлия и другие его полупроводниковые кристаллы получают из галлийорганических соединений.

Товарный продукт содержит 99,999–99,99999% Ga. Вредные примеси в нем – никель, кобальт, медь, олово, алюминий, свинец, магний, железо, кремний, висмут, кадмий, хром, марганец, сера, селен, теллур, фосфор, серебро, индий.

### *9.8.6. Источники галлия в Забайкалье.*

Основным источником галлия являлись полиметаллические (Воздвиженское, Октябрьское, Покровское, Спасское, Центральное и др.) и олово-полиметаллические (Хапчерангинское

и Шерловогорское) месторождения. Сведения о содержаниях галлия в рудах некоторых месторождений, его запасах приведены в табл. 9.8.

Как следует из табл. 9.8, запасы галлия, представляющиеся как минимальные, больше, чем мировая годовая добыча.

Галлий в тысячных долях процента (10 г/т) присутствует также в рудах Нойон-Тологойского и Шерловогорского полиметаллических месторождений. При необходимости руды этих месторождений могут быть крупным источником галлия. При содержании галлия в полиметаллических рудах Шерловогорского месторождения 10 г/т и их массе 258,41 тыс. т, его запасы оценивались в 258,41 т, с учетом отработки 60% руд, оставшиеся запасы оцениваются в 104 тонны.

Таблица 9.8

**Запасы галлия в рудах месторождений Забайкалья**

| Месторождение | Содержание, г/т | Запасы, т | Добыто, т |
|---|---|---|---|
| Воздвиженское | 12 | 30,1 | – |
| Шахтаминское | 100 (в сфалерите) | | – |
| Октябрьское | 5,75 | 1,4 | – |
| Покровское | | 13,5 | 4 |
| Ново-Широкинское | | 93,7 | – |
| Спасское | 8 | 36,4 | – |
| Центральное | 10 | 3,9 | 0,7 |
| Итого: | | 179,23 | 4,7 |

Галлий, как отмечено выше, концентрируется в нефелиновых сиенитах. Поэтому изучение этих горных пород, слагающих Голевское, Михайловское, Калюмнинское, Трехглавое месторождения сынныритов, на содержание галлия позволяет оценивать их как крупнейший источник галлия. В рудах только Голевского месторождения при содержании его 15 г/т [Скурский, 1996] и запасах руды 250 млн. т содержится 3750 т этого ценного металла.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства галлия?
2. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд галлия в Забайкалье?
3. Из каких руд и минералов извлекают галлий?
4. Назовите месторождения и типы руд галлия в Забайкалье.
5. Каковы способы получения галлия?
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется галлий?

## Литература

### Основная

Вершковская О.В., Зуева Т.И., Прокопчук В.П. Минеральное сырье. Галлий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Химия и технология редких и рассеянных элементов / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Чумаченко Н.М., Полетаев В.В., Свирский М.А. и Кривокобыльский А.С. Важнейшие геологоструктурные особенности рудных полей свинцово-цинковых месторождений Приаргунья / Рудные месторождения Забайкалья и методы их поисков. – Записки Заб. филиала Геогр. общ-ва СССР. – Вып. XCIII. – 1973.

### Дополнительная

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Кузнецов К.Ф., Мейтув Г.М. Геохимия редких элементов в свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья. – М.: Наука, 1967.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн.1, кн. 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

## 9.9. Индий.

### *9.9.1. Свойства.*

Индий (In, III, 49), металл, серебристо-белый, блестящий, мягкий; проявляет амфотерные свойства, лито-, сидеро- и халькофильный, устойчивая валентность $3^+$. Открыт Ф. Райхом и Т. Рихтером в 1863 г. при спектроскопическом изучении сфалерита по ярко-синей (индиго) окраске линий, принадлежавших неизвестному элементу.

На воздухе в твердом состоянии стоек. Окисляется при высоких температурах. Выше 800° С горит сине-фиолетовым пламенем, давая желтые кристаллы $In_2O_3$.

Плотность 7310 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 9–10 МПа, температуры плавления 156° С, кипения – 2080; теплопроводность 81,6 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $8{,}37 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $-7{,}0 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $33 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Индий – токсичный элемент (II–III классы опасности). $ПДК_{р.з}$ $In_2O_3$ – 4 мг/м$^3$, $ПДК_{с.с}$ In – 0,005.

### *9.9.2. Распространенность и запасы.*

Кларк индия земной коры 0,25 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,013, основных – 0,22, кислых – 0,26, осадочных (глинах и сланцах) – 0,05–0,08.

Общие мировые запасы индия (без стран СНГ) – 2,6 тыс. т, подтвержденные – 1,4; годовое производство составляет

160 тонн. Наиболее крупные производители – Канада, США, Перу, Япония. В России запасы индия составляют 80% от запасов стран СНГ.

### *9.9.3. Области использования.*

Индий и его соединения (InN, InP, InSb, InAs) широко применяются в производстве полупроводников и основанных на них приборах и электронных системах. Он используется в различных антикоррозионных покрытиях. Особенно важны они для поверхностных частей подшипников. Высокая отражательная способность индия определила его широкое применение для производства различных зеркал и отражателей, рефлекторов, например, в прожекторах. Низкая температура плавления индия и его сплавов определила использование последних для изготовления припоев, используемых в различных отраслях промышленности, в стоматологии и т.д.

Структура потребления (%): электроника – 55; фотоприборы – 11; полупроводники – 6; легкоплавкие сплавы – 10; стоматология – 3; прочие области – 15.

### *9.9.4. Минералы и промышленные типы руд.*

Известно шесть минералов индия. Среди них преобладают халькогениды. Промышленное значение имеют следующие индийсодержащие минералы: сфалерит, халькопирит, касситерит.

К собственно индиевым минералам относится джалиндит ($In(OH)_3$, 83,72% $In_2O_3$ или 69,23% In), присутствует в касситерите вместе с индитом ($FeIn_2S_4$, 59,3% индия), как продукт его замещения, рокезит ($CuInS_2$, 47,4% In). В варламовите содержание In достигает 0,21% [Минералы, 1965], в касситерите – 0,019–1,35%, в сфалерите оловорудных месторождений – до 0,83% при среднем 0,14%, полиметаллических – до 0,1% при среднем 0,072%. Сфалериты других месторождений обычно содержат его в количестве 0,0116–0,02%. Содержание индия

в сфалеритах варьирует достаточно широко (г/т, среднее значение): 185–200 оловорудных, 16–200 золото-кварцево-сульфидных (38 для золоторудных формаций в целом) и 720 для полиметаллических месторождений.

Индий содержится в гетитах и гидрогетитах оловянно-свинцово-цинковых месторождений – Сарыбулакское в Киргизии, до 0,43%, Шерловогорского в Забайкалье и других. Он присутствует также в псиломеланах в зоне окисления оловополиметаллических руд (Геохимия..., 1964).

Индий не образует собственных месторождений, а находится в месторождениях других видов полезных ископаемых. Промышленные типы индийсодержащих месторождений – свинцово-цинковый, медно-колчеданный, оловорудный, золоторудный, медно-молибденовый, вольфрамовый, плавикошпатовый. Наибольшее значение имеют первые три типа.

По запасам (т металла) месторождения индия подразделяют на весьма крупные – более 500, крупные – 500–200, средние – 200–50, мелкие – менее 50.

Промышленные руды – полиметаллические, свинцово-цинковые, свинцовые, оловянно-свинцово-цинковые, медные и медно-цинковые сульфидные, серно-колчеданные, сульфидно-касситеритовые золотополиметаллические, медно-молибденовые, шеелитовые, цинк-флюоритовые.

Содержания индия в рудах составляют 20–10 г/т (среднее 3,6).

### *9.9.5. Добыча и переработка руд.*

Добытые индийсодержащие руды перерабатывают по технологиям переработки руд основного полезного компонента. Подготовку их к переделу также производят по технологиям обогащения основных типов промышленных индийсодержащих руд. При металлургическом переделе индийсодержащих руд индий переходит в пыли, шламы и кеки производства, которые перерабатывают гидро- и электрометаллургическим способом.

Извлечение индия из руд различных типов составляет 2–35% при содержании его в индийсодержащих концентратах 0,01–1,0%.

Индий извлекают из отходов и промежуточных продуктов производства свинца, цинка и олова. Содержание индия в этих продуктах находится в пределах тысячных – десятых долей процента. Производство индия, как и ряда других попутных редких металлов, состоит из трех основных групп операций: получение обогащенного концентрата, переработка его до чернового металла и рафинирование, то есть очищение. В большинстве случаев обогащенный индием продукт (пыль, шлам, кек) обрабатывают серной кислотой и переводят индий в раствор, из которого гидролитическим осаждением выделяют концентрат. Из него цементацией на цинке или алюминии выделяют черновой индий. Рафинирование производят химическими, электрохимическими, дистилляционными и кристаллофизическими методами.

Товарный продукт содержит 99,96–99,999% In.

К вредным примесям в индии относятся железо, кадмий, медь, мышьяк, никель, олово, ртуть, свинец, теллур, цинк.

### *9.9.6. Источники индия в Забайкалье.*

В связи с тем, что индий не образует собственных месторождений, основными его источниками в Забайкалье являются полиметаллические и олово-полиметаллические руды. Запасы индия числятся в Воздвиженском, Михайловском, Октябрьском, Спасском, Центральном и некоторых других свинцово-цинковых месторождениях (табл. 9.9).

Содержания его в рудах полиметаллических месторождений Приаргунья находятся в пределах 3–34 г/т, а запасы – 0,7–41,5 тонны.

Кроме того, важным источником индия является Шерловогорское олово-полиметаллическое месторождение и находящееся в сочленении с ним месторождение Восточное поле (Восточная аномалия). Содержание его в рудах Шерловогорского месторождения 0,1–20 г/т при среднем 1,52 г/т.

Таблица 9.9

**Содержания индия в главных рудообразующих минералах некоторых полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья**
(с использованием данных Н.М. Чумаченко и др., [1973])

| Месторождение | Минерал | Содержание, г/т |
|---|---|---|
| Савинское № 5 | Пирит | 2,0 |
| | Пирротин | 3,0 |
| | Сфалерит | 50,0 |
| | Галенит | 7,0 |
| Каменское | Пирит | 1,0 |
| | Сфалерит | 78,0 |
| | Галенит | 3,5 |
| Кличкинское | Пирит | 1,0 |
| | Сфалерит | 32 |
| | Галенит | 3,2 |
| Кадаинское, | Пирит | 5,0 |
| Северо-Акатуевское | Сфалерит | 862 |
| | Галенит | 5 |
| Благодатское, | Пирит | 5,5 |
| Екатерино-Благодатское, | Арсенопирит | 7,0 |
| Воздвиженское, | Сфалерит | 260 |
| Михайловское | Галенит | 10,0 |

Он концентрируется в касситерите и сфалерите. В концентрате деревянистого олова Шерловой Горы содержание индия достигает 0,23%, в обычных касситеритах – до 0,06%, а в сфалеритах – 0,005–0,08 [Геохимия..., 1964]. Индий в 14%-ном оловянном концентрате содержится в количестве 0,014% (данные Г.А. Мельникова, 1960 г.). Не учтен индий в полиметаллических забалансовых рудах, бедных оловянных, олово-цинковых рудах, окисленных рудах в отвалах и рудных складах. Кроме указанных запасов индия в рудах, складах и отвалах собственно Шерловогорского месторождения, существенные его

запасы связаны с олово-полиметаллическим месторождением Восточное поле. Запасы руды составляют 16342 тыс. т. При среднем содержании индия по аналогии с Шерловогорским олово-полиметаллическим месторождением, 1,52 г/т, оценка запасов индия в рудах Восточного поля дает минимум 25,04 т. Таким образом, с учетом запасов индия в неотработанных частях рудного поля, согласно данных табл. 9.10, масса руды на начало разработки месторождения составляла 40328,947 тыс. т. Запасы индия в ней оценивались при содержании 1,52 г/т в 61,3 т. Отработано 17617,3 тыс. т. Это составляет 43%. При этом отработано и извлечено или отправлено в отвал

Таблица 9.10

**Оценка запасов индия в Шерловогорском рудном поле**

| Участок | Индий | | |
|---|---|---|---|
| | масса руды, тыс. т | содержание в руде, г/т | запасы, т |
| Остаток руды в карьере Шерловогорского олово-полиметаллического месторождения | 22712 | 1,52 | 34,94 |
| Бедные руды горных пород вскрыши | 133587 | 1,52 | 203,05 |
| Отвалы бедных руд | 1430 | 1,52 | 2,26 |
| Отвалы бедных олово-цинковых руд | 3243 | 1,52 | 4,93 |
| Отвалы свинцово-цинковых руд | 2434 | 1,52 | 1,80 |
| Олово-свинцовые руды Восточного поля | 16342 | 1,52 | 25,04 |
| | | | 271,58 |

26,36 т индия. В рудах неотработанной части месторождения осталось 34,94 т индия.

В Назаровском золото-цинковом месторождении в Республике Бурятия, являющемся составной частью Озернинского рудного узла, установлены высокие содержания индия. Средние их значения по пяти рудным телам, имеющим мощность 1,2–4,9 м при протяженности по простиранию 300–600 м и по падению 150–500 м, варьирует в пределах 6,1–11,0 г/т. Среднее содержание индия по данным подсчета запасов составило 7,1 г/т. Однако запасы индия по месторождению (Золото Бурятии, 2004) не числятся на балансе. Тем не менее, оценка их с использованием приведенных в этой работе сведений дает 36,5 т индия.

Индий содержится также и в рудах Уконикского месторождения (1,0 г/т). Но в оценке запасов этого месторождения сведения о нем отсутствуют. По данным Л.Ф. Наркелюна и др. [Вещественный..., 2001], содержание индия в пиритовых и халькопиритовых концентратах Удоканского месторождения составляет (г/т) 0,2–0,4, в борнит-халькозиновых – 6,6, а в бор-

Таблица 9.11

**Запасы индия в некоторых месторождениях Забайкалья**

| Месторождение | Содержание, In, г/т | Запасы, т | Добыто, т |
|---|---|---|---|
| Воздвиженское | 12 | 24,2 | н. д. |
| Михайловское | 30 | 3,18 | « |
| Октябрьское | 3 | 0,7 | « |
| Ново-Широкинское | | 15,0 | « |
| Спасское | 8 | 41,5 | « |
| Центральное | 34 | 13,5 | 2,2 |
| Шерловогорское | 1,52 | 271,58 | н. д. |
| Всего | | 369,66 | 2,2 |

нит-халькопиритовом достигает 30. Сведения о содержаниях индия и его запасах даны в табл. 9.11.

С учетом добычи общие запасы индия в месторождениях региона составляют 367,46 т. В этих данных не учтены запасы и ресурсы индия крупных Озерного и Холоднинского полиметаллических месторождений в Республике Бурятия, а также оценка запасов Назаровского месторождения (36,5 т).

По данным «Читанедра» запасы индия в Забайкальском крае составляли на 01.01.2006 г. – 241 т, а стоимость его в недрах – 2421 млн. рублей.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства индия?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд индия.
3. Из каких руд и минералов извлекают индий?
4. Как получают индий?
5. Назовите месторождения и типы руд индия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности человека используется индий?

## Литература

### Основная

Иванов В.В., Видякин Н.С. Минеральное сырье. Индий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Каленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Комплексные месторождения халькофильных редких элементов / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Э.Ф. Минцер и др. – М.: Недра, 1982.

Межуева Г.С., Егорова М.Г., Роговой В.М. Об учете и оценке попутных редких элементов в горно-металлургических и геологоразведочных работах. – М.: ИМГРЭ, 1990.

Минерально-сырьевая база редких элементов СНГ и зарубежных стран / Под ред. В.М. Рогового. – М.: ИМГРЭ, 1992.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I. / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

**Дополнительная**

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным элементам / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Л.Ф. Борисенко и др. – М.: Недра, 1990.

Кузнецов К.Ф., Мейтув Г.М. Геохимия редких элементов в свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья. – М.: Наука, 1967.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 1, 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения // Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

Чумаченко Н.М., Полетаев В.В., Свирский М.А. и Кривокобыльский А.С. Важнейшие геологоструктурные особенности рудных полей свинцово-цинковых месторождений Приаргунья / Рудные месторождения Забайкалья и методы их поисков. – Записки Заб. филиала Геогр. общ-ва СССР. – Вып. XCIII. – 1973.

## 9.10. Селен.

### *9.10.1. Свойства.*

Селен (Se, VI, 34), металл, серый, серебристый, мягкий, гибкий; проявляет кислотные свойства, халькофильный; устойчивые валентности $2^-$, $2^+$, $4^+$, $6^+$.

Плотность 4790 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 736 МПа; температуры плавления 217 С, кипения – 685; теплопроводность 2,04 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $0{,}01 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость – $4{,}0 \cdot 10^{-6}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $36{,}9 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$; проявляет свойства полуметалла.

Селен – высокотоксичный элемент (II класс опасности), но обладающий повышенной биологичностью, $ПДК_{м.р}$ – 2 мг/м$^3$, $ПДК_{с.с}$ – 0,0005 мг/м$^3$; $ПДК_{в}$ – 0,001 мг/дм$^3$.

### *9.10.2. Распространенность и запасы.*

Кларк селена земной коры 0,05 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,05, основных – 0,03, средних – 0,05, кислых – 0,05, осадочных (глинах и сланцах) – 0,6. Естественное содержание в почвах 0,2–1,0 г/т, в воде океанов – 0,00001 г/т.

Мировые подтвержденные запасы селена (без стран СНГ) порядка 2 тыс. т, в том числе 200 т вторичного селена. Наиболее крупные производители – Япония, Канада, США. Страны СНГ по запасам селена занимают первое место в мире. В России запасы составляют 69% от запасов стран СНГ.

### *9.10.3. Области использования.*

Селен используется в технологии магнитных полупроводников для получения материалов с необходимыми оптическими и электрическими свойствами [Магден, 1975]. Например, если в систему $Eu_{1-x}$ $Gd_x$ Se добавить некоторое количество GdSe (в пределах 0,15–0,015%), то резко изменяется ее электрическое сопротивление (возрастает на 6 порядков от $10^{-2}$ до $10^4$ Ом · см). Магнитооптические свойства полупроводниковых магнитных кристаллов применяются в лазерной технике, например, для модуляции поляризованного лазерного луча, а явление фотоферромагнитного эффекта при генерации электронов проводимости позволяет перевести вещество в состояние ферромагнетизма [Магден, 1975].

Наиболее емкий и быстро развивающийся потребитель селена и его соединений – фотокопировальная техника, а также телевизионная. К старейшей области использования селена относится стекольное производство: цветное стекло с использованием красителей на основе селена способно понижать потери тепла и света. В стекольной промышленности США используется 25–30% селена, в Японии – 12%, в других странах – до 20%.

Селенсодержащие термостойкие пигменты используются в химической и автомобильной промышленности (в Японии – около 6%, в США – 20%). Селен – хороший катализатор. Поэтому он используется в качестве вулканизирующей добавки и катализатора в производстве натурального и искусственного каучука, а также в других химических производствах. Примесь селена в нержавеющих сталях улучшает их литейные качества, облегчает механическую обработку без снижения сопротивления. В связи с крайне неравномерным распределением в различных регионах планеты подвижных форм селена, необходимых для нормального функционирования жизненно важных систем животных и человека, перспективным является использование его в качестве пищевых добавок в сельском хозяйстве и медицине. Однако еще нет полной ясности в во-

просах токсичности селена и это сдерживает его использование в биологии и медицине, хотя фармацевтическая промышленность уже выпускает целый ряд лекарственных и комплексных витаминных препаратов с микродобавками селена.

Структура потребления (%): фотокопировальная техника 40–60; стекольное производство – 20; селенсодержащие термостойкие пигменты – 13; остальная часть – электроника, сельское хозяйство, медицина.

### *9.10.4. Минералы и типы руд.*

Известно более 80 минералов селена. Среди них преобладают халькогениды, в том числе селениды, в основном, меди, никеля и серебра. Окислы, как и самородные формы, составляют незначительное число. Промышленное значение имеют преимущественно селенсодержащие минералы: халькопирит, пирит, пентландит, сфалерит, галенит, молибденит. Тем не менее, собственно селеновые минералы, развитые на месторождениях серебра, меди и никеля, также используются в качестве компонентов комплексных руд.

Наиболее важными из собственно селеновых минералов являются науманнит ($Ag_2Se$, 22,92–29,53% Se, 65,56–75,98% Ag), клаусталит (PbSe, 25,6–27,99 Se), крукесит ($(Cu,Tl,Ag)_2Se$, 33,27% Se, 18,55% Tl, 1,44% Ag), блокит ($(Ni,Cu)Se_2$, 70,93% Se, 1,76% Ag, до 0,138% Pt, до 0,07% Pd), клокманнит (CuSe, 45,68–45,73% Se, 0,73% Ag), умангит ($Cu_3Se_2$, 36,18–41,44% Se, 0,45–0,46% Ag), эвкайрит (Ag,Cu,Se, 28,54–30,44% Se; 42,73–43,39% Ag), хаммарит ($(Bi_6Pb_5(Se,S)_{14}$, 8,46% Se, 0,19% Ag), известен в рудах Бом-Горхонского месторождения вольфрама; ферроселит ($FeSe_2$, 68,42–73,8% Se).

Селен не образует самостоятельных месторождений, а находится, как правило, в месторождениях цветных металлов. Промышленное значение имеют также селенсодержащие висмутины (до 0,016% Se), пириты (до 0,0175% Se) и галениты (до 0,016% Se) месторождений вольфрама. Это же относится и к арсенопиритам (0,0036% Se) месторождений сульфидно-касситеритовой формации.

В сульфидах руд золото-сульфидно-кварцевой формации содержание селена значительно выше. По данным Н.Д. Синдеевой [1959], в сульфидах Кировского месторождения в Верхнем Приамурье содержатся высокие концентрации селена (табл. 9.12).

Таблица 9.12

**Содержание селена в сульфидах Кировского месторождения [Геохимия..., 1964]**

| Минерал | Se, % | Минерал, % | Se, % |
|---|---|---|---|
| Висмутин | 0,28–0,3275 | Пирит | 0,0001–0,003 |
| Арсенопирит | 0,0006–0,019 | Джемсонит | 0,0001–0,0005 |
| Халькопирит | 0,0008–0,003 | | |

В рудах месторождений малоглубинной золото-серебряной формации, например, Реджант-Лебоиг (о. Суматра), среднее содержание Se составляет 0,016% [Геохимия..., 1964].

В сульфосолях Балейского, Дарасунского и Ключевского месторождений золота содержится 0,000n–0,13% селена. В алтаите Балейского рудного поля содержится 0,08% селена. В целом золоторудные месторождения заключают в себе существенное число минералов – носителей селена. В халькопиритах меденосных габброидов Забайкалья содержание селена составляет 176,76–213,0 г/т [Салихов и др., 1989].

В рудных минералах других месторождений Забайкалья содержания селена относительно не высокие, но стабильные (табл. 9.13).

Существенны содержания селена в антимонитах комплексных ртутно-сурьмяных руд. Чтун Цзя-жун [1962] показал, что в антимонитах концентрации селена достигают 0,09%, в среднем составляя 0,027%.

Промышленные типы селенсодержащих месторождений – медно-колчеданный, медно-порфировый, медно-скарновый, медистых песчаников, медно-железованадиевый, медно-никелевый, медно-молибденовый, свинцово-цинковый. Для Забайкалья наибольшее значение имеют четыре последних типа.

Таблица 9.13

**Содержание селена и теллура в некоторых минералах рудных месторождений Забайкалья**

| Минерал | Содержание, мас.% | | Месторождения | Источник |
|---|---|---|---|---|
| | селен | теллур | | |
| Галенит | 0,0001–1,23 | 0,001–0,06 | Дарасунское, Воздвиженское, Центральное, Савинское № 5 и др. | Данные разведки |
| Сфалерит | – | – | Спасское, Кадаинское, Центральное, Ново-Широкинское и др. | То же |
| Галенобисмутит | 0,001–14,3 | – | Дарасунское, Средне-Голготайское | Данные разведки |
| Висмутин | 0,000n–0,06 | 0,000n–0,13 | Средне-Голготайское, Букукинское, Дарасунское | То же |
| Теллуровисмутит | 0,000n–0,20 | 45,33–48,26 | Дарасунское, Средне-Голготайское, Букукинское, Давендинское и др. | То же |
| Лиллианит | 0,000n–2,97 | 0,0n | Букукинское, Дарасунское, полиметаллические месторождения Приаргунья и др. | То же |
| Тетраэдрит, теннантит, фрейбергит, миаргирит | 0,000n–0,13 | 0,0001–17,0 | Балейское, Дарасунское, Ключевское, полиметаллические месторождения Приаргунья | Данные разведки, наши данные |
| Тетрадимит | 0,001–4,98 | 33,16–36,19 | Дарасунское, Средне-Голготайское, Верхне-Алиинское, Ключевское, Итакинское | То же |

*Окончание на с. 118*

Таблица 9.13 (окончание)

| Минерал | Содержание, мас.% | | Месторождения | Источник |
|---|---|---|---|---|
| | селен | теллур | | |
| Алтаит | 0,08 | 37,31–38,48 | Дарасунское, Балейское, полиметаллические месторождения Приаргунья | То же |
| Молибденит | 0,001–0,09 | 0,0005–0,002 | Жирекенское, Шахтаминское, Ключевское, Средне-Голготайское, Бугдаинское и др. | Данные разведки |
| Петцит | – | 32,87–34,90 | Дарасунское, Ключевское, Шахтаминское, Хорогочинское, Средне-Голготайское, Зун-Холбинское | Данные разведки, наши данные |
| Гессит | – | 35,80–37,77 | Балейское, Дарасунское, Ключевское | Данные разведки |
| Пирит | 0,0001–0,06 | 0,0005–0,005 | Дарасунское, Ключевское, Шахтаминское, Жирекенское, Ново-Широкинское и др. | Данные разведки |
| То же | до 0,0007 | до 0,0007 | Удоканское | То же |
| Халькопирит | 0,0005–0,1 | 0,0007–0,004 | То же | То же |
| Борнит | 0,00053 | 0,0007 | То же | [Вещественный..., 2001] |

По запасам селена (т) месторождения подразделяют на весьма крупные – более 10000, крупные – 10000–2000, средние – 2000–500, мелкие – 500–50, весьма мелкие – менее 50.

Промышленные селенсодержащие руды – медные, медно-цинковые, медно-никелевые, медно-молибденовые, полиметаллические, свинцово-цинковые. По содержанию селена (г/т) руды подразделяют на богатые – 120, средние – 60, бедные – 20.

### *9.10.5. Способы добычи и переработки руд.*

Месторождения селенсодержащих руд разрабатывают в связи с основными полезными ископаемыми открытым, подземным и комбинированным способами.

Подготовка селенсодержащего сырья к переделу производится совместно с основными рудами дроблением, сортировкой богатых руд и обогащением бедного сырья с применением флотационных технологий. Извлечение селена из руд в концентраты (селенистые кеки) различных типов составляет 30–40%, при содержании его в концентрате 700–800 г/т.

Селенсодержащие концентраты перерабатывают металлургическим, а сернистые селенсодержащие газы – химическим способами.

Селен получают как непосредственно при переработке анодных шламов электролитического рафинирования меди, селенсодержащих сульфидных концентратов, а также из отходов сернокислотного и целлюлозно-бумажного производства. В шламах и кеках селен присутствует вместе с теллуром, серой, цветными и благородными металлами. Шламы фильтруют и подвергают окислительному обжигу (около 700° С) или нагревают с концентрированной серной кислотой для получения летучего $SeO_2$, который улавливают в скрубберах или электрофильтрах. Затем переводят его в раствор и извлекают технический селен, осаждая сернистым газом. Для извлечения селена применяют также спекание шлама или кека с содой. В результате образуются водорастворимые сплавы, из которых селенат натрия извлекается водой. Из раствора выделяют технический селен. Он является товарной продукцией металлургических производств.

Селен существует в различных аллотропических модификациях: аморфной (порошкообразный, коллоидный, стекловидный) и кристаллической. Аморфный селен (красный) порошкообразный и коллоидный получают, в основном, восстановлением из раствора селенистой кислоты $H_2SeO_3$ и последующим быстрым охлаждением его паров. Черный стек-

ловидный селен получают нагреванием любой другой модификации до температуры выше 220° С и последующим быстрым охлаждением. Он не успевает раскристаллизоваться и остается в состоянии переохлажденной жидкости, то есть – стекла. Из кристаллических форм селена термодинамически наиболее устойчив гексагональный, или γ–селен (серый), по сравнению с моноклинными α- и β-формами. Он получается из этих форм селена нагреванием до плавления и последующим медленным охлаждением до 180–210° С. При этих температурах его выдерживают до раскристаллизации.

Товарная продукция содержит более 99,0–99,8% селена. Вредные примеси в селене – теллур, железо, медь, свинец, ртуть, мышьяк, сера, алюминий.

Для получения чистого селена, используемого в полупроводниковой технике, в химических соединениях, включая фармацевтику, черновой (технический) селен рафинируют методами перегонки в вакууме, перекристаллизации и т. д.

### *9.10.6. Источники селена в Забайкалье.*

Рудные месторождения Забайкалья на селен изучены недостаточно.

Наиболее важным источником селена являются комплексные полиметаллические руды, а также руды золота и молибдена (см. табл. 9.13). Кроме того, существенное значение имеют руды Чинейского месторождения, где содержание селена достаточно высокое и в сульфидном концентрате. Вероятно, основным носителем селена в рудах этого месторождения является халькопирит, так как в других сульфидах он не обнаружен в сопоставимых концентрациях (176,74–213,0 г/т).

Существенной селеноносностью обладают молибдениты медно-молибденовых (Жирекенское) и золото-молибденовых (Бугдаинское, г/т, 25–51) месторождений, среднее – 33 для ранних генераций и 45–93, среднее 64 для поздних [Казаченко, 1969]), данные В.П. Мязина и др. [Вещественный..., 2001]. В молибденитах Жирекенского месторождения содержание

селена составляет 20–900 г/т, в халькопиритах – 5–100 г/т и в пиритах – 10–60 г/т [Месторождения Забайкалья..., 1995]. Среднее содержание селена в молибденитах этого месторождения составляет 82 г/т [Вещественный..., 2001].

Относительно повышенные содержания селена К.Ф. Кузнецовым, Г.М. Мейтувом и Н.А. Читаевой [Геохимия..., 1964] выявлены в минералах и рудах полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья. Наиболее высокие его содержания присущи галенитам (10–60 г/т), сфалериты содержат (г/т) 1–10 селена, пирротины – 10–20, пириты – 10–25, арсенопириты – до 6. Поэтому основное количество селена должно извлекаться в свинцовый и пиритный концентраты.

Содержание селена в главных рудообразующих сульфидах некоторых полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья дано в табл. 9.14.

Главными носителями селена в рудах этих месторождений являются галенит и сфалерит.

Таблица 9.14

**Селен в минералах полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья**
(с использованием данных К.Ф. Кузнецова, Г.М. Мейтува, [1967] и Н.М. Чумаченко и др., [1973])

| Месторождение | Минерал | Содержание селена, г/т |
|---|---|---|
| Савинское № 5 | Арсенопирит | 2,6 |
| | Пирротин | 3,2 |
| | Сфалерит | 12,0 |
| | Галенит | 10,0 |
| Кличкинское | Сфалерит | 40,0 |
| | Галенит | 11,0 |
| Кадаинское, Северо-Акатуевское | Пирит | 3,0 |

Таким образом, приведенные данные о содержании селена в минералах различных месторождений Забайкалья свидетельствуют о возможности извлечения как попутного компонента из медных руд Чинейского, а также молибденовых Жирекенского и Бугдаинского месторождений. Но для определения экономической целесообразности извлечения селена требуются специальные исследования.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства селена?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд селена.
3. Из каких руд и минералов извлекают селен?
4. Как получают селен?
5. Назовите месторождения и типы руд селена в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности человека используется селен?

## Литература

### Основная

Виноградов В.Н. Промышленная оценка рассеянных элементов в комплексных рудах. – М.: Недра, 1972.

Зырянов М.Н., Надольский А.П. Основы технологии получения рассеянных элементов. – М.: Металлургия, 1968.

Иванов В.В., Видякин Н.С., Юшко-Захарова О.Е. Минеральное сырье. Селен / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Минерально-сырьевая база редких элементов СНГ и зарубежных стран / Под ред. В.М. Рогового. – М.: ИМГРЭ, 1992.

Разведка и оценка комплексных месторождений цветных металлов / А.М. Сечевица, В.В. Иванов, В.Н. Иванов и др. – М.: Недра, 1990.

**Дополнительная**

Сечевица А.М. Геолого-промышленная оценка попутных полезных ископаемых в комплексных рудах. – М.: Недра, 1987.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. III / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

Чжун Цзя-жун. О селенсодержащей сурьмяно-ртутной формации // Геохимия. – 1962. – № 8. – С.681–688.

## 9.11. Теллур.

### *9.11.1. Свойства.*

Теллур (Te, VI, 52), полуметалл, серебристо-белый; проявляет амфотерные свойства, халькофильный, устойчивые валентности $2^-$, 0, $2^+$, $4^+$, $6^+$. Открыт в 1782 г. Мюллером, подтвержден М.Г. Клапротом, исследован И.Я. Берцелиусом.

Плотность 6240 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 180–270 МПа; температуры плавления 449,7° С, кипения – 990; теплопроводность 2,35 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $4{,}36 \cdot 10^{-3}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость – $3{,}9 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $16{,}75 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Отчетливо выражены металлические свойства. Полупроводник.

Теллур – высокотоксичный элемент (I–II классы опасности). ПДК$_{р.з}$ ($TeO_2$) – 0,01 мг/м$^3$, ПДК$_{с.с}$ $TeO_2$ – 0,5, Te – 0,01 мг/м$^3$; ПДК$_в$ Te – 0,0001 мг/дм$^3$.

Теллур всегда присутствует в тканях животных и растений. На богатых теллуром почвах растения захватывают значительное количество теллура и его концентрации достигают $2 \cdot 10^{-4} - 2{,}5 \cdot 10^{-3}$. В наземных животных его концентрации достигают $2 \cdot 10^{-6}$%. Среднесуточное поступление с пищей в организм человека составляет до 0,6 мг. Выводится из организма с испражнениями. Для растений умеренно токсичен и высокотоксичен для млекопитающих. Вызывает задержку роста, потерю шерсти, паралич и др.

### *9.11.2. Распространенность и запасы.*

Один из самых редких элементов. Кларк теллура земной коры 0,001 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): кислых – 0,001, осадочных (глинах и

сланцах) – 0,01. Данные для ультраосновных, основных и средних пород отсутствуют.

Мировые подтвержденные запасы (без стран СНГ) – 32 тыс. т, ежегодное производство составляет около 300 тонн. Наиболее крупные производители – Япония, Канада, Бельгия, США, Филиппины. В странах СНГ 76% запасов теллура приходится на Россию.

### *9.11.3. Области использования.*

Искусственные радиоактивные изотопы теллура $^{127}Te$ ($T_{1/2}$ = 105 сут.) и $^{129}Te$ ($T_{1/2}$ = 33,5 сут.) используются в качестве меченых атомов. Теллур широко используют в полупроводниковой технике. $Bi_2Te_3$ и $Sb_2Te_3$ применяют в термогенераторах, CdTe – в солнечных батареях как полупроводниковый лазерный материал. Теллуриды (соли теллуроводородной кислоты $H_2Te$) используются не только для указанных выше целей. Они применяются в приемниках лазерного излучения, холодильных термоэлементах, в качестве высокотемпературных смазок и др. Как легирующая добавка применяется в сплавах свинца, в чугуне и стали для улучшения их обрабатываемости и механических свойств. Используется теллур для отбеливания чугуна. Около 80% теллура расходуется на изготовление сталей, в том числе 78% – для автомобильной промышленности. Теллур используется также в цветной металлургии, главным образом в производстве медных сплавов. Это повышает их электро- и теплопроводность. Такие сплавы применяются в производстве электро- и термовыходов в транзисторах, присадочных прутков для сварки деталей, для изготовления припоев. В химической промышленности теллур применяют в производстве резины для автомашин и лент транспортеров, а также катализаторов и детонаторов. Он используется для вулканизации латексных смесей, производства коричневых и красных стекол и эмалей. В приборах инфракрасной техники, в частности, в фотоприемниках ИК-излучения, перспективным является применение соединения CdHgTe. Это вещество способно в зависимости от его состава изменять ширину запрещенной зоны в больших

пределах – от 0,3 до 1,6 эВ. Приемник инфракрасного излучения, в котором используется это вещество, может работать в исключительно широком диапазоне длин волн – от 1 до 35 мкм, тогда как обычные фотоприемники работают в диапазонах длин волн до 1,8 мкм [Магден, 1975]. Термоэлектрические и фотоэлектрические свойства теллуридов стали применяться в гелиоэнергетике.

Структура потребления теллура (%): в сталелитейном производстве – 80, в качестве антикоррозийных и прочностных присадок в сплавах – 12, полупроводниках для лазерной и инфракрасной техники – 8.

### *9.11.4. Минеральный состав и промышленные типы руд.*

Известно 108 теллурсодержащих минералов. Среди них преобладают халькогениды, интерметаллиды, оксиды. Промышленное значение имеют теллурсодержащие минералы – халькопирит и галенит.

Теллур является одним из главных компонентов в составе многих распространенных минералов, руд золота, меди, свинца, цинка, висмута и других. Он входит в состав собственных минералов, которые могут быть составной частью рудных минеральных парагенезисов. Кроме того, он может быть изоморфной примесью в целом ряде сульфидов и халькогенидов. Иногда он может входить в состав ряда рудообразующих минералов в виде тончайших неструктурных примесей.

Главным из собственных минералов теллура, имеющих значение как и его источники, является тетрадимит ($Bi_2Te_2S$, 59,3% Bi, 36,2% Te, 4,5% S, присутствует также примесь Se). Среди минералов группы тетрадимита выделяют по соотношению серы и теллура жозеиты А и Б; тетрадимит обычно ассоциирует с золотом; теллуровисмутит ($Bi_2Te_3$, 52,1% Bi и 47,9% Te, содержит примеси Se и Sb), самородный теллур (Te, 97,2–97,9% Te, содержит примеси Au, Ag, Fe, Se), алтаит (PbTe, 61,9% Pb, 38,1% Te и примеси Ag, Au, Cu, Fe), гессит ($Ag_2Te$, 62,9% Ag, 37,1% Te, примеси Au, Pb, Fe, Bi), калаверит ($AuTe_2$, 43,6% Au, 56,4% Te, примесь Ag), креннерит (Au,

Ag)$Te_2$, до 7,2% Ag, 33% Au, 59,8% Te, примеси Cu, Fe, Sb), петцит ($Ag_3AuTe_2$, 41,7% Ag, 25,4% Au, 32,9% Te, а также примеси Cu, Hg, Mo), риккардит ($Cu_7Te_5$, 40, 74% Cu и 59,9% Te ), сильванит (Au, $Te_{41}$, 24,2% Au, 13,2% Ag, 62,6% Te, примеси Cu, Fe, Ni, S, Se).

Среди минералов, в которые теллур входит изоморфно, замещая серу или в виде неструктурных примесей, наиболее важными являются сульфосоли меди и серебра (тетраэдрит, теннантит, фрейбергит, миаргирит и др.), содержащие Te в количестве 0,0001 – 17% . Кроме того, в существенных количествах теллур содержат пирит – 0,0005 – 0,1% , халькопирит – до 0,05 Te, козалит – до 2% Te, молибденит – 0,0005–0,04% Te, лиллианит – до 0,0n% Te, висмутин – до 0,53% Te, галенит – до 0,37% Te, арсенопирит – до 0,225% Te и др.

Теллур не образует собственных месторождений, а находится в месторождениях других видов полезных ископаемых.

Промышленные типы теллурсодержащих месторождений – медно-колчеданный, медно-никелевый, медно-молибденовый, колчеданно-полиметаллический.

По запасам теллура (т) месторождения подразделяют на весьма крупные – десятки тысяч, крупные – тысячи, средние – сотни, мелкие – десятки, весьма мелкие – единицы.

Промышленные теллурсодержащие руды – медный, никелевый, свинцовый, цинковый концентраты.

### *9.11.5. Способы добычи и переработки руд.*

Месторождения разрабатывают открытым, подземным и комбинированным способами.

Подготовку руд к переделу производят дроблением, сортировкой богатых руд и обогащением бедного сырья с применением комбинированных технологий.

Теллур извлекают попутно при переработке сульфидных руд из промежуточных продуктов свинцово-цинкового и медного производства, а также из теллурсодержащих золото-сульфидных руд. Основным источником сырья для получения

теллура являются шламы электролиза меди. Они содержат обычно 0,5–2% Te, а в качестве примесей – Ag, Au, Cu, Se и другие элементы. Сначала из шламов извлекают медь и селен. Оставшийся материал, обогащенный теллуром, благородными металлами, свинцом, сурьмой и другими компонентами, переплавляют для получения сплава золота с серебром. При этом теллур в виде $Na_2TeO_2$ переходит в содово-теллуровые шлаки, содержание его в них достигает 20–35%. Шлаки измельчают, размалывают и выщелачивают водой, и переводят теллур в раствор, из которого он осаждается электролизом на катоде. Этот теллуровый концентрат в присутствии алюминиевого порошка обрабатывают щелочью и переводят в раствор в виде теллуридов. Образующийся раствор отделяют от нерастворимого остатка и продувают воздухом. При этом почти чистый (99%) теллур из раствора осаждается в элементарном виде. Для очищения полученный теллур вновь подвергают теллуридной переработке. Теллур повышенной чистоты получают комплексом методов, включающим методы химической очистки, дистилляции и зонной плавки.

Извлечение теллура в медные, цинковые и другие концентраты составляет до 45% при содержании его в концентрате несколько сотен г/т. Извлечение теллура при металлургическом производстве в шлаки электролизом достигает 90%.

Товарный продукт содержит до 99,98% Te. Вредные примеси в теллуре – медь, цинк, сера.

### *9.11.6. Теллуровое сырье в Забайкалье.*

Наиболее важными источниками теллура в месторождениях Забайкалья являются комплексные медно-молибденовые, золото-полиметаллические и полиметаллические руды.

Наиболее распространенные минералы теллура и их месторождения представлены в табл. 9.13.

Содержание теллура в рудах свинцово-цинковых месторождений относительно низкое, но тем не менее в некоторых из них он образует концентрации, представляющие практический интерес. По данным К.Ф. Кузнецова и др. [Геохимия..., 1964],

максимальны содержания теллура в галенитах (%): Савинского № 5 (0,0014), Почекуевского (0,0019) и Акатуевского (0,0020), а также в арсенопиритах Запокровского (0,0012) месторождений.

В золоторудных месторождениях широко развиты калаверит, креннерит, сильванит (Ключевское, Дарасунское, Балейское, Тасеевское, Итакинское рудное поле и др.), петцит (Дарасунское, Средне-Голготайское, Верхнеалиинское, Любавинское, Итакинское рудное поле, Ключевское, Верхнекручининское, Пионерское, Зун-Холбинское), гессит (Амазарский золоторудный район, Дарасунское, Балейское, Тасеевское, Ключевское, Зун-Холбинское и др.), теллуровисмутит (Уконикское, Дарасунское, Андрюшкинское), тетрадимит, жозеит, грюнлингит (Дарасунское, Любавинское, Ключевское, Средне-Голготайское, Итакинское, Казаковское, Андрюшкинское, Зун-Холбинское и др.), алтаит, нагиагит (Дарасунское, Зун-Холбинское), верлит (Дарасунское, Таинское) [Золото Бурятии, 2004] и др.

Возможный источник теллура – золото-серебряные руды Малеевского участка Итакинского рудного поля, содержащие теллур в пределах 0,5–50 г/т. Содержание теллура во флотоконцентратах Ключевской фабрики – 14–40 г/т.

В арсенопиритах Дарасунского месторождения содержание теллура достигает 0,007%.

Содержание теллура в молибденитах Жирекенского месторождения по данным [Вещественный..., 2001] составляет 16 г/т. В.И. Сотников и др. [Месторождения Забайкалья, 1995] приводят такие данные о содержаниях теллура в минералах этого месторождения (г/т): в молибдените – 5–20, в халькопирите – 10–40, в пирите – 5–30. Данных об извлечении в концентраты в литературе нет. Присутствует теллур и в рудах Бугдаинского месторождения.

Самородный теллур установлен А.В. Дружининым в 1958 г. в рудах Букукинского месторождения вольфрама [Геохимия..., 1964]. Сульфиды этого месторождения содержат достаточно высокие концентрации теллура (табл. 9.15).

Кроме приведенных в табл. 9.13 теллурсодержащих минералов, Н.М. Чумаченко и др. [1973] дают содержание теллура (%) для галенита Савинского № 5 – 0,0016, Кадаин-

Таблица 9.15

**Содержание теллура в минералах и концентратах Букукинского месторождения**

| Рудное вещество | Te, % | Рудное вещество | Te, % |
|---|---|---|---|
| Молибденит | 0,0060 | Сфалерит | 0,0016 |
| Пирит | 0,0070 | Висмутин | 0,1300 |
| Пирротин | 0,0053 | Сульфидный концентрат | 0,0041 |
| Галенит | 0,0387 | Коллективный концентрат | 0,0037 |

ского и Северо-Акатуевского – 0,0018, Благодатского, Екатерино-Благодатского, Воздвиженского и Михайловского – 0,0020. Из этих данных следует, что наиболее важными источниками теллура являются Почекуевское, Акатуевское и Михайловское, – то есть типичные месторождения нерчинского типа.

В золоторудных месторождениях золото-кварцево-сульфидной формации теллур является важным попутным компонентом. Он входит в состав петцита, алтаита, гессита, теллуроканфильдита. В частности, по данным А.Г. Миронова [Золото Бурятии, 2004], в рудах Каменного месторождения золота на севере Бурятии канфильдиты содержат 20,8–25,2 мас.% теллура, а руды – 0,001–0,5%.

Минералы теллура относительно широко распространены, по данным А.Г. Миронова [Золото Бурятии, 2004], в рудах Таинского месторождения золота. Они присутствуют в кварцевых жилах и представлены гесситом и редким минералом верлитом, здесь сравнительно широко распространенном. Содержание теллура в верлите варьирует от 28,45 до 28,51%, а в гессите – от 36,09 до 37,60%. Однако в связи с отсутствием данных о промышленной значимости этого объекта возможность получения теллура из его руд проблематична.

В рудах Зун-Холбинского месторождения золота в Восточном Саяне также на отдельных его участках присутствуют минералы теллура: тетрадимит, гессит, алтаит и петцит. Содержание теллура составляет 1,6–20 г/т. Но даже при таких высоких содержаниях неравномерность его распределения не дала оснований для включения в число попутных промышленно ценных компонентов.

Анализ приведенного выше материала по теллуроносности главных рудообразующих минералов комплексных медно-молибденовых, золото-полиметаллических и полиметаллических месторождений Забайкалья показывает, что они могут быть промышленно важными источниками теллура.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства теллура?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд теллура редких и редкоземельных элементов.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд теллура в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают теллур?
5. Назовите месторождения и типы руд теллура в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется теллур?

## Литература

### Основная

Виноградов В.Н. Промышленная оценка рассеянных элементов в комплексных рудах. – М.: Недра, 1972.

Иванов В.В. Минеральное сырье. Теллур / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Комплексные месторождения халькофильных редких элементов / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Э.Ф. Минцер и др. – М.: Недра, 1982.

Редкие металлы-спутники: состояние и тенденции развития потребления и производства и сырьевая база за рубежом / В.В. Иванов, Л.Ф. Борисенко и др. – М.: ВИЭМС, 1988.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. III / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Чумаченко Н.М., Полетаев В.В., Свирский М.А. и Кривокобыльский А.С. Важнейшие геологоструктурные особенности рудных полей свинцово-цинковых месторождений Приаргунья / Рудные месторождения Забайкалья и методы их поисков. – Записки Заб. филиала Геогр. общ-ва СССР. – Вып. XCIII. – 1973.

Кузнецов К.Ф., Мейтув Г.М. Геохимия редких элементов в свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья. – М.: Наука, 1967.

## 9.12. Скандий.

### *9.12.1. Свойства.*

Скандий (Sc, III, 21), металл, серебристо-белый, на контакте с воздухом проявляется характерный желтый отлив, мягкий; проявляет амфотерные свойства, литофильный, устойчивая валентность $3^+$. Известен лишь один природный изотоп. Искусственно получено 10 изотопов. Один из них $^{46}Sc$ имеет полураспад 84 сут. Открыт в 1879 г. Л.Ф. Нильсоном. Предсказан в 1870 г. Д.И. Менделеевым.

Плотность 2989 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 736–1200 МПа; температуры плавления 1541° С, кипения – 2831; теплопроводность 15,8 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $61{,}0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $8{,}8 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $10{,}0 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Легко поддается ковке, штамповке, прокатке. Скандий – токсичный элемент (III класс опасности). $ПДК_{р.з}$ 4,0 мг/м$^3$.

### *9.12.2. Распространенность и запасы.*

Кларк скандия земной коры 10 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 5, основных – 24, средних – 2,5, кислых – 3, осадочных (глинах и сланцах) – 16, песчаники – 1, граувакки – 10. Содержание в морской воде – $8 \cdot 10^{-6}$ г/дм$^3$, в речной – $4 \cdot 10^{-6}$. Естественное содержание в почвах 4,0–33 г/т.

Мировые запасы скандия оцениваются в 2,4 тыс. т, годовое производство составляет (без стран СНГ) 0,8–1 тонну. Наиболее крупные производители – США, Норвегия, Бразилия. Пред-

положительно ежегодное производство очищенного оксида скандия до 2000 г. составляло (кг): в США – 500, в Норвегии – 120, во Франции – 100, в КНР – около 60.

### *9.12.3. Области применения.*

Скандий используют для изготовления ферритов для элементов памяти быстродействующих вычислительных машин, в различной компьютерной технике (Ge–Gd–Sc–гранат), Ga–Sc–Gd–гранат используется в производстве лазеров. Радиоактивный изотоп $^{46}Sc$ используется в нейтронно-активационном анализе, медицине и в нефтяном производстве. Сплавы скандия на основе алюминия, с содержанием 0,2–4,0 Sc, имеют прочность в 4 раза большую, чем алюминий, повышенную коррозионную стойкость, обладают небольшой плотностью и высокой температурой плавления, что позволяет использовать их как конструкционные материалы в авиа- и космической технике, в автомобилестроении, оборудовании нефтяных скважин в северных регионах РФ на морском шельфе. Al–Sc сплавы обладают высокой радиационной стойкостью, что позволяет использовать их в термоядерных реакторах. Сплав Mg – 10% Sc перспективен для водородной энергетики. Добавка карбида скандия к карбиду титана повышает твердость последнего до твердости алмаза. Люминофоры на основе скандия используются в мощных ртутных люминесцентных лампах. Ряд соединений скандия широко используется в производстве оксидных катодов, в стекольном производстве и для изготовления спецкерамики. В химической промышленности используется в качестве катализаторов.

### *9.12.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно пять собственных минералов Sc. Среди силикатов известны тортвейтит ($(Sc,Y)_2Si_2O_7$, 37,0–41,9% $Sc_2O_3$, теоретический состав (%) $Sc_2O_3$ – 53,5, $SiO_2$ – 46,5), перрерит ($(Ce,Ca,Sr,Th)_4(Fe,Ti,Sc)_3(TiO_4)_2[Si_2O_7]_2$), содержит до 4,14–3,37%

$Sc_2O_3$) и баццит ($Sc_2Be_3[Si_6O_{18}]$, скандиевый берилл, содержит до 14,44–15,1% $Sc_2O_3$).

Фосфаты представлены стерреттитом ($Sc(PO_4)\cdot 2H_2O$, теоретический состав (%): $Sc_2O_3$ – 39,22, $P_2O_5$ – 40,35, $H_2O$ – 20,43.

Однако эти минералы достаточно редки и за исключением тортвейтита не образуют крупных скоплений.

Промышленное значение имеют относительно распространенные минералы, в которые скандий входит изоморфно. К ним относятся: ильменит (до 0,027% Sc), перовскит ($CaTiO_3$, до 0,003–0,006% Sc), магнетит (0,0005–0,008% Sc), пирохлор ($(Ca,Na,U,TR)_{2-m}(Nb,Ta,Ti)_2O_6(O,F)_{1-n}\cdot nH_2O$, содержит в среднем около 0,05% $Sc_2O_3$), эвксенит ($(Y(Nb,Ti,Ta)_2(O,OH)_6$, содержит до 0,03–0,06% $Sc_2O_3$). Важным источником скандия может быть давидит ($[(Fe^{2+}, La,Ce,U)_2(Ti,Fe^{3+})_5O_{12}]$, содержит до 0,03–0,2 $Sc_2O_3$), актинолит ($(Na, K)_{0-0,85}[(Ca, Mn, Mg)_{2-1,34}Na_{0-0,66}][Mg,Mn,Al,Ti)_{4-2,5}(Fe^{2+}, Fe^{3+})_{1-2,5}]\cdot[(Si_{7,50-7,15}Al_{0,50-0,85})O_{22}](OH,F,Cl)_2$, содержит до 0,02% Sc), керсутит ($NaCa_2(Mg,Fe)_4Ti[Si_6Al_2O_{22}](OH)O$), содержит до 0,0n% Sc), хольмквистит ($Li_2(Mg,Fe)_3Al_2[Si_8O_{22}](OH)_2$, содержит до 0,04–0,1% Sc).

Возможно использовать в качестве сырья для извлечения скандия вольфрамиты, содержащие в среднем 0,003–0,005% Sc, хотя максимальные его значения составляют 0,073–0,26% [Максимюк, 1973]. Содержание скандия в касситеритах находится в пределах 0,005–0,2%. В колломорфном касситерите месторождения Дубровское (Кавалеровский район [Осипова и др., 1976]) содержание скандия определяется лишь в 10% проб и составляет всего 0,0002–0,0020%, кристаллический касситерит этого же месторождения содержит 0,0003–0,0100% Sc. В жилах Смирновского месторождения в Приаргунье, где развиты хорошо окристаллизованные касситериты, содержания скандия составляют 0,0009–0,0208% [Осипова и др., 1976].

Носителем Sc является также и гагаринит ($Na_x(Ca_xTR_{2-x})_2F_6$ или $Na(Y, Ca, Na)_2F_6$). Содержания в нем Sc составляют 0,5–0,7% [Минералогия редких..., 1964]. Известны скандийсодержащие ортиты $(Ca,TR)_2(Al,Fe^{2+},F^{3+})_3[SiO_4][Si_2O_7]O[OH)$, в которых он замещает позиции трехвалентных элементов (0,08–1,0 $Sc_2O_3$) [Минералы, 1972]. Скандий содержится также

в гранатах пиральспитового ряда (до 0,6% $Sc_2O_3$), обычно обогащенных элементами иттриевой группы.

Наибольшую практическую значимость имеют силикаты, оксиды и фосфаты. В месторождениях титаномагнетитов наибольшую практическую значимость могут иметь не титаномагнетиты и ильменит, а ассоциирующие с ними клинопироксены (диопсид, до 0,02% Sc и эгирин до 0,01%). Но в современных условиях основными сырьевыми источниками для получения скандия являются урановосные кварц-биотитовые метасоматиты с давидитовой минерализацией, содержащего, как видно из его формулы, не только уран и скандий, замещающий трехвалентное железо (0,03–0,2 $Sc_2O_3$), но и лантаноиды (Ce, La).

Промышленные типы скандийсодержащих месторождений – магматический, карбонатитовый, пегматитовый, скарновый, грейзеновый, альбититовый, метаморфогенный, экзогенный. Наибольшее значение имеет последний тип, представленный корами выветривания на карбонатитах и габброидах.

По запасам (т) скандия месторождения подразделяют на весьма крупные – сотни тысяч, крупные – десятки тысяч, средние – тысячи, мелкие – сотни и десятки.

Промышленные скандийсодержащие руды – железорудные (в пироксенитах и горнблендитах), титановые (в габброидах), редкоземельные (в пегматитах), вольфрам-оловянные (в грейзенах), урановосные (в метасоматитах и конгломератах), кор выветривания (на карбонатитах и габброидах), россыпные, бокситовые, фосфатные. В Забайкалье прогнозируются первые два типа, а также четвертый и пятый.

Диапазон содержания скандия в рудах различных типов 0,0001–0,06%.

### *9.12.5. Способы добычи и переработки руд.*

Месторождения разрабатывают попутно с основными полезными ископаемыми.

Скандий извлекают преимущественно в виде окислов попутно при гидро- и пирометаллургической переработке воль-

фрамовых, оловянных, титановых, урановых руд и бокситов. Сырьем для получения $Sc_2O_3$ являются растворы, получаемые при обогащении титановых руд, шлаки вольфрамового и оловянного производства, плавы хлорирования титановых руд и растворы известково-хлоридной переработки цирконийсодержащего сырья.

Скандиевые концентраты перерабатывают жидкостной экстракцией и различными способами осаждения с последующим оксалатным прокаливанием. Полученные окислы фторируют или хлорируют при относительно высоких температурах. Металлический скандий получают термохимическим восстановлением хлорида или фторида скандия металлическим кальцием с последующей затем дистилляцией (возгонкой) его в высоком вакууме $133{,}3 \cdot 10^{-6}$ н/м$^2$ (10–6 мм рт. ст.) при 1600–1700° С.

Извлечение скандия из различных побочных продуктов составляет 70–90% при содержании его в концентрате 0,1–5%.

Во всем мире основной продукцией скандия являются металлический скандий и его прокат, лигатура Al–Sc, оксид скандия различной чистоты, содержащий от 99,99 до 99,999% $Sc_2O_3$. Металлический скандий имеет чистоту 99,9%. Вредные примеси в оксиде скандия – оксиды лантаноидов, никель, марганец, кобальт, хром, ванадий, железо, торий.

В РФ скандиевую продукцию получают в ограниченных количествах, так как в СНГ главным производителем ее является Казахстан. В России металлический скандий производят в виде слитков или кристаллического порошка в кристаллах величиной 0,1–2,5 миллиметра. Выпускают также Al–Li сплавы, содержащие более 3% скандия.

### *9.12.6. Возможные источники скандия в Забайкалье.*

На территории Забайкалья, за исключением Шерловой Горы, неизвестны промышленные источники скандия. Однако выполненные в 1991 г. в ЗабНИИ МинГео СССР специализированные НИР (А.Д. Сергеев, Г.А. Юргенсон, Б.А. Гайворонский, Т.Н. Юргенсон, 1991 г.) показали, что в рудах некоторых разве-

данных, отрабатывающихся и законсервированных месторождений скандий присутствует в концентрациях, позволяющих оценивать его как важный попутный компонент. Прежде всего это относится к месторождениям олова и вольфрама.

**Скандиеносность пород и минералов Забайкалья.** В литературе имеются разрозненные отрывочные сведения о скандиеносности пород и минералов Забайкалья. В качестве примеров скандиеносных месторождений приводятся забайкальские объекты: Байц-Кундуй – плагиоклаз-микроклин-биотит-редкометалльный пегматитовый, альбит-сподуменовые пегматиты Борщовочного кряжа [Борисенко, 1961] и др. Имеются сведения о содержаниях скандия в гранитоидах Кукульбейского комплекса. В частности, повышенные содержания скандия установлены в гранитах Этыкинского месторождения, гранодиоритах Белухи и др. [Борисенко, 1961]. Имеются данные о концентрациях скандия в вольфрамитах Букуки, Белухи, Антоновой Горы и др., касситеритах забайкальских месторождений кварцево-касситеритовой и сульфидно-касситеритовой формаций [Борисенко, 1961; Борисенко, Комисарова, 1989; Средние содержания..., 1973], касситеритах из пегматитов Борщовочного хребта. Содержание скандия в касситеритах из пегматитов Борщовочного хребта достигает 1660 г/т по 13 анализам. Высокие содержания скандия выявлены в ферберитах Шерловой Горы, Барун-Шивии, в гюбнерите Джидинского месторождения вольфрама.

**Кручининское месторождение железо-титан-фосфорных руд.** Габброиды массива наиболее близки к титано-ванадиевому редкометалльному геохимическому типу габбро-пироксенитовой и габбро-пироксенит-перидотитовой формации Ю.А. Кузнецова. Верлиты Ангашанского массива относят к гипербазитам железистого типа габбро-пироксенитовой формации (по О.Н. Глазунову).

Обработка всех аналитических данных по группам горных пород показала (табл. 9.16), что минимальны содержания скандия в гранитоидах ($\overline{x}$ = 6 г/т), максимальны – в пироксенитах ($\overline{x}$ = 41 г/т) и амфиболизированных габбро и пироксенитах ($\overline{x}$ = 66 г/т). Концентрация скандия в богатых рудах

Таблица 9.16

**Содержание скандия во вмещающих горных породах и руде Кручининского месторождения (г/т)**

| Разновидность | Содержание скандия | | |
|---|---|---|---|
| | n | $\bar{x}$ | σ |
| Гранитоиды | 10 | 6 | 5 |
| Анортозит | 13 | 19 | 12 |
| Лейкогаббро | 14 | 22 | 18 |
| Габбро | 88 | 33 | 21 |
| Пироксенит | 63 | 41 | 25 |
| Амфиболизированные габбро и пироксениты | 18 | 66 | 21 |
| Богатая титаномагнетитовая руда | 39 | 18 | 16 |

($\bar{x}$ = 18 г/т). Полученная картина распределения скандия вполне закономерна, так как основными его концентраторами, согласно [Борисенко, Комисарова, 1989], являются клинопироксены и амфиболы. Титаномагнетиты, как видно из табл. 9.17, содержат в среднем 14 г/т скандия и не вносят существенного вклада в суммарную концентрацию этого элемента в рудах и вмещающих их породах. Весьма незначительную роль играют также апатит и сфен, для которых характерны как низкие их содержания в рудах и породах (соответственно, ≥ 3,8 и 8,5% от веса тяжелой фракции), так и отсутствие заметных концентраций скандия (см. табл. 9.17 ).

В целом по средним содержаниям скандия в рудоносных пироксенитах ($\bar{x}$ = 41 г/т, σ = 25) и амфиболизированных габбро и пироксенитах, локализованных в пределах рудных тел ($\bar{x}$ = 66 г/т при σ = 21), подлежащая добыче горная масса представляет собою объект, сопоставимый с извлекаемой горной массой Кусинского месторождения на Урале, содержания скандия в которой находятся в пределах 30–50 г/т.

Таблица 9.17

**Содержания скандия в мономинеральных фракциях изученных месторождений (г/т)**

| Минерал | Месторождение, статистические параметры концентраций | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Кручининское титаномагнетитовое | | | Верхне-Нарымское титаномагнетитовое | | | Каменско-Черновское пегматитовое поле | | |
| | n | $\bar{x}$ | σ | n | $\bar{x}$ | σ | n | $\bar{x}$ | σ |
| Титаномагнетит | 27 | 14 | 9 | 1 | 20 | – | – | – | – |
| Магнетит | – | – | – | 1 | 10 | – | – | – | – |
| Апатит | 3 | 4 | 1 | – | – | – | – | – | – |
| То же | 1 | 20 | – | | | | | | |
| Сфен | 2 | 4 | 1 | – | – | – | – | – | – |
| Амфибол | – | – | – | 5 | 116 | 64 | – | – | – |
| Берилл | – | – | – | – | – | – | 2 | 4 | 1 |
| Мусковит | – | – | – | – | – | – | 2 | 1,5 | 1 |
| То же | | | | | | | 1 | 30 | – |
| Лепидолит | – | – | – | – | – | – | 3 | ≤1 | ≤0,3 |

**Верхне-Нарымское титаномагнетитовое месторождение.** Верхне-Нарымское (Аленгуйское) месторождение титаномагнетита (И.Н. Фомин, В.И. Бурба, 1965 г.) находится в верховье второго левого (вниз по течению) притока ручья Средняя Суханка в 11 км западнее села Верхний Нарым. Оно локализовано в массиве габброидов (рис. 9.22), вытянутом в северо-восточном направлении на 3 км, при средней ширине 0,4–0,8 километров. Все разновидности габброидов, среди которых выделяются габбро, габбро-нориты, нориты, габбро-пироксениты, диориты, габбро-диориты, содержат то или иное количество рудных минералов – ильменита, титаномагнетита, апатита. Наибольшие их концентрации приурочены к норитам и пироксенитам, развитым в центральной части массива. В рудных телах содержание титаномагнетита в среднем составляет 30%, повышаясь до 60%. В массиве выделено семь слоев

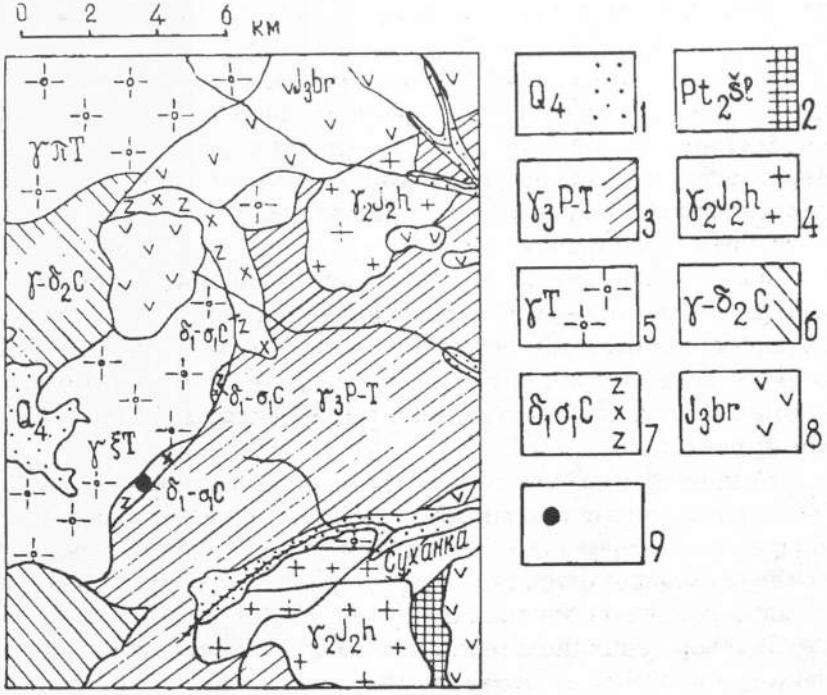



Рис. 9.22. Геологическая карта района Верхне-Нарымского (Аленгуйского) месторождения титаномагнетитов со скандием. По И.Н. Фомину и др. (1960 г.)

*1 – современные отложения. Аллювиальные пески и галечники; 2 – шильниковская толща – биотитовые сланцы и биотитовые плагиогейсы; 3 – порфировидные биотитовые граниты; 4 – харалгинский интрузивный комплекс: среднекрупнозернистые лейкократовые граниты и гранит-порфиры; 5 – куналейский интрузивный комплекс: щелочные среднезернистые и неравномернозернистые граниты, щелочные порфировидные граниты, субщелочные граниты, гранит-порфиры, сиенит-порфиры; 6 – биотитовые роговообманковые граниты, гранодиориты, кварцевые диориты; 7 – диориты, габбро-диориты, габбро, габбро-нориты, редко габбро-пироксениты и пироксениты; 8 – бырцинская свита; андезибазальты, андезитовые порфириты, кварцевые и кварц-содержащие порфиры, туфолавы; 9 – Верхне-Нарымское месторождение.*

густовкрапленных и сплошных руд. Мощность их варьирует от 0,15 до 1,5 м, реже 5 метров.

В юго-восточном теле, мощностью до 15 м, отобрано вкрест его простирания по коренным выходам и высыпкам старых канав 30 проб. Рудное тело имеет полосчатое строение. Чередуются полосы амфибол-пироксенового габбро, габбро-пироксенитов, содержащих примесь магнетита и титаномагнетита, образующего тесные срастания с ильменитом, и массивных магнетит-титаномагнетитовых руд. Особенностью всех разновидностей габброидов является различная степень их амфиболизированности. Установлено, что этот процесс широко распространен и выражен в развитии железистого актинолита преимущественно в пироксеновом габбро и габбро-пироксенитах.

Концентрации скандия контрастно различаются в амфиболовых и амфиболизированных породах, с одной стороны, и не содержащих амфибола – с другой (табл. 9.18). Размах содержаний его в амфиболизированных породах составляет 10–100 г/т, в безамфиболовых породах и в руде – 1–50 г/т.

В северо-западном рудном теле со стороны его юго-восточного контакта развиты биотит-роговообманковые гранодиориты, переходящие в крупнозернистое амфиболовое и амфиболизированное габбро. В непосредственной близости от рудной залежи процессы амфиболизации интенсифицируются. Непосредственно в богатой магнетит-титаномагнетитовой руде присутствуют зоны в различной степени амфиболизированных пироксенового габбро, габбро-пироксенита и пироксенита.

Со стороны северо-западного контакта рудного тела развиты амфиболовые габбро и габбро-пегматиты.

Максимальные концентрации скандия установлены в амфиболовом габбро и в других амфиболизированных породах (см. табл. 9.18). Они составляют 50–200 г/т. Минимальные содержания скандия – в гранодиоритах (2–30 г/т). Богатые магнетит-титаномагнетитовые руды со слаборазвитой актинолитизацией содержат 1–5 г/т скандия. Амфиболсодержащие руды обогащены скандием и содержат от 30 до 100 г/т. Средние содержания скандия в существенно амфиболовых агрегатах в

Таблица 9.18

**Содержание скандия в горных породах и рудах опробованных тел Верхне-Нарымского месторождения**

| Горная порода | Содержание скандия, г/т, рудные тела | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | юго-восточное тело | | | северо-западное тело | | | среднее по двум телам | | | северо-восточное выклинивание | | |
| | n | $\bar{x}$ | $\sigma$ | n | $\bar{x}$ | $\sigma$ | n | $\bar{x}$ | $\sigma$ | n | $\bar{x}$ | $\sigma$ |
| Пироксеновое габбро, габбро-пироксениты, габбро-анортозиты | 12 | 20 | 13 | 1 | 10 | – | 13 | 20 | 13 | 1 | 30 | – |
| Амфиболовое габбро и Амфиболизированные породы | 8 | 60 | 36 | 19 | 86 | 35 | 27 | 79 | 37 | 10 | 54 | 15 |
| Магнетит-магнетитовая руда | 13 | 18 | 19 | 7 | 31 | 47 | 27 | 22 | 30 | – | – | – |
| Гранодиориты и диориты | – | – | – | 5 | 13 | 12 | 5 | 13 | 12 | 12 | 11 | 9 |

рудах составили 120 г/т, что выше среднего по пироксенитам в 3 раза и по габбро – в 4 раза.

Сравнение пределов содержания скандия в рудах и рудоносных породах Верхне-Нарымского месторождения (10–200 г/т) с таковыми Гусевогорского и Первоуральского на Урале (70–130 г/т) указывает на их сходство. Близки содержания скандия и в породообразующих силикатах, в частности, в амфиболах: 116 г/т (среднее содержание) в Верхне-Нарымском и 50–200 г/т (среднее 125 г/т) в Гусевогорском и Первоуральском месторождениях. Титаномагнетит Верхне-Нарымского месторождения содержит 20 г/т скандия, что сопоставимо с данными (Борисенко, Комисарова, 1989) по промышленным месторождениям Урала (10–40 г/т).

По данным этих же авторов, на долю силикатов в рудах приходится 80–90% скандия, и он накапливается в хвостах обогащения, где содержание его составляет 100–110 г/т. Учитывая перемежаемость линз титаномагнетитовых руд с вмещающими амфиболизированными габброидами, при отработке Верхне-Нарымского месторождения в составе добываемой горной массы будут находиться все носители скандия и поэтому в зависимости от соотношения рудных минералов и амфиболов (и амфиболизированных клинопироксенов) скандий будет накапливаться либо в титаномагнетитовых концентратах, агломератах и окатышах и шлаках, либо в хвостах обогащения.

Опробование зоны перемежаемости габброидов и гранитоидов на ее выклинивании в правом борту ручья Малая Суханка показало, что содержания скандия в габброидах практически не зависят от титаномагнетитового оруденения и составляют 30–70 г/т при среднем содержании 54 г/т. Среднее для гранитоидов составляет 11 г/т (см. табл. 9.18).

Практически собственно скандиевое оруденение в габброидах не может определить целесообразности отработки этой части месторождения, если в качестве основного компонента в нем не присутствуют промышленные концентрации железа и титана.

**Скандиеносность редкометалльных и оловянно-вольфрамовых месторождений.** В табл. 9.19 суммированы основные сведения в части скандиеносности редкометалльных и оловянно-вольфрамовых объектов Забайкалья в пределах Читинской области (А.Д. Сергеев и др., 1991 г.). Указанная информация характеризует скандиеносность более трех десятков месторождений и рудных проявлений, включая ряд наиболее значительных промышленных объектов, являющихся сырьевой базой действующих горнорудных предприятий или перспективных геолого-промышленных типов.

Наиболее интересны промышленные – до 200–500 г/т – содержания скандия в касситерите из грейзенизированных пегматитов Еловского пегматитового поля. В отношении практического значения олова пегматиты этого поля окончательно не оценены. Но в них находятся ресурсы кристалло- и камнеса-

Таблица 9.19

**Содержание скандия в горных породах, рудах и минералах редкометалльных месторождений Забайкалья**
(По: А.Д. Сергеев и др., 1991 г.)

| Месторождение, рудное поле, массив. Тип руд, горных пород и минеральных ассоциаций | Минерал, горная порода | Число проб | Содержание скандия (пределы колебаний и среднее), г/т | Источник данных |
|---|---|---|---|---|
| **Еловское,** пегматит | Касситерит | 2 | 200–500 | А.Д. Сергеев, Б.А. Гайворонский, 1991 г. |
| **Этыкинское,** лепидолит-альбитовая ассоциация | Горная порода | 1 | 20 | То же |
| То же | Лепидолит | Н. д. | 10–30 | А.А. Ситин, 1962 г. |
| То же | Колумбит | Н. д. | 750–1800 | То же |
| То же | Микролит | Н. д. | 20 | То же |
| То же | Касситерит | Н. д. | 210 | То же |
| То же | Циркон | Н. д. | 200–500 | То же |
| Колумбитовый концентрат | | 1 | 1260 | Митнев, 1961 г. |
| Микролитовый концентрат | | 1 | 120 | То же |
| Магнитная фракция гравитационного концентрата | | 1 | 560 | То же |
| Колумбит-микролитовый концентрат | | 1 | 400 | То же |
| Руда | Касситерит | 5 | 200–400 | А.Д. Каленов, 1957 г. |
| То же | То же | 1 | 660 | [Борисенко, 1969] |
| **Спокойнинское** | Касситерит | 9 | 3 | [Воронина, 1979] |
| Кварцевые жилы, грейзены | Вольфрамит | 7 | (30–40)/34 | Л.Ф. Сырицо, 1989 г. |

*Продолжение на с. 146*

Таблица 9.19 (продолжение)

| Месторождение, рудное поле, массив. Тип руд, горных пород и минеральных ассоциаций | Минерал, горная порода | Число проб | Содержание скандия (пределы колебаний и среднее), г/т | Источник данных |
|---|---|---|---|---|
| **Будюмканское** | Касситерит | 2 | 0,0n% | Е.И. Доломанова, 1969 г. |
| Касситерит-кварцевые руды | То же | 4 | (20–130)/65 | |
| **Россыпь Очудогда** | Касситерит | 1 | 100 | А.Д. Сергеев, Б.А. Гайворонский, 1991 г. |
| **Ушмунское** | | | | |
| Касситерт-кварцевые руды | Касситерит | 2 | 3–40 | То же |
| **Лево-Ингодинское** | Руды | 2 | 100 | С.А. Аксенова, 1960 г. |
| Руды (валовый состав) | То же | 2 | 100 | То же |
| Рудная брекчия | То же | 1 | 30 | То же |
| Рудная зона прожилков | То же | 1 | 30 | То же |
| Галенитовая зона | Касситерит | 3 | 110–130 | То же |
| Руды | Вольфрамит | 2 | 100–300 | Е. И Доломанова, 1959 г. |
| Руды | Касситерит | 2 | 200–800 | То же |
| **Ингодинское** | | | | |
| Руды | Касситерит | 3 | 10–65 | С.А. Аксенова, 1965 г. |
| **Букукунское** | | | | |
| Руды | Касситерит | 5 | (42–300)/128 | А.Д. Сергеев, Б.А. Гайворонский, 1991 г. |

*Продолжение на с. 147*

Таблица 9.19 (продолжение)

| Месторождение, рудное поле, массив. Тип руд, горных пород и минеральных ассоциаций | Минерал, горная порода | Число проб | Содержание скандия (пределы колебаний и среднее), г/т | Источник данных |
|---|---|---|---|---|
| **Шерловогорское** | | | | |
| Кварц-турмалин-сульфидные руды в карьере | | | | |
| Сопка Большая | Касситерит | 6 | (3–650)/238 | То же |
| То же в диоритах | То же | 14 | (64–530)/189 | [Осипова, 1980] |
| То же в эксплозивных брекчиях | То же | 8 | (3–150)/48 | То же |
| То же | То же | 23 | (7–650)/72 | То же |
| То же в кварцевых порфирах | То же | 13 | (3–31)/7 | То же |
| Руды в диритовых порфирах | | | | |
| участок I | То же | 12 | 189 | То же |
| участок III | То же | 7 | 93 | То же |
| Руды в эксплозивной брекчии | | | | |
| участок II | То же | 4 | 44 | То же |
| участок III | То же | 8 | 98 | То же |
| Восточный участок | То же | 13 | 7 | То же |
| В среднем по карьеру: | | | | |
| руды в диоритовых порфиритах | То же | 22 | 139 | То же |
| руды в эксплозивных брекчиях | То же | 12 | 80 | То же |
| руды в кварцевых порфирах | То же | 5 | 6 | То же |
| Кварцевые жилы | То же | 3 | 25 | [Воронина, 1979] |
| Грейзены | Вольфрамит | 15 | (50–700)/490 | С.А. Аксенова, 1960 г. |
| То же | Касситерит | 3 | 200 | То же |
| Руды Сопка Большая | Вольфрамит | 9 | (130–400)/260 | То же |
| | Касситерит | 17 | 100 | То же |
| Россыпи Шерловой Горы | Вольфрамит | 8 | 229 | То же |
| | Касситерит | 14 | 100 | То же |

*Окончание на с. 148*

Таблица 9.19 (окончание)

| Месторождение, рудное поле, массив. Тип руд, горных пород и минеральных ассоциаций | Минерал, горная порода | Число проб | Содержание скандия (пределы колебаний и среднее), г/т | Источник данных |
|---|---|---|---|---|
| **Хапчерангинское** | | | | |
| Кварцевые жилы с сульфидами | То же | 3 | 120 | А.Д. Каленов, 1957 г. |
| Жила Войнова | То же | 3 | 140 | А.С. Калинин, 1957 г. |
| Жила Террасовая | То же | 3 | 100 | То же |
| Жила Параллельная | То же | 13 | 90 | То же |
| Жила Буровая | То же | 3 | 80 | То же |
| Касситерит-сульфидные руды | Сфалерит | 50 | (80–140)/100 | Л.Ф. Сырицо, 1980 г. |
| **Тарбальджейское** | Вольфрамит | 2 | 100–300 | С.А. Аксенова, 1960 г. |
| | Касситерит | 2 | 200–800 | То же |
| | То же | 1 | 50 | А.Д. Сергеев, Б.А. Гайворонский, 1991 г. |
| **Курултейское** | | | | |
| Россыпь | То же | 4 | (58–65)/63 | [Воронина, 1979] |
| **Букука** | Касситерит | 1 | 100 | То же |
| Грейзены в гранитах | | | | |
| **Барун-Килькинда** | Вольфрамит | 1 | 300 | А.Д. Каленов, 1977 г. |

моцветного сырья, что создает предпосылки для ревизионного опробования не только на него, но и на скандий.

Судя по всем данным, основные промышленные концентрации скандия в редкометалльных образованиях Этыкинского и Орловского массивов редкометалльных гранитов связаны с колумбитом – до 750–1800 и 1260 г/т в колумбитовом концентрате. В меньшей степени концентраторами скандия являются: касситерит – 210 (по другим данным – 200–400) г/т, циркон – 200–500 г/т и еще меньше – вольфрамит, литиевые слюды и слюдистые метасоматиты – 10–30 г/т. В пиральспите Орловского месторождения, входящем в состав концентрата, получаемого на концентрационных столах, содержится 50 г/т скандия и 1000 г/т иттрия. Преимущественная связь скандия в подобных месторождениях с тантало-ниобатами косвенным образом подтверждается также тем, что, по литературным данным, в ряде случаев концентрация скандия в касситерите и вольфрамите коррелируется с уровнем содержания в них примесей тантала и ниобия. В зонально окрашенных касситеритах максимальные содержания скандия характерны для темноокрашенных зон, окраска которых связана, в частности, с микровключениями тапиолита [Касситерит и его..., 1969].

Электронно-зондовое исследование образцов вольфрамита Спокойнинского месторождения [Формы нахождения..., 1989] позволило выделить 3 формы нахождения скандия в вольфрамите: изоморфная примесь в вольфрамите, собственная микроминеральная аморфная фаза (скорее всего – гидратная форма оксида скандия) и сорбционная в гидрослюдах. Среднее содержание скандия в вольфрамитовом концентрате составляет 30 г/т.

Последняя сорбционная форма, по-видимому, является основной формой концентрации скандия в слюдах и минералах каолинитовой группы и соответствующих метасоматитах редкометалльных и других месторождений.

Таким образом, реализация промышленной скандиеносности Этыкинского и Орловского олово-вольфрам-танталоносных месторождений, связанных с массивами редкометалльных гранитов («апогранитов»), может быть обеспечена, в основном,

вместе с решением технологических проблем эффективного извлечения рудных тантало-ниобиевых концентратов и оптимизации их дальнейшей переработки с извлечением скандия из основных минералов-концентраторов, включая возможную оптимальную утилизацию побочных продуктов технологического процесса с относительно невысоким содержанием скандия в слюдах и др. В частности, дальнейшая разработка эффективных технологических схем экстракционного или сорбционного получения окиси скандия из продуктов танталового производства, без сомнения, позволит улучшить экономические показатели рудника, действующего на базе Этыкинского месторождения.

Из месторождений касситерит-кварцевой формации максимальные, до практически интересных, содержания скандия установлены в касситерите (до 200–800 г/т) и вольфрамите (100–300 г/т) Лево-Ингодинского месторождения (до 100 г/т в рудах) и касситерите Будюмканского месторождения (до 130 г/т в минерале из рудных тел и 100 г/т – из россыпей). Отмеченные в табл. 9.19 существенные колебания содержаний скандия в пределах 20–130 г/т соответствуют образцам касситерита от светлой до темно-коричневой окраски, связанной, по-видимому, с различным содержанием в касситерите микровключений тантало-ниобатов и других минералов.

Высоким содержанием скандия характеризуется также касситерит Букукунского месторождения – 42–300 г/т, в среднем 128 г/т.

Будюмканское и Лево-Ингодинское оловорудные месторождения до настоящего времени остаются в числе недостаточно изученных и имеют необходимые предпосылки в недалеком будущем перейти в разряд промышленных рудных объектов. В связи с этим в ходе дальнейших геологоразведочных работ и технологических испытаний необходимы учет и оценка запасов примеси скандия, в качестве ценного попутного компонента в касситерите, вольфрамите и, возможно, других рудных минералах.

В Шерловогорском рудном поле максимальные концентрации скандия установлены в рудоносных грейзеновых обра-

зованиях Шерловой Горы – в вольфрамите до 700 г/т, в среднем 490 г/т, в касситерите – до 200 г/т. В россыпях Лукавая, Заводская и других содержание скандия в этих минералах, соответственно, в среднем до 229 и 100 г/т (табл. 9.19). В сидерофиллитовых грейзенах и экзоконтактовых роговиках Шерловогорского гранитного массива содержание скандия – до 30 г/т.

Распределение содержаний скандия в касситеритах в карьере месторождения Сопка Большая детально изучено Г.А. Осиповой (1980) на базе количественного микроспектрального анализа. По этим данным уровень среднего содержания скандия в касситерите из кварц-турмалин-сульфидно-касситеритовых руд дифференцирован в зависимости от состава вмещающих пород: максимальные содержания в диоритах – до 503 г/т, в среднем – 189 г/т, в эксплозивной брекчии – до 150–650 г/т, в среднем 48–72 г/т по разным выборкам и минимальные в кварцевых порфирах – до 3–31 г/т, в среднем – 7 г/т. Соответственно этому изменяется и содержание скандия на различных участках месторождения, резко уменьшаясь в полиметаллических рудах Восточного поля. Среднее содержание скандия в габбродиоритах – до 35 г/т, в турмалиновых брекчиях кварцевых порфиров – до 7,5 г/т, в роговиках – до 10 г/т, то есть до известной степени содержание скандия в касситерите коррелируется с его содержанием во вмещающих породах.

Относительно формы вхождения скандия в касситерит Г.А. Осиповой установлены парные корреляционные связи скандия с титаном, ниобием, железом, марганцем, ванадием, цирконием и др., что, по-видимому, обусловлено микровключениями скандийсодержащих ильменита, рутила, анатаза, тапиолита, колумбита.

По результатам систематического опробования в пределах Шерловогорского рудного узла отмечается повышенная скандиеносность различных осадочно-метаморфических и интрузивных пород: в палеозойских сланцах и роговиках – до 20–50 г/т, в гранитоидах и грейзенах кукульбейского интрузивного комплекса на отдельных участках – до 20–30 г/т и в палеозойских диоритах – наиболее высокие содержания скандия – до 50–60 г/т (по некоторым сведениям – до 100–120 г/т).

Содержание скандия в концентратах Шерловой Горы – 0,01%. По данным ГИРЕДМЕТа (Г.А. Мельников, 1960 г.), скандий в процессе металлургической переработки полностью переходит в шлак, из которого извлекается кислотным способом. Извлечение его составляет 45–60%. Для руд Шерловогорского месторождения ГИРЕДМЕТом разработан метод прямого хлорирования скандия газообразным хлором. Извлечение Sc из концентратов, содержавших его в количестве 0,005–0,01%, составляет 10% в продукт с содержанием 5% Sc. При получении чистой $Sc_2O_3$ извлечение снижается до 8%.

В пределах Хапчерангинского рудного узла содержание скандия в касситерите из различных оловорудных жил и по данным различных авторов колеблется в широких пределах – от 11–15 до 200–800 г/т. Наиболее высокие содержания отмечены для руд Тарбальджейского месторождения. Существенно также установленное здесь для большой группы (50 проб) высокое содержание скандия в сфалерите – от 80 до 140 г/т, в среднем – 100 г/т. Поскольку перспективы поисков новых промышленных объектов в этом рудном узле, в основном, связаны с олово-полиметаллическими касситерит-сульфидными рудами (Харатуйское, Южно-Харатуйское и др. месторождения), их вероятная высокая скандиеносность, по-видимому, также должна оставаться объектом особого внимания.

По данным А.Д. Сергеева и др. (1991 г.), особое значение может иметь изучение скандиеносных турмалинитов. Не исключено, что подобные образования могут оказаться новым специфическим типом скандийсодержащего сырья. По данным Л.Ф. Борисенко, содержание скандия в турмалине может достигать 0,5%. Из литературы известно также, что содержание скандия в турмалине возрастает от месторождений пегматитовой и касситерит-кварцевой и касситерит-силикатно-сульфидной формации. В частности, в турмалине из фенакит-флюорит-турмалиновых метасоматитов Студеного редкометалльного (бериллиевого) месторождения, связанного с Лубиинским массивом, содержание скандия – 130 г/т. В турмалине из шеелитоносных и бериллиеносных кварц-флюорит-турмалиновых метасоматитов и брекчий Каменского

рудопроявления, локализованного в зоне обрамления Борщовочного гранито-гнейсового купола и связанного с гранитами борщовочного комплекса, содержание скандия составляет от 100 до 300 г/т, в среднем – 200 г/т. В связи с этим интересны также минерализованные зоны оловоносных турмалинитов в пределах Аркиинского, Булугьинского, Таловско-Богдатского и других рудных полей. Турмалиновые брекчии и метасоматиты широко распространены также в составе ряда золоторудных полей Забайкалья.

Высокая скандиеносность турмалинитов бериллиеносных образований Студеного и Каменского месторождений не случайна. Тесная геохимическая и генетическая связь скандиеносных образований с литий-бериллиеносными провинциями и объектами отмечена в литературе (гидротермально-измененные туфы месторождения Томас-Рейндж в Западных Штатах США и др.). Более того, существует, видимо, генетическая связь бериллия и скандия, так как именно скандиеносный баццит распространен на некоторых бериллиевых месторождениях.

Б.А. Гайворонским высокие содержания скандия – 20–50 до 100 г/т выявлены в палеозойских диоритах и габбро-диоритах участка пади Ветошной, развитых в южной экзоконтактовой части Соктуйского гранитного массива кукульбейского интрузивного комплекса на площади 300 х 400 метров. Измененные разности диоритов приурочены к участкам скопления даек гранит-порфиров, липаритов и фельзитов и характеризуются более высокими содержаниями скандия (50–100 г/т).

Ориентировочная оценка общих прогнозных ресурсов скандия в массиве скандиеносных диоритов участка пади Ветошная, по Б.А. Гайворонскому, без поправок на извлекаемость, показывает, что для участка площадью 120 000 м$^2$ с содержанием скандия в породе 50 г/т, на глубину до 5 м, составят 900 т скандия.

В технологической пробе Булуктуевского редкометалльного месторождения содержание скандия составляет 20 г/т. Основная масса скандия связана с вольфрамитом (100 г/т) и синим бериллом (100 г/т). В гранитах содержание на порядок меньше (10 г/т), в шеелите он не обнаружен.

Промышленные концентрации скандия установлены в рудах Шерловогорского рудного поля еще в процессе его разведки. ГКЗ СССР по категории $C_2$ были утверждены запасы его в количестве 15 т при среднем содержании в руде 0,2 г/т. Содержание скандия в вольфрамитах составляет 0,026%, в касситеритах – 0,01%. В связи с тем, что к настоящему времени отработано более 50% запасов месторождения, можно принять, что в недрах осталось порядка 7 т скандия. По данным ЗабНИИ (В.Г. Васильев, Ю.Ф. Харитонов, 2002 г.), объем хвостов обогащения в хвостохранилище составляет 17617,3 тыс. т, забалансовых оловянных руд – 133587 тыс. т и отвалы бедных руд – 1430 тыс. т. Исходя из содержания скандия 0,2 г/т, получены цифры запасов (табл. 9.20).

Таблица 9.20

**Запасы скандия в техногенных образованиях и отвалах руды Шерловогорского ГОКа**

| Виды скоплений техногенного сырья | Содержание скандия, г/т | Масса техно-генного сырья, тыс. т | Запасы скандия, т |
|---|---|---|---|
| Хвостохранилище | 0,2 | 17617,3 | 352,346 |
| Забалансовые оловянные руды | 0,2 | 13358,7 | 267,174 |
| Отвалы бедных оловянных руд | 0,2 | 1430 | 28,6 |
| Итого: | | | 648,12 |
| Неотработанная руда в недрах | | | 7,0 |
| Всего: | | | 655,12 |

Согласно табл. 9.20, общие запасы скандия в Шерловогорском олово-полиметаллическом месторождении составляют 655,12 т. В случае разработки экономически выгодной технологии переработки указанных лежалых хвостов и складов бедных руд при извлечении 10% можно получить попутно 64,812 т скандия. С учетом цены скандия 18000 американских долларов за 1 кг (цены 1998–1999 гг.) можно оценить стоимость полученного продукта в пределах 1167 млн. долларов США.

Общие запасы и ресурсы скандия Кручининского месторождения при среднем его содержании в титаномагнетитовых рудах 18 г/т и запасах руды около 700 млн. т могут составить 12600 тонн.

Таблица 9.21

**Средние содержания скандия в породах некоторых геологических подразделений Читинской области**
(по Напартэ, 1983)

| № пп. | Наименование подразделения | Порода | Среднее содержание скандия | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | в кларках | кларк для данной группы пород $n \cdot 10^{-3}$% | в г/т |
| 1. | Базинская свита | Вулканогенные породы основного состава | 18,52 | 2,7 | 500 |
| 2. | Зуткулейская свита | Песчаники, алевролиты, вулканогенные породы среднего состава | 14,0–28,0 | 0,1 | 28 |
| 3. | Куналейская свита | Песчаники, сланцы, карбонатные породы | 14,2–25,3 | 0,1 | 25 |
| 4. | Номоконовская свита | Грубозернистые породы, песчаники | 26,0 | 0,1 | 26 |
| 5. | Рябиновская свита | Песчаники, алевролиты, сланцы | 30,0 | 0,1 | 30 |
| 6. | Цаган-Хунтейская свита | Андезиты, базальты | 11,85 | 2,7 | 3,20 |
| 7. | Цаган-Хунтейская свита | Липарито-дациты | 12,8 | 0,5 | 64 |
| 8. | Амананский комплекс | Амфибол-биотитовые гранодиориты | 20,97 | 0,62 | 130 |
| 9. | Амананский комплекс | В целом | 12,9 | 0,62 | 80 |
| 10. | Даурский комплекс | Диориты | 10,81 | 0,62 | 67 |
| 11. | Шахтаминский комплекс | Гранит-порфиры | 14,0 | 0,5 | 70 |
| 12. | Шахтаминский комплекс | Микродиориты | 20,0 | 0,62 | 124 |

В целом, если учесть все приведенные выше данные о скандиеносности руд и минералов некоторых месторождений, на территории Забайкалья можно ожидать промышленные запасы и ресурсы этого рудного элемента порядка 13 тыс. тонн.

В.А. Напартэ в 1983 г. выполнил сравнительный анализ содержания скандия в различных вулканогенных, вулканогенно-осадочных и интрузивных комплексах Забайкалья. Результаты его исследований сведены в табл. 9.21. Из нее видно, что по сравнению с кларками резко обогащены скандием эффузивы базинской свиты (500 г/т), андезиты и базальты цаган-хунтейской свиты (320 г/т), в целом амананский и шахтаминский интрузивные комплексы (70–130 г/т).

По данным «Читанедра» запасы скандия составляют всего 6,5 тонны. Это то, что числится в рудах Шерловой Горы. Стоимость этого скандия оценивается в 60287 млн. рублей.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства скандия?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд скандия.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд скандия в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают скандий?
5. Назовите месторождения и типы руд скандия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется скандий?

## Литература

### Основная

Борисенко Л.Ф., Комиссарова Л.Н. Минеральные источники скандия и технология его извлечения. – М.: ВИЭМС, 1989.

Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. Методические рекомендации по перспективной оценке различных типов скандийсодержащего сырья. – М.: ИМГРЭ, 1991.

Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. Минеральное сырье. Скандий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Минеральное сырье. Рубидий и цезий / А.А. Кременецкий, Т.П. Линде, А.Юшко и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Бурков В.В. Литофильные редкие элементы в корах выветривания. – М.: ИМГРЭ, 1996.

Коршунов Б.Г., Резник А.М., Семенов С.А. Скандий. – М.: Металлургия, 1987.

**Дополнительная**

Осипова Г.А., Азарова Л.И., Бутенко Л.А. Элементы-примеси в касситеритах различной модификации и окраски / Минералогия и генезис месторождений Приморья и Приамурья. – Владивосток, 1976.

Осипова Г.А. Колломорфный касситерит в оловорудных жилах месторождения Дубровское (Кавалеровский район) / Минералогия и генезис месторождений Приморья и Приамурья. – Владивосток, 1976.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. II. / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

## 9.13. Цирконий.

### *9.13.1. Свойства.*

Цирконий (Zr, IV, 40), металл, серебристый, твердый; проявляет основные свойства, литофильный, устойчивая валентность $4^+$.

Плотность 6506 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 638–687 МПа; температуры плавления 1852° С, кипения – 4377; теплопроводность – 22,7 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $42{,}1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $1{,}68 \cdot 10^{-8}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $5{,}78 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Сечение захвата тепловых нейтронов $(0{,}18 \pm 0{,}004) \cdot 10^{-28}$м$^2$. Температура перехода в состояние сверхпроводимости 0,7 К. Устойчив к коррозии.

Цирконий – высокотоксичный элемент (II–III классы опасности); ПДК$_{р.з}$ Zr – 6,0 мг/м$^3$, нитридов Zr – 4,0, фторцирконатов – 1,0 мг/м$^3$, ПДК$_{в.р}$ $Zr^{4+}$ – 0,07 мг/дм$^3$.

### *9.13.2. Распространенность и запасы.*

Кларк циркония земной коры 170 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 30, основных – 100, средних – 260, кислых – 200, осадочных (глинах и сланцах). Естественное содержание в почвах 180–500 г/т.

Мировые подтвержденные запасы циркония 52 млн. т $ZrO_2$. Ежегодное производство составляет около 7 тыс. тонн. Наиболее крупные производители – Австралия, ЮАР. В России запасы составляют 60% от запасов стран СНГ.

### *9.13.3. Области использования.*

Цирконий используется, в основном, в составе сплавов как конструкционный материал в строительстве ядерных реакторов, в ракетостроении, в химическом машиностроении, металлургии, в пиротехнике, производстве боеприпасов, кожевенной промышленности, электронике. Сплавы Zr1Nb и Zr2,5Nb используются для оболочек твэлов, кассет и каналов реакторов атомных электростанций. Сплавы циркония на основе магния, титана, никеля, молибдена и ниобия используются как конструкционный материал для ракет и других летательных аппаратов. Из сплавов циркония с ниобием делают обмотки сверхпроводящих магнитов. Цирконистые огнеупоры, изготовляемые на основе двуокиси циркония ($ZrO_2$) или циркона ($ZrSiO_4$), имеющие огнеупорность выше 2000° С и высокую химическую стойкость к расплавам, щелочам и большинству кислот, применяются в виде тиглей для плавки платины, палладия и других металлов, кварцевого стекла, футеровки высокотемпературных печей, в ракетостроении. Волокна и порошки из циркониевых огнеупоров пригодны для высокотемпературной теплоизоляции.

Цирконовые огнеупоры, изготовляемые из цирконового концентрата или из обожженной смеси циркона с глиной, применяются в виде стаканов для разливки стали, в печах для плавки алюминия, в сталесварочных ковшах для специальных сталей, а также в виде пластических масс и обмазок. Синтетические кристаллы $ZrO_2$, аналоги минерала бадделеита, содержащие примеси редких земель, иттрия и кальция (фианиты), применяются в оптике и ювелирном деле как имитации бриллиантов.

Свыше 50% двуокиси циркония используется в производстве цирконистых огнеупоров, керамики, эмалей, стекла. Цирконаты титана и свинца являются основой для изготовления пьезокерамики. В металлокерамических материалах (керметах) металлическим составляющим является металлический цирконий, а керамическим – его двуокись. Циркониевая

проволока применяется в генераторных лампах в качестве геттера. Радиоактивный изотоп $^{95}Zr$ (с периодом полураспада $T_{1/2}$ = 65,3 сут.) используют в научных исследованиях. Металлический цирконий и его сплавы нашли применение в ювелирном деле для производства колец, браслетов, цепочек.

Структура потребления (%): производство огнеупоров – 60; изготовление керамики – 17; в сталеплавильной отрасли – 13; другие области – 10.

### *9.13.4. Минералы и промышленные типы руд.*

Известно более 60 минералов циркония. Среди них преобладают силикаты, оксиды. Промышленное значение имеют два минерала – циркон и бадделеит. Циркон ($ZrSiO_4$) содержит (%): 67,1 $ZrO_2$ и 49,5 Zr. Бадделеит ($ZrO_2$) содержит до 74,1% Zr.

Кроме того, перспективными источниками циркония являются цирконосиликаты – эвдиалит ($(Na_{12}Ca_6Fe_3Zr_3\{Si_3O_9\}_2[Si_9O_{24}(OH,Cl)_3]$), 12,0–14,5% $ZrO_2$), катаплеит ($Na_2Zr[Si_3O_9] \cdot 2H_2O$, 23–32,5% $ZrO_2$) и другие.

В качестве примесей в цирконе всегда присутствует гафний, содержание окисей которого может достигать 49%, а в особой его разновидности – альвите – до 16% $HfO_2$.

Промышленные типы месторождений – россыпи прибрежно-морские, ближнего сноса, аллювиальные и аллювиально-озерные, редкометалльно-щелочно-гранитный, агпаит-нефелин-сиенитовый, эвдиалитовый, коры выветривания щелочных гранитов. Наибольшее значение имеют прибрежно-морские россыпи. В Забайкалье наиболее важным является редкометалльно-щелочно-гранитовый. Возможны связанные с ним россыпи.

По запасам $ZrO_2$ (млн. т) месторождения циркония подразделяют на уникальные – более 10, крупные – 10–1, средние – 1–0,1, мелкие – 0,1–0,01.

Особенности при поисках и разведке заключаются в эффективности применения аэро- и наземной гамма-спектроскопии, литохимического метода, каротажа скважин.

Промышленные руды: экзогенные – цирконовые, бадделеитовые; эндогенные – циркон-пирохлоровые, циртолит-колумбитовые, бадделеитовые, эвдиалитовые. По содержанию $ZrO_2$(%) руды подразделяют на богатые – более 3, рядовые – 3–1,5, бедные – 1,5–0,5.

### *9.13.5. Способы добычи и переработки руд.*

Месторождения разрабатывают открытым способом без применения буровзрывных работ для песков и с применением их для коренных руд.

Руды к переделу подготавливают обогащением с применением комбинированных разветвленных технологий (промывкой, гравитационной, электрической и магнитной сепарацией, обжигом, иногда флотацией).

Цирконовые концентраты перерабатывают хлорированием, жидкостной экстракцией, металлотермией, электролизом и электронно-лучевой зонной бестигельной плавкой, дробной кристаллизацией.

Извлечение $ZrO_2$ из руд различных типов достигает 95% при содержании его в концентрате 62–66% . Вредными примесями в концентрате являются $Fe_2O_3$, $TiO_2$, $Al_2O_3$, $P_2O_5$ и Th+U.

В результате обогащения руд комплексного состава попутно получают редкометалльные, магнетитовые концентраты и урановые продукты.

Перевод циркония в растворимое состояние производится: 1) хлорированием, 2) плавлением с едким натром или содой, 3) сплавлением с фторсиликатом калия, 4) спеканием с известью или карбонатом кальция с добавкой $CaCl_2$.

Хлорирование концентратов производят в присутствии угля при температуре 900–1000° С. При этом получается $ZrCl_4$, который возгоняется и улавливается.

Из спека или плава, полученного при щелочном выщелачивании, сначала удаляют соединения кремния выщелачиванием водой или разбавленной соляной кислотой, затем остаток разлагают соляной или серной кислотой, вследствие

чего образуются, соответственно, оксихлорид и сульфаты циркония. Фторцирконатный спек в результате обработки подкисленной водой при нагревании превращают во фторцирконат калия, 70–90% которого выделяется из раствора при его охлаждении.

Выделение соединений циркония из кислых растворов производят: кристаллизацией оксихлорида циркония $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ при выпаривании солянокислых растворов, гидролитическим осаждением основных сульфатов циркония $xZrO_2 \cdot ySO_3 \cdot ZH_2O$ из сернокислых солянокислых растворов; кристаллизацией сульфата циркония ($Zr(SO_4)_2$) при добавлении концентрированной серной кислоты или выпаривании сернокислых растворов. В результате прокаливания сульфатов и хлоридов получают $ZrO_2$.

Для получения циркония в виде порошка или циркониевой губки концентрат циркона спекают с $K_2[SiF_6]$, выщелачивают и восстанавливают $ZrF_4$ до Zr магнием или натрием. Она может быть получена также хлорированием концентрата при температуре 900–1000° С в присутствии кокса и затем металлотермическим восстановлением $ZrCl_4$ до Zr.

Электролитический порошкообразный цирконий получают из расплава смеси солей его галогенидов и хлоридов щелочных металлов. Компактный ковкий цирконий получают плавлением в вакуумных дуговых печах спрессованных порошка или губки, выполняющих роль расходуемого электрода. Высокочистый цирконий получают электронно-лучевой плавкой слитков, производимых в дуговых печах, или прутков после иодидного рафинирования.

Товарный продукт содержит до 99,9999% Zr.

Сопутствующий гафний, содержащийся в концентрате, переходит в цирконсодержащие продукты, из которых его извлекают избирательным восстановлением тетрахлоридов ($ZrCl_4$ и $HfCl_4$) и фракционной кристаллизацией фтороцирконатов ($K_2ZrF_6$) и фторогафнитов ($K_2HfF_6$).

Вредными примесями в цирконе являются Ti, Fe, Mn, Cu, $SiO_2$, Hf, P.

### *9.13.6. Источники циркония в Забайкалье.*

В недрах Забайкалья заключено 37,2% запасов циркония РФ. Основным источником циркония в Забайкалье являются комплексные редкометалльно-редкоземельно-криолитовые руды Катугинского месторождения. Цирконий заключен здесь, в основном, в цирконе (87%), содержащем в среднем 58,18% $ZrO_2$. Циркон содержит также 0,32–1,8% $TR_2O_3$, в основном, иттрия и иттриевой группы. Редкие земли, по данным В.В. Архангельской и др. [1993], находятся в цирконе в виде изоморфной примеси. Кроме того, цирконы содержат около 2% $HfO_2$. Средние содержания циркона в рудных метасоматитах – 8005–15096 г/т. Содержание $ZrO_2$ – 1,09%, запасы 13654,3 тыс. т, что позволяет отнести месторождение к разряду уникальных. При обогащении по гравитационно-магнитно-флотационной схеме извлечение $ZrO_2$ составляет 75,2% с получением цирконового концентрата, содержащего 60% $ZrO_2$. При производительности карьера 3 млн. тонн руды возможно получение 61,5 тыс. тонн цирконового концентрата в год [Инвестиционные проекты..., 2002]. Увеличение запасов возможно за счет оценки рудоносности продуктов выветривания рудоносных мегасанатитов и переотложения их в долинах ручьев. По данным «Читанедра», запасы и ресурсы циркония в Забайкальском крае составляют 3055 тыс. тонн, а их стоимость оценивается в 259030 млн. рублей.

#### Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства циркония?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд циркония.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд циркония в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают цирконий?
5. Назовите месторождения и типы руд циркония в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется цирконий?

## Литература

**Основная**

Гурвич С.И., Болотов А.М. Титано-циркониевые россыпи Русской платформы и вопросы поисков. – М.: Недра, 1969.

Осокин Е.Д., Бойко Т.Ф., Линде Т.П. Минеральное сырье. Цирконий и гафний / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997.

Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. – М.: Недра, 1987.

Удоканское медное, Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России / В.В. Архангельская, Ю.В. Быков, Р.Н. Володин и др. – Чита, 2004.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. II / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

**Дополнительная**

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн.1, 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

## 9.14. Гафний.

### *9.14.1. Свойства.*

Гафний (Hf, IV, 72), металл, серебристый, пластичный, легко поддается холодной обработке; проявляет основные свойства – литофильный, устойчивая валентность $4^+$. Предсказан в 1870 году Д.И. Менделеевым и открыт в 1922 году Д. Хевеши и Д. Костером.

Плотность 13310 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 1680–1860 МПа; температуры плавления 2230° С, кипения – 5297; теплопроводность 23,0 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $35{,}1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $5{,}3 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $5{,}9 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. В отличие от циркония имеет высокое значение захвата тепловых нейтронов – $115 \cdot 10^{-28}$ м$^2$. Устойчив к коррозии.

Гафний – токсичный элемент (III–IV классы опасности). ПДК$_{р.з}$ металлического гафния – 0,5 мг/м$^3$, HfN и HfC – 5,0.

### *9.14.2. Распространенность и запасы.*

Кларк гафния земной коры 1,0 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,1, основных – 1,0, средних – 1,0, кислых – 1,0, осадочных (глинах и сланцах) – 6,0. Естественное содержание в почвах 0,1–54 г/т.

Мировые запасы гафния (без стран СНГ) 850 тыс. т $HfO_2$, ежегодное производство составляет несколько тысяч тонн. Наиболее крупные производители – Австралия, ЮАР, Канада, Индия.

В России запасы гафния составляют 66% от запасов стран СНГ.

### *9.14.3. Области использования.*

Гафний используется в ядерной технике (регулирующие стержни реакторов, экраны для защиты от нейтронного излучения), в электронной технике (катоды, геттеры, электроконтакты). Применяется для производства жаропрочных сплавов в авиа- и ракетной технике, жаропрочной керамики, стекол. Твердый раствор карбидов гафния и тантала, выдерживающий температуру 4000° С, используют для получения тугоплавкой керамики. Из него делают тигли для плавки тугоплавких металлов, детали реактивных двигателей.

Структура потребления (%): в ядерных реакторах подводных лодок – 58; в суперсплавах, конструкционных режущих материалах, защитных покрытиях – 40; в производстве керамики и стекла – 2.

### *9.14.4. Минеральные и промышленные типы руд.*

Известен один минерал гафния – силикат гафния (гафнон $HfSiO_4$, 77,78% $HfO_2$). Но основная масса гафния находится в цирконе. Поэтому промышленное значение имеет только он, как содержащий, как указывалось выше (разд. 9.13.4), максимум гафния.

Гафний не образует собственных месторождений, а концентрируется в месторождениях циркония. Промышленные типы гафнийсодержащих месторождений – россыпи прибрежно-морские, ближнего сноса, аллювиальные и аллювиально-озерные, редкометалльно-щелочно-гранитный, агпаит-нефелин-сиенитовый, карбонатитовый, коры выветривания щелочных гранитов. Наибольшее значение имеют прибрежно-морские россыпи. В Забайкалье промышленное значение имеет редкометалльно-щелочно-гранитный, возможны связанные с ним россыпи.

По запасам $ZrO_2$+$HfO_2$ (млн. т) месторождения подразделяют на уникальные – более 10, крупные – 10–1, средние – 1–0,1, мелкие – 0,1–0,01.

Особенности при поисках и разведке заключаются в эффективности применения каротажа, аэро- и наземной гамма-спектроскопии, литохимического метода.

Среди промышленных руд выделяют экзогенные: цирконовые, бадделеитовые и эндогенные: циркон-пирохлоровые, циртолит-колумбитовые, бадделеитовые, эвдиалитовые.

По содержанию $ZrO_2+HfO_2$(%) руды подразделяют на богатые – более 3, рядовые – 3–1,5, бедные – 1,5–0,5.

### *9.14.5. Добыча и переработка руд.*

Подготовку руд к переделу производят по технологии обогащения цирконовых руд.

Гафний-цирконовые концентраты перерабатывают металлотермией, фракционной кристаллизацией фторидов, жидкостной экстракцией роданидов циркония и другими способами.

Химические соединения гафния получают обычно на завершающей стадии технологического цикла переработки циркониевых руд. В технологии получения и аналитической химии гафния и циркония используется растворимость в воде тетрахлорида ($HfCl_4$) и оксихлорида ($HfOCl_2 \cdot 8H_2O$), нитратов ($HfO(NO_3)_2 \cdot nH_2O$(n=2 и 6)) и сульфатов ($Hf(SO_4)_2$ и $(Hf(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$) гафния. Металлический гафний выделяют из раствора $HfCl_4$ восстановлением его магнием или натрием.

Извлечение $HfO_2$ из руд различных типов составляет до 70% при содержании в концентрате до 2%.

Товарные продукты содержат диоксид гафния – 99,3–99,9% ($HfO_2+ZrO_2$), металлический гафний – 99,8% Hf.

Вредные примеси в диоксиде гафния – $ZrO_2$, $SiO_2$, $Fe_2O_3$, $Al_2O_3$, $TiO_2$, MgO, CaO, $SO_3$, в металлическом гафнии – кислород, азот, хлор, магний, железо, алюминий, хром, марганец, ванадий, никель, титан, свинец.

### *9.14.6. Месторождения гафния в Забайкалье.*

Известно одно – Катугинское месторождение комплексных редкометалльно-редкоземельных руд, рассмотренное выше (см. 9.4.6). Гафний связан в нем с цирконом. Среднее содержа-

ние $HfO_2$ в цирконах этого месторождения составляет около 2% при соотношении $ZrO_2/HfO_2$, равном около 31 (табл. 9.22). Поэтому при запасах 13654,3 тыс. т запасы $HfO_2$ составляют 423,283 тыс. тонн.

Таблица 9.22

**Средние содержания циркония, гафния, редких земель, тантала и ниобия (масс. %) в цирконах Катугинского месторождения**
(по: [Удоканское медное..., 2004])

| Анализы | $ZrO_2$ | $HfO_2$ | $Ta_2O_5$ | $Nb_2O_5$ | $TR_2O_3$ | Zr/Hf | Nb/Ta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 55,00 | 1,73 | Не опр. | – | 1,235 | 32 | – |
| 2 | 54,00 | 1,64 | 0,062 | 0,175 | 0,992 | 33 | 3 |
| 3 | 59,23 | 1,99 | 0,072 | 0,328 | 0,172 | 30 | 6 |
| 4 | 61,80 | 1,90 | 0,085 | 0,584 | 0,201 | 31 | 6 |
| 5 | 54,00 | 1,70 | Не опр. | Не опр. | Не опр. | 30 | – |
| 6 | 60,70 | 1,86 | То же | То же | То же | 33 | – |
| 7 | 62,70 | 2,05 | То же | То же | То же | 31 | – |
| Среднее | 58,18 | 1,84 | 0,073 | 0,362 | 0,53 | 31,5 | 5 |
| 8(3) | 68,52 | 0,93 | Не опр. | Не опр. | – | 74 | – |
| 0(3) | 67,80 | 1,05 | 0,028 | 0,210 | – | 67 | 10 |

*1 – сиреневый дипирамидальный малаконизированный циркон из слюдитов; 2 – дипирамидальный малаконизированный циркон (биотитовая руда); 3 – светло-сиреневый длиннопризматический циркон (амфиболовая руда); 4 – мутно-белый короткопризматический циркон из амфибол-эгириновых руд; 5 – пятнисто-окрашенный окислами желез гиацинт; 6–7 – малаконизированный циркон и дипирамидальный малакон из амфиболовых и эгирин-амфиболовых руд соответственно; 8 – циркон из кристаллических сланцев; 9 – циркон из очковых микрогнейсов-бластомилонитов. В скобках – число анализов, по которым подсчитаны средние содержания. Цирконий, тантал, ниобий, редкоземельные элементы определялись химическим, гафний – количественно-спектральным методами.*

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства гафния?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд гафния.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд гафния в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают гафний?
5. Назовите месторождения и типы руд гафния в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется гафний?

## Литература

### Основная

Гурвич С.И., Болотов А.М. Титано-циркониевые россыпи Русской платформы и вопросы поисков. – М.: Недра, 1969.

Осокин Е.Д., Бойко Т.Ф., Линде Т.П. Минеральное сырье. Цирконий и гафний / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997.

Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. – М.: Недра, 1987.

Удоканское медное, Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России / В.В. Архангельская, Ю.В. Быков, Р.Н. Володин и др. – Чита, 2004.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. II / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

### Дополнительная

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн.1, 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

## 9.15. Торий.

Несмотря на то, что торий относится к радиоактивным элементам, по целому ряду признаков он близок к редким металлам, особенно к цирконию. Поэтому он помещен здесь следом за цирконием и его аналогом – гафнием. Все свойства тория обусловлены его специфическим положением в IV-й группе Периодической системы элементов. С одной стороны, он имеет сходства с титаном, гафнием, цирконием и редкими землями, а с другой – входит в группу актиноидов. Он проявляет сходство и природную совместимость с ураном, вследствие близости их ионных радиусов.

Торий состоит практически из одного долгоживущего изотопа $^{232}Th$ с периодом полураспада $T_{1/2} - 1.39 \cdot 10^{10}$ лет и четырех короткоживущих, два из которых относятся к радиоактивному ряду урана – радия: $^{234}Th(T_{1/2} = 24,1$ сут) и $^{230}Th(T_{1/2} = 8 \cdot 10^4$ лет), остальные – к ряду актиния: $^{231}Th(T_{1/2} = 25,6$ ч) и $227^{Th}(T_{1/2} =$ 18,17 сут). В равновесии с $^{232}Th$ находится еще один изотоп $^{228}Th$, содержание его в недрах ничтожно ($1,37 \cdot 10^{-8}$%).

### *9.15.1. Свойства.*

Торий (Th, IV, 90), металл, серебристо-белый, радиоактивный; проявляет амфотерные свойства, литофильный, устойчивая валентность $4^+$.

Плотность 11720 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 390–530 МПа; температуры плавления 1750° С, кипения – 4787; теплопроводность 54,0 Вт/(м·К); удельное электрическое сопротивление $13,0 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; удельная магнитная восприимчивость $7,2 \cdot 10^{-9}$ м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения $12,5 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Торий – высокотоксичный элемент (I класс опасности). $ПДК_{р.з}$ Th – 0,05 мг/м3; $ПДК_{в}$ нерастворимых соединений – 0,1 мг/дм$^3$.

### 9.15.2. Распространенность и запасы.

Кларк тория земной коры 13 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных – 0,005, основных – 3,0, средних – 7, кислых – 18,0, осадочных (глинах и сланцах) – 11,0. Естественное содержание в почвах 4,0–20 г/т, в морской воде – 0,00001 мг/дм$^3$.

Мировые запасы тория (без стран СНГ) более 2 млн. т, годовое производство составляет до 35 тыс. тонн. Наиболее крупные производители – США, ЮАР, Конго, Австралия, Индия, Малайзия, Боливия, Колумбия, Бразилия.

### 9.15.3. Области использования.

Торий применяют как катализатор при перегонке нефти и в ряде окислительных процессов при производстве органических веществ. Он используется в качестве термоукрепляющей добавки в производстве высокопрочных сплавов на основе магния, никеля, бериллия для нужд авиа- и ракетостроения. Торий добавляют в высококачественные огнеупоры. В электронике, в производстве оптических стекол, медицинских препаратов также используются добавки тория. Добавки тория повышают прочность вольфрамовых нитей в лампах накаливания. Поэтому эта область его использования достаточно стабильна. В производстве ламп накаливания по разным оценкам используется до 200–300 т тория ежегодно.

Весьма перспективно использование тория в уран-ториевых ядерных реакторах на быстрых нейтронах. Из природного $^{232}$Th в результате захвата им нейтрона, образующегося при делении ядра $^{233}$U, после двух последовательных распадов, получается новое ядро $^{233}$U. Вследствие этого из $^{232}$Th получается вторичное ядерное топливо, что позволяет расширенное воспроизвод-

ство $^{233}U$. Это определяет возможность широкого использования Th в сфере ядерной энергетики. Ядерное топливо, получаемое в результате преобразования тория, имеет ряд преимуществ по сравнению с применяемым в настоящее время уран-плутониевым. Главное из них – практически неисчерпаемые ресурсы тория в недрах. Но практическое использование тория в ураноториевых ядерных реакторах затрудняется длительностью периода удвоения ядерного топлива (превращение $^{232}Th$ в $^{233}U$ требует 10–12 лет) и неразработанностью экономически выгодных технологий переработки природного тория. Тем не менее, в случае применения тория в ядерной энергетике потребность в нем будет составлять около 10 тыс. т и более ежегодно.

### *9.15.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно 27 минералов тория и около 100 – торийсодержащих. Среди них преобладают силикаты, титанотанталониобаты, карбонаты, оксиды, фосфаты. Промышленное значение имеют около 15 минералов. К собственно ториевым относятся торианит ($ThO_2$, 87,88% Th, до 0,46% $Sc_2O_3$, до 25,67% $U_3O_8$, до 8% $TR_2O_3$) и торит ($ThSiO_4$, до 71,6%, 45–75% $ThO_2$, до 18% $U_3O_8$). Из торийсодержащих минералов важны монацит ($(Ce,La)PO_4$, до 23% Th), ксенотим ($YPO_4$, до 5% $ThO_2$), бастнезит ($CeCO_3F$, до 2,8% $ThO_2$), бритолит ($Ce_3Ca_2(SiO_4)_3 \cdot OH$, 0,32–19,64% $ThO_2$), меланоцерит ($Ce_4CaBSi_2O_{12}(OH)$, до 1,66% $ThO_2$), лопарит ($(Na,Ce,Ca)(Ti,Nb)O_3$, 0,46–4,01 $ThO_2$), пирохлор, до 0,2–6,3% $ThO_2$, эвксенит-поликраз ($[(Y(Nb,Ti)_2(O,OH)_6 - Y(Ti,Nb)_2(O,OH)_6]$ (%): 0,57–4,60 и 1,97–7,69 $ThO_2$ соответственно), фергюсонит, форманит ($YNbO_4 - YTaO_4$ (%) – 1,33–2,91 и 1,02–6,80 $ThO_2$ соответственно), циркелит ($(Zr,Ca,Ti,Fe^{2+},Mg,TR,U,Th)_3O_5$, 7,31% $ThO_2$). Кроме того, многие цирконы, содержащие торий также в существенных количествах, могут быть источниками тория. Например, в циртолите и малаконах он содержится в количестве 0,025–1,29% $ThO_2$, в наэгите – до 5,01% $ThO_2$ [Минералы, 1972].

Торий не образует собственных месторождений, а находится в месторождениях других видов минерального сырья.

Промышленные типы торийсодержащих месторождений – магматический, пегматитовый, карбонатитовый, скарновый, альбититовый, метаморфогенный, экзогенный. Наибольшее значение имеет экзогенный тип.

Промышленные торийсодержащие руды – россыпи (монацитсодержащие титан-циркониевые, касситеритовые) и коренные – пирохлоровые, торитовые и торианитовые (в карбонатитах и их корах выветривания), редкометалльно-редкоземельные метасоматиты.

### *9.15.5. Способы добычи и переработки руд.*

Торий, как правило, не образует собственных месторождений, а извлекается попутно из монацитовых руд редких земель, других редкометалльных тантал-ниобиевых, циркониевых и редкоземельных руд. Способы разработки торийсодержащих месторождений преимущественно открытые, так как наиболее крупные месторождения являются прибрежно-морскими или континентальными россыпями, а также корами выветривания. Возможна другая разработка крупных россыпей. Коренные редкометалльные месторождения, из руд которых он извлекается попутно, отрабатываются открытым способом.

Подготовку руд к переделу производят с применением комбинированных технологий (гравитация, магнитная и электрическая сепарация, флотация) для получения коллективного монацитового или лопаритового концентратов.

При обогащении руд получают титановые, редкометалльные и редкоземельные концентраты и другие продукты.

Торий извлекают, главным образом, из монацитовых и лопаритовых концентратов. Возможно его попутное извлечение из редкометалльно-редкоземельных руд. Наиболее разработана технология переработки монацитовых концентратов, где он находится в виде фосфата. По одному из способов разложения фосфата и вскрытия тория концентрат обрабатывают концентрированной серной кислотой (сульфатизация) при 200° С. По другому – обрабатывают раствором щелочи при 140° С.

В первом случае в сернокислые растворы переходят редкоземельные элементы, торий и фосфорная кислота. Из этих растворов при доведении его pH до 1 осаждается фосфат тория. Осадок отделяют и растворяют в азотной кислоте. Затем нитрат тория экстрагируют органическим растворителем, из которого торий вымывают в виде его комплексных соединений.

Во втором случае, когда используют щелочное вскрытие концентрата, в осадке остаются гидроокиси всех металлов, а в раствор переходит тринатрийфосфат. Образовавшийся осадок отделяют и растворяют в соляной кислоте, затем осаждают из него торий в виде гидроокиси.

Из полученных любым из указанных способов очищенных соединений тория производят $ThO_2$, $ThCl_4$ и $ThF_4$, которые являются исходными веществами для производства из них металлического тория электролизом расплавленных солей или металлотермическими методами. Металлотермическое восстановление $ThO_2$ производится кальцием в присутствии $CaCl_2$ в атмосфере аргона, восстановление $ThCl_4$ – магнием и $ThF_4$ – кальцием в присутствии $ZnCl_2$ с получением сплава тория с цинком и последующим отделением цинка нагреванием сплава в вакуумной печи. В результате применения любого из указанных способов металлотермический торий получают в виде порошка или губки.

Электролиз расплавленных солей проводят из электролитов, содержащих $ThCl_4$ и NaCl, или ванн, состоящих из смеси $ThF_4$, NaCl, KCl. В результате торий выделяется на катоде в виде порошка, который затем отделяется от электролита обработкой водой и разбавленными щелочами. Компактный торий получают методом порошковой металлургии, заключающейся в спекании порошка или губки в вакууме при 1100–1350° С, или плавкой в индукционных печах в тиглях из $ZrO_2$ или BeO. Торий особой чистоты получают термической диссоциацией его иодида $ThI_4$.

Извлечение тория из руд составляет до 90% при содержании его в концентрате 2–10%.

### *9.15.6. Источники тория в Забайкалье.*

Восточное Забайкалье, в частности предгорья Борщовочного хребта в прибортовой части долины Унды, были предметом пристального внимания академика В.И. Вернадского, который еще в 1914 году ориентировал геологов на поиски радиоактивного сырья в Балейском районе. Группа россыпных промышленных месторождений ториевых руд, разрабатывавшихся в 1948–1964 гг., находится в Балейском районе Забайкальского края. Месторождения локализованы в аллювиальных отложениях, слагающих правобережье террасы долины р. Унда. Террасы прилегают к прибортовой части южного склона Борщовочного хребта. Основным рудным минералом является торийсодержащий монацит. В качестве примеси присутствуют торийсодержащий циркон и торит. Имеются сведения о присутствии торианита. Источниками монацита и других минералов тяжелой фракции в россыпях являются биотитовые гнейсы и находящиеся в них пегматитовые жилы, частью – краевые фации гранитов борщовочного комплекса. Разрабатывалось Новотроицкое месторождение, а также россыпи, находящиеся в приустьевой части пади Шадриха и в районе Казаковского промысла. Разработка россыпей велась на трех приисках – собственно Новотроицком, а также приисках Шадриха и Казаковский. Она производилась открытым механизированным способом с использованием бульдозеров и экскаваторов. Выпускался монацитовый концентрат, содержащий торий и редкие земли. Он использовался в нефтяной, металлургической и других отраслях промышленности [Энциклопедия Забайкалья..., 2006]. Россыпи не отработаны, и при необходимости возможно открытие и подготовка к эксплуатации других месторождений вдоль прибортовой части Борщовочного хребта в Ундино-Даинской депрессионной зоне.

Другим важным источником тория может быть редкометалльный, редкоземельный и цирконовый концентраты Катугинского месторождения. Содержание наиболее распространенных минералов в рудах и горных породах Катугинского месторождения приведены в табл. 9.23.

Таблица 9.23

**Средние содержания некоторых минералов в рудах и горных породах Катугинского месторождения (г/т)** по: [Удоканское медное и Катугинское..., 2004]

| Минералы | Типы руд | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 (214) | 2 (812) | 3 (523) | 4 (401) |
| Пирохлор (мариньякит) | – | 701 | 4535 | 5320 |
| Колумбит* | – | 279 | Единичные знаки | – |
| Гагаринит** | – | 181 | 583 | 311 |
| Флюоцерит | – | 35 | 5 | 15 |
| Криолит | – | 115 | 10244 | 20041 |
| Флюорит*** | 3160 | 3719 | 1058 | 121 |
| Монацит | 300 | 950 | 511 | 115 |
| Ильменит | 320 | 4816 | 2066 | 1820 |
| Магнетит | 99 | 209 | Знаки | Единичные знаки |
| Циркон | 98 | 8005 | 12894 | 15096 |
| Апатит | 670 | 402 | Знаки | Знаки |
| Сфалерит | – | 977 | 204 | 358 |
| Молибденит | – | 12 | 13 | 10 |
| Галенит | – | 18 | 27 | 20 |

*1– вмещающие биотитовые кристаллические сланцы и биотитовые микрогнейсы-бластомилониты; 2–4 – руды: 2 – аннитовые и аннит-рибекитовые, 3 – рибекит-арфведсонитовые, 4 – эгирин-арфведсонитовые.*

** – колумбит + колумбитизированный пирохлор;*

*** – гагаринит + субмикроскопические сростки гагаринита с редкоземельным флюоритом;*

**** – флюорит + редкоземельный флюорит. В скобках – число подсчетов.*

Распределение минералов в рудоносных метасоматитах и средние содержания в них РЗЭ и иттрия представлены на рис. 2.24.

Содержание тория в минералах, имеющих промышленное значение, составляет от 0,00n – 0,n % (табл. 9.24).

Несмотря на то, что цирконы руд Катугинского месторождения малоториевые (вариация содержаний $ThO_2$ 0,012–0,09%, среднее – 0,05%), с ними связано до 11734 т двуокиси тория. Эта цифра получается, если исходить из того, что при запасах $ZrO_2$ в 13654300 т [Инвестиционные..., 2006] содержание ее в цирконах Катугинского месторождения в среднем 58,18% [Удоканское медное..., 2004], запасы циркона достигают 23469061 т. Но торий, в основном, связан с пирохлором, где содержание $ThO_2$ варьирует от 1,30 до 16%. С учетом запасов $Nb_2O_5$ 3718,2 тыс. т в пересчете на пирохлор, являющийся основным носителем ниобия (85–95%), содержащего 53,5% $Nb_2O_5$, запасы этого минерала составляют 6949906 тонн. Если принять, что пирохлор содержит в среднем 0,85% $ThO_2$ (0,71–1,11% [Удоканское медное..., 2004]), то общие его запасы, связанные только с пирохлором, составят 55599 т.

Таким образом, суммарные запасы $ThO_2$ в рудах Катугинского месторождения, заключающиеся только в цирконе и

Таблица 9.24

**Содержание тория и редких земель в промышленных минералах Катугинского месторождения**

| Минерал | Содержание, % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $ThO_2$ | | Th | | Сумма TR+Y | |
| | от | до | от | до | от | до |
| Пирохлор | 1,30 | 16,03 | | | 15,02 | 45,89 |
| Фергюсонит | | 4,88 | | | | |
| Циркон | 0,012 | 0,09 | | | 0,45 | 1,8 |
| Редкоземельный флюорит | | | 0,1 | 0,5 | 7,33 | 41,93 |
| Гагаринит | | | 0,08 | 0,3 | 39,95 | 44,53 |

пирохлоре, составляют не менее 67333 тонн. Но торий содержится также в редкоземельном флюорите (0,1–0,5% Th) и гагарините (0,08–0,3% Th) (табл. 9.24), имеющих также промышленное значение. Среднее содержание Th в богатых рудах составляет 0,02%. Поэтому запасы тория больше полученной цифры.

По данным В.Ж. Цыбжитова [1981], в пределах Ауникского месторождения бериллия флюорит-бертрандит-фенакитовой формации выделены рудные тела, относящиеся к торит-флюорит-фенакитовому подтипу. Они находятся в юго-восточном крыле антиклинальной складки, сложенной доломитизированными известняками, сменяющимися по разрезу пачкой переслаивающихся известняков и известковистых песчаников. Эта пачка сменяется полимиктовыми песчаниками с прослоями карбонатно-глинистых сланцев. Этот осадочно-метаморфический комплекс прорван телами граносиенитов. Редкометалльная флюоритовая минерализация связана с юрскими граносиенитами и кварцевыми сиенитами в зонах их контактовых взаимодействий с известняками и известковистыми песчаниками. В распределении литиевой, редкоземельно-тантало-ниобиевой и торит-фенакит-флюоритовой минерализации установлена гипогенная зональность [Цыбжитов, 1981]. Она заключается в том, что литиевая минерализация локализована в штоках альбитизированных гранитоидов, редкоземельно-тантал-ниобиевая в апикальных частях штока субщелочных гранитоидов, а торит-фенакит-бертрандитовая – в надинтрузивной зоне этих гранитоидов, в зоне их экзоконтакта, в известняках и известковистых песчаниках. Протяженность торит-фенакит-флюоритовых рудных тел 20–100 м при непостоянной мощности 2,0–4,0 м. Богатые руды развиты в зоне переслаивания известняков и известковистых песчаников, где наиболее благоприятны условия скарнирования. Руды состоят из фенакита, флюорита, ферриторита, бертрандита, калиевого полевого шпата, кварца, карбонатов с примесью пирита, галенита, сфалерита, молибденита. Акцессорные минералы представлены цирконом, монацитом, ортитом, бастнезитом, шеелитом, рутилом, апатитом, циннвальдитом.

В целом, если возникнет потребность в тории, Забайкалье может быть его надежным поставщиком для атомной промышленности. При переработке редкометалльно-редкоземельно-цирконово-криолитовых руд Катугинского месторождения предусматривается получение черновых гравитационных и флотационных концентратов и в результате их доводки – выпуск тантал-ниобиевого, редкоземельного, цирконового концентратов. Химический их передел по серно-кислотной технологии позволяет получить, наряду с фтортанталатом калия, оксидом ниобия, растворов нитратов оксидов редких земель и урановым химическим концентратом и искусственным криолитом, также и ториевый продукт. Согласно разработанному проекту, ториевый продукт должен поступать на захоронение. Однако интенсивное развитие работ по использованию ториевых ядерных реакторов на быстрых нейтронах требует не захоронения, а длительной консервации ториевого продукта.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства тория?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд тория.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд тория в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают торий?
5. Назовите месторождения и типы руд тория в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используется торий?

## Литература

### Основная

Гаврилин В.Н., Зубков Л.Б., Петрова Н.В. Минеральное сырье. Торий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999.

Каплан Г.Е., Успенская Г.А., Зарембо Ю.И. Торий, его основные ресурсы, химия и технология. – М.: Атомиздат, 1960.

Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. – М.: Недра, 1987.

Удоканское медное, Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России / В.В. Архангельская, Ю.В. Быков, Р.Н. Володин и др. – Чита, 2004.

**Дополнительная**

Бойцов В.Е., Пилепенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Учебное пособие. – М.: НИА – Природа, 1999.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн.1, 2.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

Ковалев В.П., Мельгунов С.В., Ножкин А.Д. Уран и торий в магматическом и метаморфическом петрогенезисе. – Новосибирск: Наука, 1983.

Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – М.: Недра, 1974.

## 9.16. Иттрий.

Относится к редкоземельным элементам, однако обособлен по ряду свойств. Природный иттрий состоит из одного стабильного изотопа $^{89}Y$.

### *9.16.1. Свойства.*

Иттрий (Y, III, 39) представляет собой серебристо-белый металл, мягкий, легко поддающийся механической обработке. Проявляет основные свойства, литофильный, валентность $3^+$.

Плотность 4469 кг/м$^3$; твердость по Бринеллю 320–628 МПа; температуры плавления 1522° С, кипения – 3338; теплопроводность 17,2 Вт/(м · К); удельное электрическое сопротивление 57,0 $\cdot 10^{-8}$ Ом·м; парамагнетик, удельная магнитная восприимчивость 2,7·10-8 м$^3$/кг; температурный коэффициент линейного расширения 10,6 $\cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$. Сечение захвата тепловых нейтронов 1,5 $\cdot 10^{-28}$ м$^2$. Иттрий куется и прокатывается до лент толщиной 0,05 мм на холоде с промежуточным отжигом при 900–1000° С.

Иттрий – токсичный элемент (II–III классы опасности). ПДК$_{р.з}$ растворимых соединений – 1,0 мг/м$^3$, $Y_2O_3$ – 2,0, иттриевых люминофоров – 1–2.

### *9.16.2. Распространенность и запасы.*

Кларк иттрия земной коры 29 г/т. Средние его содержания в горных породах главных типов (г/т): ультраосновных и основных – 20, средних и кислых – 34, осадочных (глинах и

сланцах) – 30. Естественное содержание в почвах 21–39 г/т, в морской воде – 0,0003 мг/дм$^3$.

Мировые запасы иттрия (без стран СНГ) оцениваются в 1 млн. т $Y_2O_3$, годовое производство составляет более 1 тыс. тонн. Наиболее крупные производители – Китай, США, Австралия, Индия.

### *9.16.3. Области использования.*

Иттрий, его сплавы и соединения применяют в производстве люминофоров для цветного телевидения и люминесцентных ламп, жаропрочных антикоррозионных суперсплавов, нержавеющей стали, лазеров, оптического стекла, огнеупорной керамики, быстрорежущих инструментов. Широко используется оксид иттрия (сесквиоксид) $Y_2O_3$. Он является важным компонентом специальных стекол для оптических приборов, прозрачной и жаропрочной керамики дисперсионно упрочненных жаропрочных сплавов на основе Zr и Ni. Он играет роль стабилизатора $ZrO_2$. Активированный европием сесквиоксид иттрия используется как красный люминофор в экранах цветных телевизоров. Иттрий в виде оксида вводят в шихту для выращивания иттриево-железных и других иттро-гранатов, оксисульфидов и ортованадатов иттрия. Оксокупраит иттрия и бария $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, являющийся высокотемпературным сверхпроводящим материалом с температурой перехода в сверхпроводящее состояние при 90–100 К, также получают с использованием $Y_2O_3$ в качестве одного из исходных материалов. При $x = 0,31$ – это вещество кристаллизуется в ромбической сингонии с пространственной группой Pmmm и параметрами решетки $a_o = 0,38829$ нм, $b_o = 0,38223$ нм и $c_o = 1,1690$ нм. Оно получается спеканием $Y_2O_3$, BaO и CuO при 950–1100° С в атмосфере $O_2$ методами криохимической технологии.

Важнейшим соединением иттрия является его трифторид ($YF_3$), используемый для получения чистого иттрия металлотермическим способом. Иттрофторид лития ($Li[YF_4]$), легированный редкоземельным элементом гольмием, относится к важным лазерным материалам.

В черной металлургии иттрий используют для модификации (направленного изменения свойств) чугунов, сталей и других сплавов. Иттрий добавляют в чугун для увеличения его прочности (для получения шаровидных включений графита), в нержавеющие и жаростойкие хромистые стали. Иттрий повышает жаростойкость и жаропрочность сплавов на основе Ni, Co, Cr, Nb и др. Он увеличивает прочность и пластичность тугоплавких металлов и сплавов на основе W, Hf, Zr, Mo, Ta, придает прочность титановым медным и другим сплавам. Иттрий добавляют в сплавы на основе Mg и Al, используемые в авиационной технике.

Из тугоплавких и огнеупорных материалов на основе боридов, сульфидов и оксидов иттрия производят катоды для мощных генераторов. Сплавы тория с La, Al, Zr применяют в качестве геттеров. Ортованадат и оксисульфид иттрия, активированные европием, наряду с оксидом иттрия, используют как красные люминофоры в цветном телевидении. А оксисульфид иттрия, активированный тербием, является люминофором в медицинской диагностике. Алюминат иттрия, наряду с иттрофторидом лития, используется в изготовлении лазеров.

Различно окрашенные прозрачные синтетические иттрогранаты используются в ювелирном деле.

### *9.16.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно около 20 минералов редких земель, в которых иттрий является основным элементом. Среди них преобладают фосфаты и редкометалльные минералы. В последние десятилетия важными источниками иттрия стали фторкарбонаты. Промышленное значение имеют следующие минералы: бастнезит ($CeCO_3F$) и иттробастнезит ($Ce,Y)CO_3F$), содержащие переменные количества иттрия в зависимости от меры замещенности им церия (содержание $Y_2O_3$ возможно до 20–30%); синхизит–иттросинхизит ($CeCa(CO_3)_2F - (Y,Ce)Ca(CO_3)_2F$), содержание $Y_2O_3$ до 20–25%; монацит ($(Ce,La,Y)PO_4$, до 5,08% $Y_2O_3$), ксенотим ($YPO_4$, до 49,2% Y, 63,1% $Y_2O_3$), рабдофанит ($(Ce,Y)PO_4 \cdot H_2O$, до 23% $Y_2O_3$), гагаринит ($NaCaYF_6$, до 54,0–56,75% суммы

$TR_2O_3$, в которой $Y_2O_3$ составляет 35–50%, что соответствует 18,9–28,37% от общей массы минерала), редкоземельный флюорит или иттрофлюорит (($Ca_{1-(x-Zy)}$), $Na_y$. $TR_{x+y}$, $F_{2+x}$, где x – 0,01–0,31; y – 0,04–0,15, содержание Y 3–20%), иттротанталит ($YFeTa_2O_6$, до 12,05–23,0% $Y_2O_3$), пирохлор (сумма редких земель иттриевой группы максимальна лишь в обручевитовых разновидностях и находится в пределах 0,3–13,42% $Y_2O_3$), а в мариньякитовых – иттрий часто находится в незначительных количествах, уступая церию и другим относительно легким редким землям [Минералогия и геохимия..., 1964; Минералы, 1967; Удоканское медное и Катугинское..., 2004]. Кроме того, иттрий накапливается в иттрогранатах, близких к спессартину, и в алланитах. Однако промышленная значимость их в настоящее время сомнительна.

Промышленные типы месторождений – магматогенный (редкометалльные щелочные граниты и их метасоматиты, карбонатиты щелочных сиенитов), метаморфогенный (урановосные конгломераты), экзогенные (коры выветривания, прибрежно-морские и аллювиальные россыпи).

Наибольшее значение имеют месторождения редкометалльных щелочных гранитов и их метасоматитов, гидротермально-перемытые коры выветривания, урановосные конгломераты и россыпи.

По запасам редкоземельных оксидов (РЗО) (тыс. т) месторождения иттриевых земель подразделяют на весьма крупные – более 500, крупные – 500–100, средние – 100–10, мелкие – менее 10.

Промышленные типы руд – бастнезитовый, иттросинхизитовый, монацитовый, ксенотимовый, комплексный гагаринит – иттрофлюорит – пирохлоровый.

Кроме того, иттрий можно получать попутно при переработке некоторых урановых руд (золото-браннеритовых, урансодержащих фосфоритов, каменных и бурых углей), ториевых руд (ксенотим-ферроторитовых, ниобий-танталовых (фергюсонитовых, эвксенитовых, самарскитовых)). Источником иттрия могут быть апатитовые руды при больших объемах переработки сырья.

По содержанию РЗО (%) руды подразделяют на весьма богатые – более 1,0, богатые – 1,0–0,5, рядовые – 0,5–0,1, бедные – менее 0,1.

### *9.16.5. Добыча и переработка руд.*

Месторождения разрабатывают открытым и подземным способами. Подготовку руд к переделу производят обогащением с получением коллективного редкоземельного или редкометалльно-редкоземельного концентрата по гравитационным, флотационным и комбинированным технологиям (гравитация, магнитная и электрическая сепарация, флотация).

Извлечение РЗО из руд различных типов составляет 20–75% при содержании $Y_2O_3$ в концентрате 1–20%. Вредными примесями в концентрате являются $TiO_2$, MnO, $Cr_2O_3$, $Fe_2O_3$, $SiO_2$, P, Th.

При обогащении руд комплексного состава попутно получают концентраты редких металлов, редкоземельных элементов (РЗЭ), урановые, баритовые, сульфидные, криолитовые, полевошпатовые и другие сульфатные продукты.

Перерабатывают иттрийсодержащие концентраты химическим делением, жидкостной экстракцией, хлорированием и ионообменной хроматографией.

Основным продуктом, получаемым при переработке иттрийсодержащих концентратов, являются водорастворимые иттриевые соли – хлорид, нитрат, перхлорит, сульфат, ацетат, формиат и др., при упаривании выделяются в форме кристаллогидратов, например, $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Y_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$. При прокаливании солей кислородных кислот они переходят в оксид иттрия. Промышленно важными продуктами иттрия являются его безводные галогениды: трифторид ($YF_3$) и трихлорид ($YCl_3$). Трифторид получают взаимодействием $Y_2O_3$ с газообразным HF или $F_2$, разложением фтораммонийных комплексов при 400–500° С или обезвоживанием гидратов, образующихся в результате осаждения из растворов солей иттрия при действии на них фтористоводородной кислоты.

Трихлорид получают взаимодействием смеси $Cl_2$ и $CCl_4$ с $Y_2O_3$ или $Y_2(C_2O_4)_3$ (оксалатом иттрия) выше 200° С. Металлический иттрий получают металлотермическим способом из галогенидов восстановлением его литием или с кальцием с последующей отгонкой других редких земель. Соединения иттрия извлекают из смесей с соединениями других редкоземельных элементов методами экстракции и ионообменной хроматографией.

Товарный продукт содержит 99,98282–99,99936 $Y_2O_3$%.

Сопутствующие РЗЭ, содержащиеся в концентрате, извлекают при производстве оксида иттрия. Вредные примеси в оксиде иттрия – V, Cu, Ni, Fe, Na, Ca, Si.

### *9.16.6. Источники иттрия в Забайкалье.*

Важнейшим источником иттрия в Забайкалье является Катугинское редкометалльно-редкоземельно-циркониево-криолитовое месторождение в Каларском районе. Оно описано выше (см. разд. 9.4). Основными носителями иттрия являются редкоземельный флюорит и гагаринит, в которых содержания его преобладают над таковыми других редких земель. В рудах присутствуют также фергюсонит, содержащий всего 14,86% $Y_2O_3$, вследствие замещения его другими редкими землями, колумбит – до 1,0% $Y_2O_3$, циркон (0,142–1,09% Y при $\Sigma Y/Ce$ = 0,9–3,2). Особенностью пирохлора, одного из главных носителей редких земель в рудах месторождения, является относительно низкое содержание иттрия. С ним связано всего около 1% запасов этого металла в месторождении (Удоканское медное и Катугинское..., 2004). В.В. Архангельская установила, что селективно иттриевые минералы присущи преимущественно фронтальной зоне рудной залежи. Существенно иттриевый гагаринит преобладает в рибекит-арфведсонитовых, а в биотит-рибекитовых и биотитовых – иттриевый флюорит и появляется собственно иттриевый минерал фергюсонит [(Y,Ce)[(Nb,Ta,Fe)$O_4$]. Однако он не имеет здесь промышленного значения.

Редкоземельный флюорит, в основном, распространен в биотитовых и биотит-эгириновых рудах и в горных породах внешней (экзоконтактной) зоны рудной залежи, но имеется и в остальных минеральных типах руд. Здесь он бывает замещен гагаринитом и другими фторидами. В зоне экзоконтакта содержание редкоземельного флюорита достигает 15–20%. Эта часть месторождения еще не разведана и может, согласно представлениям В.В. Архангельской, М.Д. Скурского и других исследователей, стать еще одним редкометалльно-редкоземельным месторождением в Катугинской рудной зоне. Редкоземельный флюорит образует тонкую (0,02–0,5 мм) вкрапленность бесцветных прозрачных фрагментов его кристаллов со стеклянным блеском. Особенностью его является люминесценция в ультрафиолетовых лучах пурпурным и в рентгеновских – голубым светом. Содержание суммы иттрия и редких земель иттриевой группы в нем варьирует от 3–5 до 20% и более. Содержание $Y_2O_3$ варьирует в пределах 1,3–9,46%. Характерно, что с общим уменьшением суммы иттрия и иттриевых редких земель общая сумма редких земель возрастает.

Другим важнейшим носителем иттрия является гагаринит. Он образует в рудах вкрапленность зерен размером 0,1–0,3 мм, редко – до 0,5 см. Обычно ксеноморфен. Идиоморфные кристаллы длиной 1–2 ÷ 6–7 см встречаются в кварц-полевошпатовых пегматоидных обособлениях среди равномернозернистых руд. Гагаринит ассоциирует с амфиболом и кристаллизуется позже редкоземельного флюорита, но раньше криолита. Кристаллы и зерна гагаринита по трещинкам пронизаны сетью тонких прожилков гематита, придающих ему розовый цвет. В рентгеновских лучах люминесцирует слабым и бело-голубоватым цветом. Химический состав гагаринита, как установлено В.В. Архангельской, не соответствует стехиометрическому ($NaCaTRF_6$). Для него типичны дефицит Ca, Na (менее 1) и избыток РЗЭ+Y (более 1). Большинство образцов гагаринита соответствует формуле $(Na_x \Sigma_{1-x})_{1,0}TR_{1,0}(Ca_{1-x}+2_yTR_{x+y}Na_y)_{1,0} \cdot F_6$. Состав редких земель комплексный с преобладанием иттрия и редких земель иттриевой группы – (Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Tm,

Yb, Lu, Tb):ΣCe/ΣY = 0,21–0,77) [Удоканское медное и Катугинское..., 2004]. Содержание суммы редких земель и иттрия варьирует в пределах 39,95–44,53%.

Среднее содержание $Y_2O_3$ в рудах Катугинского месторождения 0,009%, запасы – 1147,2 тыс. т [Инвестиционные предложения..., 2002], что соответствует весьма крупному месторождению, но с низкими содержаниями. Однако в данном случае иттрий является одним из элементов комплексных руд и поэтому извлечение его даже при таких низких содержаниях может быть экономически рентабельно.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства иттрия?
2. Назовите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд иттрия.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд иттрия в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают иттрий?
5. Назовите месторождения и типы руд иттрия в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используются иттрий?

## Литература

### Основная

Семенов Е.И. Минералогия редких земель. – М.: Изд-во АН СССР, 1963.

Солодов Н.А., Семенов Е.И., Усова Т.Ю. Минеральное сырье. Иттрий и лантаноиды / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Удоканское медное, Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России / В.В. Архангельская, Ю.В. Быков, Р.Н. Володин и др. – Чита, 2004.

**Дополнительная**

Булнаев К.Б. Условия образования и локализации фторредкоземельного оруденения // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 2. – С. 28–38.

Булнаев К.Б. Стронцианитовые карбонатиты Халютинского месторождения (Западное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1996. – № 5. – С. 437–448.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

Рипп Г.С., Ходанович П.Ю., Смирнова О.К., Кобылкина О.В. Халютинское месторождение барий-стронциевых карбонатитов (Западное Забайкалье). – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ, 1998.

## 9.17. Лантаноиды.

### *9.17.1. Общие сведения и свойства.*

Лантаноиды (14 химических элементов) вместе с иттрием составляют группу редкоземельных элементов (редких земель – TR, РЗЭ). Свое название они получили по причине того, что в природе встречаются редко и дают тугоплавкие, нерастворимые в воде окислы, по старинной терминологии именовавшиеся «землями». Иногда в эту группу включают и скандий. Лантаноиды имеют атомные номера от 57 до 71 и входят в состав побочной подгруппы III группы 6-го периода Периодической системы элементов.

В этом параграфе намеренно приведены подробнее, чем для других химических элементов, важнейшие характеристики РЗЭ. Это связано с особой перспективностью использования их в электронике и тонких технологиях, включая нанотехнологии.

От лантана к лютецию, с уменьшением радиусов атомов и ионов, происходит понижение основности редких земель, изменение растворимости солей, устойчивости комплексных соединений.

Особенностью всех лантаноидов является близость их свойств. Это объясняется строением электронных оболочек их атомов. По мере возрастания заряда структура двух внешних оболочек остается неизменной, но происходит достраивание 3-ей снаружи оболочки – глубокозалегающего f-уровня. Число элементов в группе, равное 14, определяется максимально возможным числом электронов на f-уровне.

Все РЗЭ обладают высокой химической активностью и взаимодействуют почти со всеми химическими элементами при относительно низких температурах.

Редкие земли по атомной массе подразделяются на легкие (цериевая подгруппа, включающая церий, празеодим, неодим, прометий, самарий и европий) и тяжелые (иттриевая подгруппа, включающая гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий и лютеций). Поведение их в природных процессах несколько различается. Прометий получен искусственно и в природе не обнаружен. Наиболее важные фундаментальные свойства лантаноидов даны в табл. 9.25, основные физические свойства – в табл. 9.26, 9.27.

Все лантаноиды представляют собой металлы серебристо-белого цвета. Лишь некоторые из них (Pr и Nd) имеют желтоватый оттенок, а лантан и эрбий – серый. Все они, за исключением диспрозия гольмия, эрбия и лютеция, мягкие и ковкие. Диспрозий, гольмий и особенно лютеций – твердые.

Кристаллическая структура лантаноидов гексагональная плотноупакованная. Исключением являются γ-Ce и α-Yb (кубическая гранецентрированная), Sm (ромбоэдрическая) и Eu (кубическая объемноцентрированная). Возрастание положительного заряда без изменения числа электронов на внешней оболочке приводит к усилению притяжения электронов к ядру и возникновению лантаноидного сжатия – уменьшению радиуса атомов в направлении от La к Lu. Температура плавления у элементов подгруппы церия существенно ниже, чем в подгруппе иттрия. Механические свойства (пластичность, ковкость) лантаноидов зависят от примесей – кислорода, азота, серы и углерода. Предел прочности и модуль упругости возрастает от цериевой подгруппы к иттриевой. Исключение составляет γ-Yb, отличающийся низкой твердостью (табл. 9.27). Все лантаноиды (за исключением La и Lu) при комнатных температурах – сильные парамагнетики. При низких температурах Nd, Pr и Sm (цериевая подгруппа) находятся в антиферромагнитном состоянии. Элементы иттриевой подгруппы (Tb, Dy, Ho, Er и Tm) при очень низких температурах переходят в ферромагнитное состояние, а при более высоких – становятся антиферромагнетиками. Гадолиний же при всех температурах ниже 293 К находится в ферромагнитном состоянии. Диспрозий, тербий, гольмий, эрбий и тулий отличаются большими величинами намагниченности

Таблица 9.25

## Некоторые фундаментальные свойства лантаноидов

| Название | Символ | Атомный номер | Атомная масса | Электронная структура | | | | | Валентность | Ионный радиус | Энергия ионизации эВ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 4f | 5s | 5p | 5d | 6s | | | |
| Лантан | La | 57 | 138,9055 | – | 2 | 6 | 1 | 2 | 3 | 1,061 | 36,2 |
| Церий | Ce | 58 | 140,12 | 2 | 2 | 6 | – | 2 | 3, 4 | 1,034 | 37,2 |
| Празеодим | Pr | 59 | 140,9077 | 3 | 2 | 6 | – | 2 | 3, 4 | 1,013 | 37,5 |
| Неодим | Nd | 60 | 144,24 | 4 | 2 | 6 | – | 2 | 3 | 0,995 | 37,8 |
| Прометий | Pm | 61 | (145)8* | 5 | 2 | 6 | – | 2 | 3 | 0,979 | 38,2 |
| Самарий | Sm | 62 | 50,4 | 6 | 2 | 6 | – | 2 | 2, 3 | 0,964 | 38,2 |
| Европий | Eu | 63 | 151,96 | 7 | 2 | 6 | – | 2 | 2, 3 | 0,950 | 38,8 |
| Гадолиний | Gd | 64 | 157,25 | 7 | 2 | 6 | 1 | 2 | 3 | 0,938 | 38,6 |
| Тербий | Tb | 65 | 158,9254 | 9 | 2 | 6 | – | 2 | 3, 4 | 0,923 | 39,4 |
| Диспрозий | Dy | 66 | 162,50 | 10 | 2 | 6 | – | 2 | 3 (4) | 0,908 | 39,5 |
| Гольмий | Ho | 67 | 164,9304 | 11 | 2 | 6 | – | 2 | 3 | 0,894 | 40,0 |
| Эрбий | Er | 68 | 167,26 | 12 | 2 | 6 | – | 2 | 3 | 0,881 | 40,2 |
| Тулий | Tm | 69 | 168,9342 | 13 | 2 | 6 | – | 2 | 3 (2) | 0,869 | 40,3 |
| Иттербий | Yb | 70 | 173,04 | 14 | 2 | 6 | – | 2 | 2, 3 | 0,858 | 40,8 |
| Лютеций | Lu | 71 | 174,97 | 14 | 2 | 6 | 1 | 2 | 3 | 0,848 | 41,0 |

* – Массовое число наиболее долгоживущего изотопа $^{145}Pm$.

Таблица 9.26

**Физические свойства лантаноидов**

| Металл | Плотность (рентгеновская), г/см$^3$ | $T_{пл}$, °C | $T_{кип}$, °C | Удельное объемное элекрич. сопротивление (при 25° C), ом·см· $10^6$ | Сечение захвата тепловых нейтронов, σ | Модуль упругости, кгс/мм$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| α (La) | 6,17 | 920 | 3470 | 56,8 | 8,9 | 3915 |
| γ-Ce | 6,77 | 795 | 3470 | 75,3 | 0,70 | 3058 |
| α-Pr | 6,78 | 935 | 3130 | 68,0 | 11,2 | 3592 |
| α-Nd | 7,01 | 1024 | 3030 | 64,3 | 44 | 3860 |
| α-Sm | 7,54 | 1072 | 1900 | 88 | 6500 | 3480 |
| Eu | 5,26 | 826 | 1440 | 81,3 | 4500 | – |
| α-Gd | 7,89 | 1312 | 3000 | 140,5 | 44000 | 5730 |
| α-Tb | 8,27 | 1356 | 2800 | – | 44 | 5864 |
| Dy | 8,53 | 1407 | 2600 | 56 | 1100 | 6433 |
| Ho | 8,80 | 1461 | 2600 | 87 | 64 | 6850 |
| Er | 9,05 | 1497 | 2900 | 107 | 166 | 7474 |
| Tm | 9,33 | 1545 | 1730 | 79 | 118 | – |
| α-Yb | 6,98 | 824 | 1430 | 27 | 36 | 1815 |
| Lu | 9,84 | 1652 | 3330 | 79 | 108 | – |

Примечание: Структура, плотность и ряд других свойств приведены для модификации, устойчивой при комнатной температуре. 1 кгс/мм$^2$ ≈ 10 Мн/м$^2$. σ – барн.

Таблица 9.27

## Некоторые физические свойства лантаноидов

| Металл | Плотность измеренная, кг/м$^3$ | Твердость по Бринеллю, МПа | Теплопроводность, Вт/·(м· К) | Удельное электрическое сопротивление, Ом · м | Удельная магнитная восприимчивость, м$^3$/кг | Температурный коэффициент линейного расширения, К$^{-1}$ | Площадь захвата тепловых нейтронов, м$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Лантан | 6145 | 350–400 | 13,5 | $57 \cdot 10^{-8}$ | $1{,}1 \cdot 10^{-8}$ | $4{,}9 \cdot 10^{-6}$ | |
| Церий | 8240 | 186–300 | 11,4 | $73 \cdot 10^{-8}$ | $2{,}17 \cdot 10^{-7}$ | $8{,}5 \cdot 10^{-6}$ | |
| Празеодим | 6773 | 250–500 | 12,5 | $68 \cdot 10^{-8}$ | $4{,}471 \cdot 10^{-7}$ | $6{,}79 \cdot 10^{-6}$ | |
| Неодим | 7007 | 265–700 | 16,5 | $64 \cdot 10^{-8}$ | $4{,}9 \cdot 10^{-7}$ | $6{,}7 \cdot 10^{-6}$ | |
| Самарий | 7520 | 441–600 | 13,3 | $94 \cdot 10^{-8}$ | $1{,}52 \cdot 10^{-7}$ | $10{,}4 \cdot 10^{-6}$ | $55 \cdot 10^{-26}$ |
| Европий | 5243 | – | 13,9 | $90 \cdot 10^{-8}$ | $2{,}8 \cdot 10^{-6}$ | $32{,}1 \cdot 10^{-6}$ | $46 \cdot 10^{-26}$ |
| Гадолинит | 7900 | – | 10,6 | $134 \cdot 10^{-8}$ | $6{,}0 \cdot 10^{-5}$ | $8{,}6 \cdot 10^{-6}$ | $49 \cdot 10^{-25}$ |
| Тербий | 8229 | 677–873 | 11,1 | $114 \cdot 10^{-8}$ | $1{,}15 \cdot 10^{-5}$ | $7{,}0 \cdot 10^{-6}$ | |
| Дискрозий | 8550 | 500–1050 | 10,7 | $57 \cdot 10^{-8}$ | $8{,}0 \cdot 10^{-6}$ | $10{,}0 \cdot 10^{-6}$ | $10 \cdot 10^{-26}$ |
| Гольмий | 8795 | 500–1250 | 16,2 | $87 \cdot 10^{-8}$ | $5{,}49 \cdot 10^{-6}$ | $9{,}5 \cdot 10^{-6}$ | |
| Эрбий | 9066 | 600–950 | 14,3 | $87 \cdot 10^{-8}$ | $3{,}33 \cdot 10^{-6}$ | $9{,}2 \cdot 10^{-6}$ | |
| Тулий | 9321 | 550–900 | 16,8 | $79 \cdot 10^{-8}$ | $1{,}091 \cdot 10^{-6}$ | $13{,}3 \cdot 10^{-6}$ | |
| Иттербий | 4469 | 343–441 | 17,2 | $57 \cdot 10^{-8}$ | $2{,}7 \cdot 10^{-8}$ | $10{,}6 \cdot 10^{-6}$ | |
| Лютеций | 9840 | 893–1300 | 16,4 | $79 \cdot 10^{-8}$ | $1{,}3 \cdot 10^{-9}$ | $8{,}2 \cdot 10^{-6}$ | |

насыщения, огромными величинами энергии магнитной анизотропии и магнитострикции. Это позволяет использовать их для изготовления магнитных материалов с уникальными свойствами. У α-La и β-La обнаружены свойства сверхпроводников при температурах, соответственно, 4,9 К и 5,85 К.

Для использования лантаноидов в промышленности и других сферах важное значение имеют не только их физические, но и химические свойства. Они легко реагируют со многими веществами, образуют тугоплавкие оксиды, гидроксиды их ($R(OH)_3$) имеют основной характер и не растворимы в щелочах. Большинство простых солей лантаноидов образуют двойные соли с солями щелочных металлов, аммония, магния. Они дают комплексные соединения со многими органическими веществами, в частности, важное значение имеют комплексы, образуемые с лимонной, нитрилотриуксусной, этилен-диаминтетрауксусной кислотами и другими комплексонами. Эти соединения широко используются в технологиях и процессах разделения лантаноидов. Все редкоземельные элементы относятся к слаботоксичным. ПДК их в некоторых соединениях даны в табл. 9.28.

### *9.17.2. Распространенность и запасы.*

Все лантаноиды относятся к малораспространенным химическим элементам. Суммарный кларк их для земной коры составляет $1{,}78 \cdot 10^{-2}\%$ к массе. При этом кларки элементов с четными атомными номерами (Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb) распространены больше, чем с нечетными (La, Pr, Eu, Tb, Ho, Tm, Lu) (табл. 9.29). В ультраосновных горных породах по К. Таркьяну и К. Ведеполю содержания всех РЗЭ $n \cdot 10^{-5}\%$. Содержание диспрозия в морской воде – $7.3 \cdot 10^{-7}$ мг/дм$^3$.

Наиболее распространены легкие лантаноиды: лантан, церий и неодим. Лантаноиды – преимущественно литофильные элементы кислых и щелочных магм. Общей сводки о распространенности их в щелочных горных породах еще не сделано и это должно быть делом ближайшего будущего, так как именно в них они образуют промышленно важные концентрации.

Таблица 9.28

**Сводка данных о токсичности лантаноидов и их соединений**

| Элемент | Класс опасности | ПДК различных соединений | | |
|---|---|---|---|---|
| | | соединение | ед. измерения | $ПДК_{р.з}$ |
| La | Слаботоксичный | Люминофор $(La-Gd)PO_4$ | мг/м$^3$ | 4 |
| | | $La_2O_3$ | -«- | 6 |
| Ce | III | $CeF_3$ | -«- | 2,5 |
| Pr | Слаботоксичный | $Pr_2O_3$ | -«- | 6 |
| Nd | III | $Nd_2O_3$ | -«- | 6 |
| | | $NdF_3$ | -«- | 2,5 |
| Sm | III | $SmCl_3$ | -«- | 5 |
| | | $Sm_2(SO_4)_3$ | -«- | 5 |
| | | $Sm_2O_3$ | -«- | 5 |
| Eu | Слаботоксичный | $Eu_2O_3$ | -«- | 6 |
| Gd | -«- | $Gd_2O_3$ | -«- | 4 |
| Tb | -«- | $Tb_2O_3$ | -«- | 4 |
| Dy | -«- | $DyCl_3$ | -«- | 5 |
| Ho | -«- | $Ho_2O_3$ | -«- | 4 |
| Er | -«- | $Er_2O_3$ | -«- | 4 |
| Tm | -«- | $Tm_2O_3$ | -«- | 4 |
| Yb | -«- | $Yb_2O_3$ | -«- | 4 |
| Lu | -«- | $Lu_2O_3$ | -«- | 4 |

Таблица 9.29

**Распространенность редкоземельных элементов в земной коре и компонентах литосферы (г/т), запасы и производство**

| Элемент | Земная кора | Горные породы | | | | | Почвы | Мировые запасы, млн. т | Мировое Производство, тыс. т |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | основные | средние | кислые | осадочные | ультраосновные | | | |
| La | 29 | 27 | 11,9 | 60 | 40 | н.д. | 25–38 | 15 | 14 |
| Ce | 70 | 4,5 | 24 | 100 | 50 | н.д. | н.д. | 27 | 7 |
| Pr | 9 | 4 | 3,2 | 12 | 5 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,2 |
| Nd | 37 | 20 | 13 | 46 | 23 | н.д. | н.д. | 15 | 14 |
| Sm | 8 | 5 | 2,9 | 9 | 6,5 | н.д. | н.д. | н.д. | 1 |
| Eu | 1,3 | 0,01 | 1,0 | 1,5 | 1,0 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,04 |
| Gd | 8 | 5 | 3,3 | 9 | 6,5 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,1 |
| Tb | 1,0 | 0,8 | 0,68 | 2,5 | 0,9 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,011 |
| Dy | 5 | 2 | 2,2 | 6,7 | 4,5 | 0,01 | н.д. | н.д. | 0,2 |
| Ho | 1,7 | 1,0 | 0,71 | 2,0 | 1,0 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,1 |
| Er | 3,3 | 2,0 | 2,1 | 4,0 | 2,5 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,1 |
| Tm | 0,27 | 0,2 | 0,30 | 0,3 | 0,25 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,1 |
| Yb | 3,3 | 2,0 | 1,9 | 4,0 | 3,0 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,005 |
| Lu | 0,8 | 0,6 | – | 1,0 | 0,7 | н.д. | н.д. | н.д. | 0,1 |

Примечание: Кларки РЗЭ в породах среднего состава по С. Тейлору, в остальных – по А.П. Виноградову.
Н.д. – нет данных.

Распространенность РЗЭ в морской воде очень невелика. Например, для Но она составляет всего $2,2 \cdot 10^{-7}$ мг/дм$^3$, а для Eu – $1,1 \cdot 10^{-6}$ мг/дм$^3$.

Общие мировые запасы подсчитаны не для всех лантаноидов, так как многие из них не дают собственных месторождений. Они сосредоточены в комплексных собственно редкоземельных или редкоземельно-редкометалльных месторождениях и извлекаются попутно.

Мировые подтвержденные запасы редких земель в РЗО без стран СНГ оцениваются в 100 млн. тонн. При этом на долю La, Ce и Nd приходится более половины всех запасов. Годовое производство отдельных РЗЭ широко варьирует – от 5 т до 14 тыс. т (табл. 9.29). Основная доля производства приходится на La и Nd (по 14 тыс. т/год) и Ce (7 тыс. т/год). Остальные производятся в пределах 40–200 т/г. Минимально производство иттербия (около 5 т/год). Основными производителями РЗЭ являются Китай и США. Наиболее крупными производителями лантана, неодима, празеодима являются Китай, США, Индия, Бразилия, ЮАР, церия – США, Китай, ЮАР, Бразилия и Вьетнам. Китай, США, Австралия и Индия являются крупнейшими производителями самария, европия, гадолиния, тербия, диспрозия, гольмия, эрбия, тулия, иттербия и лютеция.

В России основное производство РЗЭ сосредоточено на Ловозерском ГОКе в Мурманской области.

### *9.17.3. Области использования.*

В связи с тем, что только в первой половине XX столетия были разработаны основные технологии получения редких земель из их руд, они до сих пор являются объектом исследований в смысле использования их в различных сферах деятельности человека. Наиболее широкое применение они нашли как катализаторы в крекинге нефти, металлургии для легирования сплавов, в стекольном и керамическом производстве и в сельском хозяйстве.

Они используются в виде чистых металлов, сплавов и химических соединений. Так, присадки лантаноидов улуч-

шают структуру, механические свойства, коррозионную устойчивость и жаропрочность чугуна, стали, магниевых, алюминиевых и других сплавов. Добавки окислов лантаноидов придают стеклу особые физические свойства и окраску. Они используются для окраски фарфора, глазурей и эмалей. Бориды лантаноидов идут на изготовление катодов мощных электронных приборов. В СВЧ электронике и вычислительной технике используют редкоземельные ферриты – гранаты и ортоферриты. Лантаноиды входят в состав кристаллов для лазеров, в качестве добавок в кристаллы $CaF_2$ и других солей. В легкой и химической промышленности соединения лантаноидов служат для изготовления лаков и красок, светящихся составов (люминофоров), катализаторов, фотореагентов. В сельском хозяйстве соединения лантаноидов применяют в качестве инсектицидов и микроудобрений.

Установлено [Кожевникова и др.,2007], что модифицированные редкими землями цеолиты представляют собою эффективные абиотические катализаторы, играющие существенную роль в химических процессах накопления, трансформации и переноса органических веществ. Во внесенных в почву модифицированных редкими землями (лантаном, церием, неодимом, самарием) цеолитах образуются почвенные комплексы с биолигандами аминокислот, а также гуминовых и фульвокислот, карбоксильными и фосфатными группами. Размеры их становятся больше полостей, образуемых каналами в каркасной структуре цеолитов. Вследствие этого они не могут выйти из цеолитов и длительно удерживаются в них, играя роль катализаторов. Лантан, неодим и самарий активизируют, например, азотный и фосфорный обмен, столь важный для функционирования растений, и способствуют увеличению урожаев.

**Лантан** применяют в производстве оптического стекла, никель-гидратных батарей, керамических конденсаторов стали, жаропрочных сплавов, люминофоров $(La\text{-}Gd)PO_4$, в волоконной оптике.

**Церий** используется для легирования сталей, в производстве титановых, медных, жаропрочных никель-кобальтовых, магнитных сплавов. Церий и сплав металлов цериевой группы

(«мишметалл») входят в состав нераспыляющихся поглотителей газов (геттеров) в электровакуумных приборах. Двуокись церия $CeO_2$ в виде тончайшего (<5 мкм) порошка используют для полировки оптического стекла и граненых вставок самоцветов. Соединения церия применяют для очистки дымовых газов.

**Празеодим** используется в железных и магниевых сплавах, для окрашивания стекла и керамики, в постоянных магнитах, катализаторах. С помощью интерметаллического соединения $PrNi_5$ удалось измерить сверхнизкие температуры – миллионные доли градуса выше абсолютного нуля.

**Неодим** применяют в постоянных магнитах, для окрашивания стекла, для производства керамических конденсаторов, в цветном телевидении, лазерах, лампах накаливания, в железных, магниевых, титановых и алюминиевых сплавах.

**Самарий,** обладающий большим сечением захвата тепловых нейтронов, используется для защиты от излучения и управления работой атомных реакторов. Его применяют в ускорителях заряженных частиц. В соединениях с кобальтом (типа $SmCo_5$), обладающих рекордной силой притяжения, применяют в магнитах для миниатюрных электромоторов, используемых в производстве роботов, компьютеров, телефонной печатающей аппаратуры, измерительных приборов. Эти редкоземельные сплавы используют в радио- и микроэлектронике.

**Европий** нашел применение в составе защитных керамических покрытий ядерных реакторов и в регулирующих стержнях в ядерных реакторах. Он используется в люминофорах, для цветного телевидения и в высокоэффективных люминесцентных лампах.

**Гадолиний** – важный компонент магнитных сплавов с Fe, Ni, Co. Он является перспективным материалом для изготовления регулирующих стержней ядерных реакторов (поглотителей нейтронов). $Gd_2O_3$, активированный европием, – люминофор красного свечения. Оксисульфид Gd, активированный тербием, является рентгенолюминофором.

Гадолиний вводят в качестве изоморфной легирующей добавки для выращивания галлий-гадолиниевых гранатов ($Gd_3Ga_2[GaO_4]$), используемых в микроволновых печах, крио-

генных устройствах, лазерах. Он используется как подложка для наращивания эпитаксиальных пленок железных гранатов. Микрокристаллы гадолиний-галлиевых гранатов, а также скандий-гадолиний-галлиевых гранатов выращивают по методу Чохральского из расплавленных смесей оксидов Ga, Gd и Sc при температуре выше 1500° С со скоростью вытягивания 2–4 мм/ч в атмосфере $N_2$ (98%) $O_2$ (2%). Гадолиний используют также для получения специальных оптических стекол.

**Тербий** используют для производства люминофоров для цветных телевизоров и высокоэффективных люминесцентных ламп. Он нашел применение в производстве магнитострикционных и магнитооптических материалов, катализаторов, рентгеновской техники.

**Диспрозий**, обладающий большим магнитным моментом трехвалентного иона, используется в производстве магнитов, магнитострикционных устройствах, измерителях нейтронных потоков, а большое сечение захвата тепловых нейтронов (1199 барн) обеспечило его применение в регулирующих стержнях ядерных реакторов. Кроме того, он используется в люминофорах, катализаторах, микроволновых приборах.

**Гольмий** является компонентом некоторых магнитных сплавов, используется в керамических сверхпроводниках, лазерах как активатор в люминофорах, в оптических стеклах, а также в некоторых материалах микроэлектроники.

**Эрбий** используется в стекольном производстве, в люминофорах, лазерах, микроволновой и ядерной технике, в производстве катализаторов.

**Тулий** используется в лазерах, рентгенолюминофорах, светодиодах, ядерной технике. Радиоактивный изотоп тулия ($^{170}$Tm) используется в рентгеновских установках медицинского назначения.

**Иттербий** применяют в катализаторах, в рентгенотехнике, в приборах для определения давления.

**Лютеций** нашел широкое применение в оптоэлектронике, люминофорах и в производстве дисплеев различного назначения.

Радиоактивный изотоп **прометия** ($^{147}$Pm) применяют для изготовления микроэлектробатарей.

### *9.17.4. Минеральный состав и типы руд.*

Известно более 120 редкоземельных минералов. Промышленное значение имеют как собственно редкоземельные, в которых катионы представлены, в основном, редкими землями, так и минералы, в которых редкие земли являются существенными изоморфными примесями, или эти примеси присутствуют в минералах, добыча которых производится в больших объемах, и редкие земли извлекаются из них попутно. Большинство редкоземельных минералов уже рассматривалось в разделах, посвященных танталу, ниобию, иттрию, скандию, торию. К собственно редкоземельным промышленным минералам относятся: лопарит (Na,Ce,Ca) (Ti,Nb)$O_3$ содержит 14,0–34,61 $TR_2O_3$), разновидность его ниоболопарит ((Na,Ce) (Ti,Nb)$O_3$, содержит до 25,55 $\Sigma Ce_2O_3$), монацит ((Ce,La) $PO_4$, содержит (%): TR – 45; $Y_2O_3$+$TR_2O_3$ – до 72,0), ксенотим ($YPO_4$, 36% $Y_2O_3$, $\Sigma Y_2O_3$ – 56,81–67,78%, $\Sigma Ce_2O_3$ – 0,1–3,02%), рабдофанит ($CePO_4 \cdot H_2O$, содержит (%): $\Sigma Ce_2O_3$ – 50,30–63,68, бастнезит ($CeCO_3F$, содержит (%): Ce до 31,4; La+Dy – до 25,8; $Ce_2O_3$ – 30,5; $(La+Dy)_2O_3$ – 30,3), синхизит (Ce Ca $(CO_3)_2 \cdot F$, содержит (%): Ce – 22,5; La+Dy – 22,7; $Ce_2O_3$ – 24,6; $(La+Dy)_2O_3$ – 26,2).

В качестве носителей редких земель, как важных изоморфных примесей, используются пирохлор $[(Na,Ca,U,TR)_{2-m}(Nb,Ta)_2O_6(O,F)_{1-n} \cdot nH_2O$. Обычный пирохлор содержит менее 1% $TR_2O_3$, иногда – до 4%, в редкоземельных его разновидностях – обручевите и мариньяките – до 10 и более %.

Вариации содержаний $TR_2O_3$ следующие (%): $Ce_2O_3$ – 0,38–1,37; $\Sigma Ce_2O_3$ – 0,32–13,39; $\Sigma Y_2O_3$ – до 13,42. Обручевиты содержат (%): $\Sigma Y_2O_3$ – 7,59–13,42; $\Sigma Ce_2O_3$ – 0,66–1,56 и $Ce_2O_3$ – до 1,3. В их составе преобладают иттриевые редкие земли [Минералы, 1967]. Мариньякиты содержат (%): $\Sigma Y_2O_3$ – до 5,07; $\Sigma Ce_2O_3$ – 13,33. Состав TR в редкоземельных разновидностях пирохлора представлен в табл. 9.30. Из нее видно, что в обручевите концентрируются TR иттриевой группы, а в мариньяките – цериевой.

В качестве источников TR, как попутных компонентов, используются титано-тантало-ниобаты – эвксенит ((Y,Ce)(Nb,

Таблица 9.30

**Относительное содержание индивидуальных редких земель в редкоземельных пирохлорах**
Составлена по: [Минералы, 1967]

| Элемент | Содержание, минерал, % | |
|---|---|---|
| | обручевит | мариньякит |
| La | 0,9–1,8 | 14 |
| Ce | 3,0–3,1 | 31 |
| Pr | 0,8–1,7 | 5 |
| Nd | 3,9–5,0 | 12 |
| Sm | 4,5–9,6 | 4 |
| Eu | 0,1 | – |
| Gd | 5,5–17,0 | 3 |
| Tb | 1,2–1,8 | – |
| Dy | 8,0–8,4 | 4 |
| Ho | 0,9–1,7 | 1 |
| Er | 1,5–7,0 | 2 |
| Tm | 0,4–1,3 | 1 |
| Yb | 0,9–8,5 | 0,3 |
| Lu | 0,1–1,4 | 0,3 |
| Y | 50 | 23 |

Ti,Ta)$_2$(O,OH)$_6$, содержит (%): 16,6–28,7 $Y_2O_3$ + $\Sigma Y_2O_3$, 0,2–9,54 $\Sigma Ce_2O_3$, 20,73–33,43 $\Sigma Y_2O_3$ + $\Sigma Ce_2O_3$), самарскит ((Y,TR,U,Ca,$Fe^{2+}$)(Nb,Ta,$Fe^{2+}$,Ti)$O_4$, содержит (%): $Y_2O_3$ – до 0,54; $\Sigma Y_2O_3$ 1,24–17,26; $Ce_2O_3$ – до 17,65, $\Sigma Ce_2O_3$ – до 2,23).

Распределение индивидуальных редких земель в самарските дано в табл. 9.31.

Как видно из табл. 9.31, самарскит в случае существенных концентраций может быть важным источником самария, гадолиния и диспрозия.

Из силикатов источниками редких земель являются меланоцерит, гадолинит, бритолит, эвдиалит и кейвиит-тортвейтит.

Таблица 9.31

**Относительное содержание редкоземельных элементов в самарските**
Составлена по: [Минералы, 1972]

| Элемент | Содержание, % | Элемент | Содержание, % |
|---|---|---|---|
| La | 0,4–0,5 | Tb | 1,3–8,9 |
| Ce | 0,8–1,6 | Dy | 9,7–14 |
| Pr | 0,5–0,6 | Ho | 1,1–3,4 |
| Nd | 1,6–2,1 | Er | 1,2–5,5 |
| Sm | 7,0–9,7 | Tm | 0,5–0,9 |
| Eu | 0,2–0,5 | Yb | 0,6–3,9 |
| Gd | 9,0–34,0 | Lu | 0,3–1,0 |
| | | Y | 35–50 |

Бритолит $(Ce,Ca_2(SiO_4)_3$ содержит (%) (табл. 9.32): $\Sigma Ce_2O_3$ – 19,04–22,48; $\Sigma La_2O_3$ – 18,04–54,17 и 3,42–19,36. Может быть использован для получения церия, лантана и неодима. Гадолинит ($Y_2Fe^{2+}Be_2[SiO_4]_2O_2$) содержит (%): $Ce_2O_3$ – 0,67–23,40, $\Sigma(La,Dy)_2O_3$ – до 21,23, $\Sigma(Ce_2O_3 + \Sigma(La,Dy)_2O_3)$ 2,85–32,33; $\Sigma(Y,Er)_2O_3$ – 17,39–49,06; $\Sigma TR_2O_3$ – 30,37–54,57. В гадолините обычно 36–46% Y замещается Er, Yb и другими элементами иттриевой группы, а также Ce и элементами цериевой группы (La, Dy и другими).

Эвдиалит ($Na_{12}Ca_6Fe_3Zr_3\{Si_3O_9\}_2[Si_9O_{24}(OH)_3]_2$) содержит до 2,56% $TR_2O_3$, иногда – до 10,2%. В эвдиалитах нефелиновых сиенитов преобладают (относительно суммы $TR_2O_3Ce$) Ce (41%), Y (34,9%) и La (25,8%), содержание Nd составляет 15% от суммы $TR_2O_3$. Источником иттербия может быть кейвиит ($Yb_2Si_2O_7$), образующий изоморфный ряд с тортвейтитом ($Sc_2Si_2O_7$). Главные минералы – промышленные источники редкоземельных элементов даны в табл. 9.33.

Кроме отмеченных в ней минералов, надежным источником большинства лантаноидов является апатит нефелиновых сиенитов, содержащий от десятых долей до первых процентов

Таблица 9.32

## Особенности состава минералов – источников лантаноидов

| Элемент | Минерал и содержание в нем РЗО, % | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | монацит | | ксенотим | | бастнезит | | синхизит | | чёрчит | | гагаринит | |
| | содержание | | содержание | | содержание | | содержание | | содержание | | содержание | |
| | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО |
| Лантан | 27,63–33,19 | 24,3 | | до 6,7 | 36,29–75,81 | 25–39 | 22,88–28,67 | 20 | 1,99 | 1,2 | 54,0–56,75 | 1,5–0,8 |
| Церий | 19,65–32,16 | 44,8 | 0,1–3,02 | до 15,3 | 29,94–74,77 | 44–53,7 | 21,98–28,14 | 41 | 1,05 | 3,4 | | 3,5–7,7 |
| Празеодим | | 5,2 | | до 2,3 | | 3,2–5,6 | | 5,2 | | 0,6 | | 0,8–2,0 |
| Неодим | | 18,8 | | до 8,7 | | 8–23 | | 20 | | 2,3 | | 3,8–6,7 |
| Самарий | | 3,9 | | до 3,3 | | 0,1–1,8 | | 3,5 | | 2 | | 3,8–5,7 |
| Европий | | до 0,1 | | до 0,6 | | до 0,1 | | 0,4 | | 0,3 | | 0,3–0,7 |
| Гадолиний | | 2 | | 1,5–8,0 | | до 0,9 | | 2,6 | | 6,5 | | 7,4–10,0 |
| Тербий | | до 0,3 | | 0,7–1,6 | | до 0,1 | | 0,4 | | 1,0 | | 1,3–1,7 |
| Диспрозий | | до 1,6 | | 5,8–14 | | до 0,3 | | 0,7 | | 12 | | 11–12 |
| Гольмий | | до 0,3 | | 1,1–3,5 | | – | | 0,2 | | 2,9 | | 2,5–2,8 |
| Эрбий | | до 0,7 | | 4,0–12,0 | | до 0,1 | | 0,4 | | 8,5 | | 7,5–8,2 |
| Тулий | | – | | до 1,9 | | – | | – | | 1,5 | | 0,7–1,2 |
| Иттербий | | до 0,4 | | 4,4–19,3 | | – | | 0,6 | | 7 | | 3,6–5,7 |
| Лютеций | | | | до 3,0 | | – | | – | | 1,2 | | 1,3–1,8 |
| Иттрий | 0,94–5,08 | до 10 | $Y_2O_3$ – 61,40 | 43,7–68,9 | | до 0,3 | 1,23 | 5 | 41,37–52,90 | 50 | | 35–50 |
| $\sum TR_2O_3$ | 72,0 | | 56,81–67,78 | | | | | | | | | |

*Окончание на с. 206*

Таблица 9.32 (окончание)

| Элемент | Минерал и содержание в нем РЗО, % | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TR-флюорит | | рабдофанит | | бритолит | | меланоцерит | | эвдиалит | | лопарит | |
| | содержание | | содержание | | содержание | | содержание | | содержание | | содержание | |
| | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО | сумма РЗО | элемент от суммы РЗО |
| Лантан | | 2,2–4,4 | | 17–45 | 18,04–54,17 | 17–32,2 | 32,53–41,37 | 12,94 | | 25,8 | – | 24–33 |
| Церий | 1,43–14,0 | 6,1–11 | 5,03–63,68 | 43–56 | 19,04–22,48 | 30,53–55,2 | 3,52–11,12 | 20,76 $CeO_2$ – 3,68 | | 41,0 | 14,92–31,97 | 53–55 |
| Празеодим | | 1,0–1,1 | | 3,0–7,8 | | 3,1–5,6 | | – | | 4,6 | | 4,5–6,0 |
| Неодим | | 4,2–4,7 | | 6–19 | | 9,9–19,8 | | – | | 15,0 | | 9,3–15,0 |
| Самарий | | 2,5–2,8 | | до 3,4 | | 0,4–3,6 | | – | | 3,5 | | 0,2–0,9 |
| Европий | | 0,12–0,2 | | до 0,3 | | до 0,2 | | – | | – | | до 0,08 |
| Гадолиний | | 5,1–6,4 | | до 2,0 | | до 2,3 | | – | | 4,3 | | до 0,56 |
| Тербий | | 0,94–1,0 | | до 0,3 | | до 0,1 | | – | | – | | до 0,037 |
| Диспрозий | | 5,2–7,4 | | до 1,3 | | до 2,7 | | 7,67 | | 3,0 | | до 0,12 |
| Гольмий | | 1,0–1,6 | | до 0,2 | | до 0,8 | | – | | 0,4 | | до 0,008 |
| Эрбий | | 2,5–6,2 | | до 0,5 | | до 2,2 | | – | | 1,4 | | до 0,016 |
| Тулий | | 0,44–0,1 | | – | | до 0,3 | | – | | – | | до 0,003 |
| Иттербий | | 5,1–8,1 | | до 1,3 | | до 2,0 | | – | | до 0,9 | | до 0,008 |
| Лютеций | | 1,0–1,6 | | – | | до 0,2 | | – | | – | | до 0,002 |
| Иттрий | | 50–55 | | до 5 | $Y_2O_3$ – 3,45–19,36 | до 25,6 | 3,21–9,17 | – | | до 34,9 | до 0,46 | до 0,008 |
| $\sum TR_2O_3$ | | | 64,88 | | 54,47–60,54 | | 51,44–56,42 | – | 0,09–8,20 | | 28,8–32,22 | |

Таблица 9.33

**Минералы – промышленные источники лантаноидов**

| Элемент | Минерал | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Монацит | Ксенотим | Бастнезит | Синхизит | Иттросинхизит | Черчит | Гагаринит | ТR-флюо-орит | Кейвинит-тортвеитит | Рабдофанит | Перро-хлор | Церитосонит | Лопарит | Эвксенит | Гадо-линит | Самарскит | Эвдиалит | | | |
| La | + | | + | | | | | | | | + | | + | | | | | | | |
| Ce | + | | + | | | | | | | | | | + | | | | | | | |
| Pr | + | | + | + | | | | | | | | | + | | | | + | | | |
| Nd | + | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | |
| Sm | + | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Eu | + | + | | | | + | | | | + | | | | | | | + | | | |
| Gd | + | + | | | + | + | + | | | | | | | | | | | | | |
| Tb | | + | | | + | | | | | | + | | | | | | | | | |
| Dy | | + | | | + | + | + | | | | | | | | + | | | | | |
| Ho | | + | | | | + | | | | | | + | | + | | | | | | |
| Er | | | | | | | + | | | | | | | + | + | | + | | | |
| Tm | | + | | | | + | | | | | | + | | + | | | | | | |
| Yb | | + | | | + | + | + | + | | | | | | + | + | | + | | | |
| Lu | | + | | | | | | | + | | | + | | | | | | | | |

суммы редких земель. Как попутные компоненты при переработке фторапатита нефелиновых сиенитов извлекаются лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, тербий. Сырьем для самария является также костный детрит ископаемых позвоночных.

Редкоземельные элементы не образуют собственных месторождений, а находятся в рудах комплексных редкометалльно-редкоземельных месторождений.

К наиболее важным типам месторождений редких земель цериевой группы относят карбонатиты щелочных сиенитов, уртиты и малиньиты с лопаритом и развитые на них коры выветривания, а также россыпи. Наиболее важными из месторождений иттриевых редких земель принято считать редкометалльные щелочные граниты и метасоматиты, гидротермально-преобразованные коры выветривания, ураноносные конгломераты, прибрежно-морские россыпи, органогенно-осадочные образования, обогащенные фосфатами и углистым веществом.

По запасам РЗО (тыс. т) месторождения редких земель цериевой группы подразделяются на весьма крупные – более 10 000, крупные – 10 000–1000, средние – 1000–100 и мелкие – менее 100. Выделяют следующие промышленные типы руд: лопаритовый, бастнезитовый, монацитовый, апатитовый, эвдиалитовый, синхизитовый. По содержанию РЗО (%) руды подразделяются на весьма богатые (более 10), богатые (10–5), рядовые (5–3), бедные (менее 3).

Среди месторождений иттриевых редких земель выделяют (тыс. т): весьма крупные (более 500), крупные (500–100), средние (100–10), мелкие (менее 10). Выделяют следующие промышленные типы руд: монацитовый, апатитовый, детритовый, ксенотимовый, гагаринитовый, эвдиалитовый, рабдофанитовый, чёрчитовый, иттросинхизитовый, фергюсонитовый.

По содержанию РЗО (%) руды подразделяются на весьма богатые (более 1,0), богатые (1,0–0,5), рядовые (0,5–0,1) и бедные (менее 0,1).

### *9.17.5. Добыча и переработка руд.*

Месторождения разрабатывают подземным и открытым способами, россыпи – гидромеханизированным и дражным. Подготовку руды к переделу производят по развитым комбинированным технологиям обогащения с применением магнитных, электрических и гравитационных процессов. Извлечение РЗМ из руд различных типов находится в пределах 20–80% при содержании РЗО в коллективном концентрате 27–70%. При обогащении комплексных руд попутно получают редкометалльные (Ta-Nb), циркониевые, полевошпатовые, фосфатные, баритовые, урановые и криолитовые концентраты.

Коллективные редкоземельные концентраты перерабатывают гидрометаллургическим способом, хлорированием, фторированием, экстракцией трибутилфосфатом, воздействием других реагентов. Монацитовые, бастнезитовые и другие фторкарбонатные концентраты разлагают концентрированной серной кислотой при нагревании до 200° С с последующим выщелачиванием массы соединений редких земель водой. Из сернокислых соединений сначала выделяют торий. Затем осаждают РЗЭ в виде оксалатов, двойных сульфатов или других соединений.

Монацитовые концентраты с целью их разложения обрабатывают также растворами щелочей. Образующуюся при этом смесь гидроокисей растворяют в соляной или азотной кислоте.

Бастнезитовые концентраты обжигают при 400–800° С для частичного или полного разложения фторкарбоната, сопровождающегося выделением $CO_2$. Продукт обжига обрабатывают азотной кислотой. Затем из растворов осаждают РЗЭ в виде фторидов или двойных сульфатов или извлекают экстракцией трибутилфосфатом.

Лопаритовое, эвксенитовое и подобное редкоземельно-редкометалльное сырье хлорируют в присутствии угля при 700–800° С. Титан, ниобий и тантал, присутствующие среди

продуктов хлорирования в виде летучих хлоридов, удаляют вместе с другими газами и затем перерабатывают. В печи остается сплав хлоридов РЗЭ. Их растворяют в воде, выделяя затем в виде оксалатов.

Разделение индивидуальных редких земель основано на небольших различиях в свойствах их соединений. Одним из методов их получения является дробная кристаллизация солей, например, двойных нитратов, дробное осаждение гидроксидов, сульфатов, оксалатов и др. В настоящее время наиболее употребительны экстракционные методы разделения, основанные на различиях коэффициентов распределения между водным раствором и органическим растворителем. Сочетание этих методов с ионообменной хроматографией обеспечивает получение лантаноидов высокой чистоты. Для отделения Ce используется его способность к окислению до четырехвалентного состояния, а Sm, Eu и Yb – восстановлению до двухвалентного. Чистые РЗМ (редкоземельные металлы) получают металлотермией или электролизом. В металлотермическом способе используют способность восстановления РЗМ из безводных хлоридов или фторидов чистым кальцием, натрием или литием. Восстановление производят в стальных бомбах, футерованных окисью кальция или в тиглях из тантала в атмосфере чистого аргона. Этим способом получают все лантаноиды, кроме Sm, Eu и Yb. Эти три металла восстанавливают из их окислов лантаном с последующей их дистилляцией.

Все лантаноиды можно получить электролизом их соединений в солевых расплавах. Металлы цериевой подгруппы, отличающиеся относительно низкими температурами плавления, получают электролизом безводных хлоридов в расплавах $KCl+CaCl_2$ или KCl + NaCl. Более тугоплавкие металлы иттриевой подгруппы получают электролизом с жидким катодом из кадмия или цинка. Затем примеси Cd и Zn, как легкоплавкие металлы, отгоняются в вакууме. Металлотермический способ позволяет получать более чистые металлы по сравнению с электролитическим. Требования к товарной продукции РЗМ даны в табл. 9.34.

Таблица 9.34

## Требования к товарной продукции РЗМ

| Элемент | Извлечение РЗМ, % | | Соединение | Содержание, % $TR_2O_3$ | Вредные примеси в продукте | Вредные примеси в концентрате |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | содержание в концентрате, % | $TR_2O_3$ | | | | |
| Лантан | 60–70 | до 60 | $La_2O_3$ | 99,89577–99,99635 | V,Mn,Ni,Ti,Cu,Cr,Ca,Fe | Ca, Fe |
| Церий | 80 | 12–30 | $CeO_2$ | 99,79370–99,99646 | V,Ca,Mn,Cu,Ni,Ti,Cr | |
| Празеодим | 65–80 | 1–4 | $Pr_2O_3$ | 99,98404–99,87868 | Ca,Fe,Cu,Sn,Cl | Ca,Fe,Si |
| Неодим | 60–75 | до 39 | $Nd_2O_3$, Nd | 99,48963–99,98162 $Nd_2O_3$ более 58 Nd | V,Co,Mn,Cu,Ni,Ti,Cr, Fe,Ca | Fe |
| Самарий | до 75 | 1,5 | $Sm_2O_3$ | 99,48945–99,996968 | Fe,Cu,Co,Si,Cl | Fe |
| Европий | – | – | $Eu_2O_3$ | 99,89787–99,98837 | Ca,Fe,Cu,Si,Cl,Zn | |
| Гадолиний | более 50 | более 0,5 | $Gd_2O_3$ | 99,4894–99,9995 | Ca,Fe,Cu,Si,Cl | |
| Тербий | – | – | $Tb_2O_3$ | 99,45261–99,99231 | Ca,Si,Fe,Cu,Cl | |
| Диспрозий | – | – | $Dy_2O_3$ | 98,98923–99,97979 | Ca,Fe,Cu,Si,Cl | |
| Гельмий | – | – | $Ho_2O_3$ | 99,4946–99,9969 | Ca,Fe,Cu,Si,Cl | |
| Эрбий | – | – | $Er_2O_3$ | 99,49482–99,99747 | Ca,Cu,Fe,Si,K,F,Cl | |
| Тулий | – | – | $Tm_2O_3$ | 99,49461–99,99848 | Ca,Fe,Cu,Si,Cl | |
| Иттербий | 60 | 0,5 | $Yb_2O_3$ | 99,49461–99,92848 | Ca,Cu,Fe,Si,Cl | Fe |
| Лютеций | – | – | $Lu_2O_3$ | 99,49459–99,99848 | Ca,Cu,Fe,Si,Cl | |

### *9.17.6. Источники лантаноидов в Забайкалье.*

В Забайкалье находится **Катугинское** – одно из крупнейших месторождений комплексных редкометалльно-редкоземельных руд. Выше уже рассмотрены основные особенности его геолого-структурной позиции, минерального состава и зональности в распределении руд (см. разд. 9, рис. 9.12). Здесь рассмотрим лишь редкоземельную составляющую этого месторождения. На рис 9.23. даны два разреза месторождения. Один из них (XIII) дает представление о строении месторождения в направлении с юга на север, другой (XXIII) – с запада на восток.

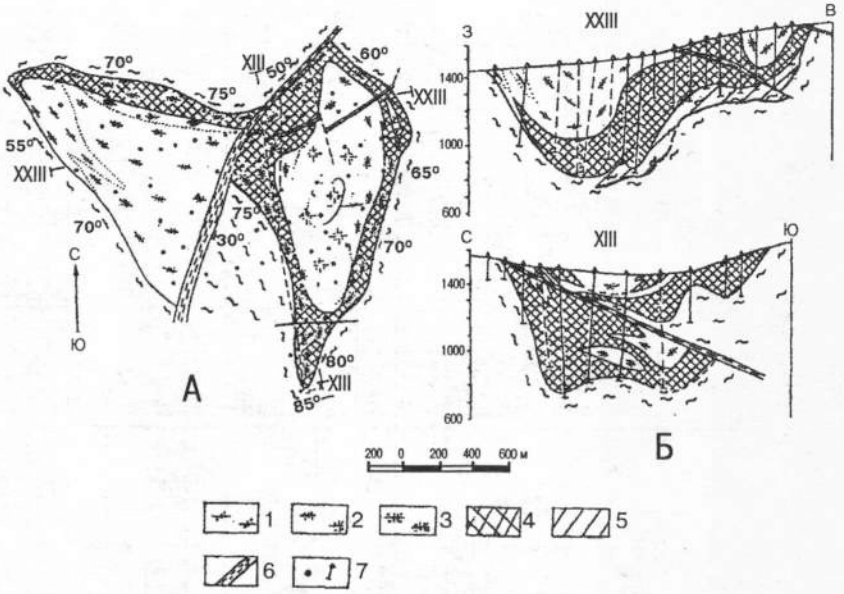



Рис. 9.23. Зональность строения и размещения оруденения Катугинского месторождения (по Ю.В. Быкову и др., 1987 г.)

*А– план, Б – разрезы. 1–3: метасоматиты (1 – биотитовые, 2 – амфиболовые, 3 – эгирин-амфиболовые); 4 – богатые танталниобиевые руды; 5 – богатые иттриево-редкоземельные руды; 6 – разрывы, сопровождающиеся мощными зонами катаклаза; 7 – скважины на плане и разрезах.*

Отчетливо видно, что восточная часть рудной залежи имеет двучленное строение и верхняя часть сложена, в основном, тантал-ниобиевыми рудами, а нижняя, восточная, – иттриево-редкоземельными. Однако резких границ между этими зонами нет и они связаны взаимопереходами.

Как следует из табл. 9.22, 9.24 и рис. 9.24, редкие земли связаны здесь с пирохлором, редкоземельным флюоритом и гагаринитом, частью – с цирконом. Иттриевые редкие земли входят также в состав фергюсонита, но общее его содержание в рудах невелико, и он не играет существенной роли в их запасах.

Основная часть всех редкоземельных минералов находится в крупной залежи щелочных горных пород, относимых к метасоматитам, по химическому и минеральному составу соответствующим щелочным гранитам. Текстуры рудоносных горных пород разнозернистые полосчатые, массивные, такситовые, пятнистые, гнейсовидные, структуры – порфировидные, директивные, коррозионные, пористые. Они сложены литиевым биотитом (лепидолитом и аннитом), щелочными амфиболами (арфведсонитом, рибекитом), эгирином, кварцем, микроклином, микроклин-пертитом, альбитом.

Суммарное количество рудных минералов достигает первых процентов (рис. 9.24). Наиболее распространен циркон, далее следуют пирохлор, гагаринит, редкоземельный флюорит, затем – колумбит, фергюсонит и др. Максимальное содержание редкоземельных минералов установлено в Восточном теле поля развития щелочных пород, которое и представляет собою собственно Катугинское месторождение. Суммарное содержание минералов – носителей редких земель в этом теле составляет 0,5–10%. Средние содержания суммы $TR_2O_3$ составляют (%) в биотитовых (аннитовых) и биотит-рибекитовых породах 0,110, в рибекит-арфведсонитовых – 0,076 и эгирин-арфведсонитовых – 0,052. Эти горные породы расположены зонально относительно центральной (осевой) эгирин-арфведсонитовой зоны. В этом же направлении (см. рис. 9.24) возрастает содержание гагаринита и пирохлора, а также редких земель цериевой группы, а иттриевой – уменьшается или изменяется незначительно.

В рудах и горных породах рудоносной залежи выявлено более 100 минеральных видов. Из низ наиболее важные приведены в табл. 9.23. Установлено [Удоканское и Катугинское..., 2004], что селективно-цериевыми минералами являются пирохлоры, с которыми связано 30–40% редких земель, в основном, цериевой группы, а селективно-иттриевыми – гагариниты (содержание суммы редких земель и иттрия – 39,95–44,53%), частью – редкоземельные флюориты, малаконы и малаконизированные цирконы (табл. 9.24).

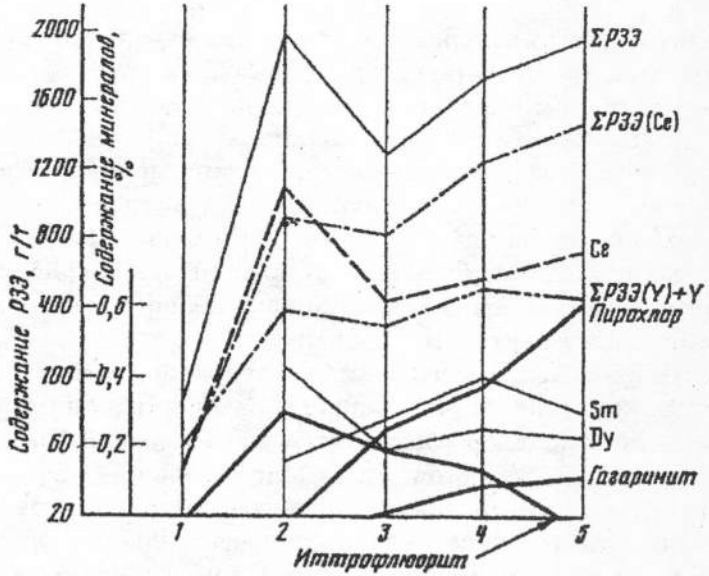



Рис. 9.24.Средние содержания РЗЭ, иттрия и главных редкометалльных минералов в рудоносных горных породах Катугинского месторождения. По: [Удоканское медное ..., 2004]

*1 – гнейсы и кристаллические сланцы, вмещающие рудоносные горные породы; 2 – рудоносные горные породы экзоконтакта; 3 – аннитовые (биотитовые) и аннит-рибекитовые; 4 – рибекит-арфведсонитовые; 5 – эгирин-арфведсонитовые.*

Таблица 9.35

**Содержание индивидуальных редких земель в минералах Катугинского месторождения**

| Минерал | $TR_2O_3$ | Элемент, содержание, % | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | La | Ce | Pr | Nd |
| Циркон | | 0,02–0,34 | 0,098–0,187 | 0,015–0,065 | 0,041–0,084 |
| Пирохлор | 13,24–15,31 | 7,93–15,31 | 38,28–50,80 | 6,02–11,89 | 15,57–18,43 |
| Редкоземельный флюорит | | 0,6–6,9 | 1,62–11,0 | 0,25–1,79 | 0,31–6,0 |

| Минерал | Элемент, содержание, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Sm | Eu | Gd | Dy | Ho |
| Циркон | 0,003–0,065 | <0,01 | 0,0275–0,082 | 0,011–0,1 | 0,0005–0,03 |
| Пирохлор | 3,33–9,34 | до 0,06 | 2,27–3,60 | 1,87–2,42 | до 0,28 |
| Редкоземельный флюорит | 0,12–1,8 | 0,01–0,06 | 0,35–1,35 | 0,25–4,0 | 0,07–0,25 |

| Минерал | Элемент, содержание, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Er | Tm | Yb | Lu | Tb |
| Циркон | 0,014–0,016 | 0,0097–0,016 | 0,048–0,086 | 0,011–0,018 | |
| Пирохлор | 0,20–0,56 | 0,03–0,25 | 0,20–0,56 | до 0,05 | до 0,42 |
| Редкоземельный флюорит | 0,05–1,49 | 0,02–0,14 | 0,05–1,49 | 0,01–0,28 | |

Примечание: 1. Содержание редких земель в пирохлорах дано в $TR_2O_3$.

2. Сумма элементов цериевой группы в пирохлоре – 86,67–17,33.

Составлена по данным В.В. Архангельской [1974].

Как видно из приводимых табличных данных, содержания редких земель в основных их минералах-концентраторах Катугинского месторождения широко варьирует. Имеющиеся литературные данные сведены в табл. 9.35.

Как уже указывалось, руды месторождения комплексные. Главные компоненты в них – Ta, Nb, Zr, а редкие земли, наряду с иттрием, ураном, торием и криолитом, являются попутными компонентами. Границы рудных тел определены по величине бортового содержания тантала, определяющего основную ценность месторождения. При бортовом его содержании 0,01% $Ta_2O_5$ разведчиками оконтурены три рудных тела: Главное I, II и III. В первом заключено 94% всех запасов тантала и ниобия и основная часть запасов циркония, иттрия, редких земель и криолита. В богатых рудах содержание суммы редких земель в среднем составляет 0,28%. Состав редких земель преимущественно цериевый. Основной концентратор цериевых редких земель – пирохлор. Это хорошо видно из анализа табл. 9.35. Руды относятся к одному технологическому типу. Относительно низкие твердость, хрупкость и малые размеры зерен пирохлора способствуют накоплению их в шламах технологического процесса.

Технология разработки месторождения и переработка руд разработаны. В связи с тем, что редкие земли находятся не только в пирохлоре, но и в цирконе, гагарините и редкоземельном флюорите, все минералы участвуют в обогатительном процессе, приводящем к получению черновых гравитационных и флотационных концентратов методами концентрации на столах, магнитной и электромагнитной сепарации, флотации. Первоначально руда измельчается до конечной фракции – 0,25 мм. Затем она обогащается на винтовом и далее – роликовом магнитных сепараторах. Магнитная и немагнитная фракции перечищаются на концентрационных столах и в полученный черновой концентрат добавляется материал, образующийся при извлечении рудных минералов из хвостов обогащения электромагнитной сепарации. Хвосты гравитации освобождаются от шлама и направляются на флотацию. В результате

получаются черновые гравитационный и флотационные тантал-ниобиево-редкоземельно-циркониевые концентраты и криолитовый концентрат. Хвосты обогащения представляют собою кварцево-полевошпатовый концентрат и эгирин-амфиболовый продукт. После доводки гравитационных, флотационных и черновых кварц-полевошпатового концентратов получают тантал-ниобиевый, редкоземельный, цирконовый, криолитовый и кварцево-полевошпатовый концентраты. В результате гидрометаллургического передела по серно-кислотной технологии наряду с фтортанталатом калия, оксидом ниобия, урановым химическим концентратом, искусственным криолитом и ториевым продуктом получают раствор нитратов редких земель.

Сумма запасов оксидов редких земель Катугинского месторождения, без учета окиси иттрия, составляет 2227,4 тыс. тонн, среднее содержание $TR_2O_3$ в руде составляет 0,27%. Извлечение $TR_2O_3$ достигает 54,6%. При производительности карьера 3 млн. тонн руды в год возможно получение 7,3 тыс. тонн суммы оксидов редких земель.

Одним из потенциальных источников редких земель в Республике Бурятия является **Халютинское** проявление стронция, бария и редких земель [Рипп и др., 1998]. Оно находится в Юго-Западном Забайкалье в хр. Хамар-Дабан, в бассейне р. Халюта и входит в состав Халютинского рудного поля (рис. 9.25). Один из участков развития карбонатных пород, включающих оруденение, был открыт при мелкомасштабных геолого-съемочных работах в середине 1950-х гг. и описан как железорудное проявление в скарнах, содержащих повышенные концентрации бария и стронция. В 1976 г. была выявлена группа комплексных геохимических аномалий бария, стронция и редких земель. При их проверке П.И. Радченко оконтурил 8 рудных участков. В 1981 г. он высказал предположение о том, что вмещающие оруденение горные породы следует отнести в карбонатитам. Он полагал, что кальцит-доломит-апатит-магнетит-сидеритовые породы представляют собою эксплозивную брекчию, слагающую овальную трубку взрыва, более 70% обломков которой

имеют глубинное происхождение. Е.С. Гольдберг, проводивший в 1986–1988 гг. детальные поисково-оценочные работы, пришел к выводу о том, что «карбонатиты» есть не что иное, как обломки осадочных карбонатных горных пород, переработанных гидротермами. Однако буровые работы показали, что наиболее крупные тела карбонатных пород в виде плаща залегают на выветрелой поверхности гранитоидов. Кроме того, были обнаружены дайкообразные тела карбонатных пород. Изучавший эти тела карбонатных горных пород К.Б. Булнаев сначала определил их как минерализованные скарны [Булнаев, 1985], затем – как приразломные карбонатиты [Булнаев, 1996], а затем – как метасоматиты по осадочным известнякам [Булнаев, 1997]. Г.В. Андреев [1997] отнес их к карбонатитам.

На площади 3 км$^2$ известно несколько участков карбонатитов со стронцианитовой, редкоземельной и апатитовой минерализацией. Наиболее крупный из них – Халютинский, значительно меньше – Верхне-Халютинский, Верхне-Шалутайский, Нижне-Шалутайский и Аршан-Халютинский. Все они расположены среди условно докембрийских гранитоидов и осадочно-метаморфических пород в борту Иволгинской впадины, выполненными терригенными позднемезозойскими отложениями. Карбонатные породы залегают среди позднепротерозойских гранитоидов, в провисах их кровли. Полоса их распространения имеет ширину 2,5–3,0 километра. В поле развития гранитоидов установлены также дайки щелочных габброидов и сиенитов (см. рис. 9.25) северо-западного простирания, мощностью 3–5 м и протяженностью до 600 м. С ними сопряжены дайкообразные тела карбонатитов, секущие гранитоиды. Возраст щелочных габброидов – 116 млн. лет (поздний мел) [Рипп и др., 1998]. Карбонатные породы сложены кальцитом. Они держат высокие концентрации стронция. Схема геологического строения Халютинского проявления дана на рис. 9.26, а содержания основных полезных компонентов – на рис. 9.27. По данным В.С. Платова дайкообразное тело карбонатитов, выходящее на дневную поверхность на левом борту долины ручья Халюта, имеет размеры 650х460 м при средней мощности – 37,5 м. Кровля тела эродирована. Карбонатиты

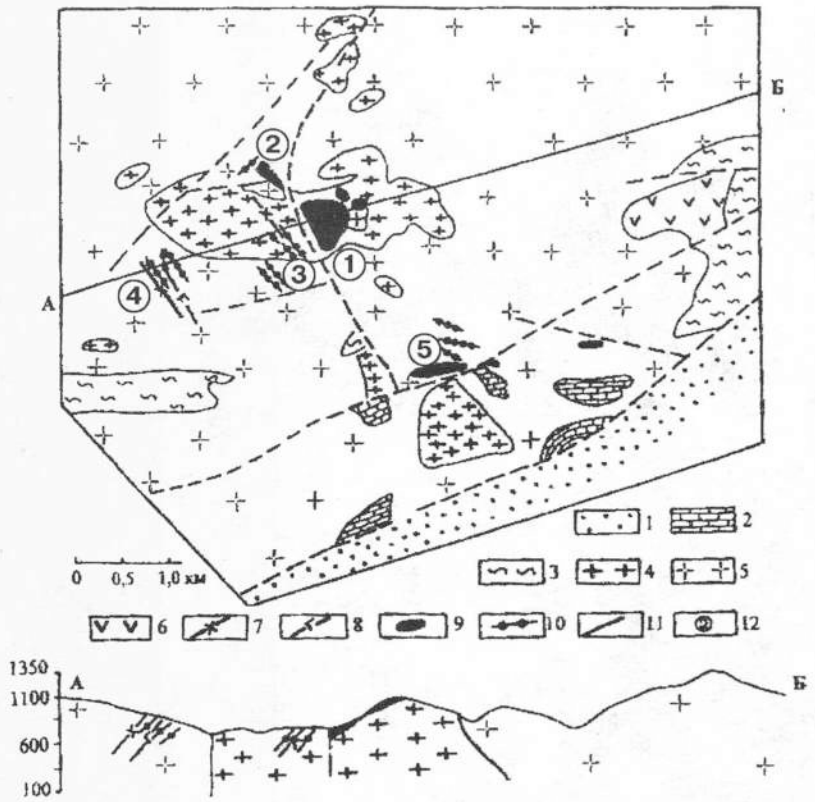



Рис. 9.25. Схема геологического строения Халютинского рудного поля по Е.С. Гольдбергу с добавлениями автора. По: [Рипп и др., 1998].

*1 – песчаники, алевролиты, аргиллиты (J); 2–3 – гаргинская толща (PR): кристаллические известняки (2), графитизированные и карбонатизированные кристаллические сланцы, гнейсы и мигматиты (3); 4–6 – интрузивные породы протерозоя: мелкозернистые граниты, кварцевые сиениты гнейсовидные (4), средне-крупнозернистые порфировидные биотитовые граниты, кварцевые сиениты, сиениты (5), диориты мелко-среднезернистые (6); 7–8 – позднемезозойские дайки щелочных сиенитов (7) и габброидов (8); 9–10 – редкоземельно-стронциевые карбонатиты: залежи (9), жилы (10); 11 – разрывные нарушения; 12 – проявления карбонатитов: Халютинское (1), Верхне-Халютинское (2), Нижне-Шалутайское (3), Верхне-Шалутайское (4), Аршан-Халютинское (5).*

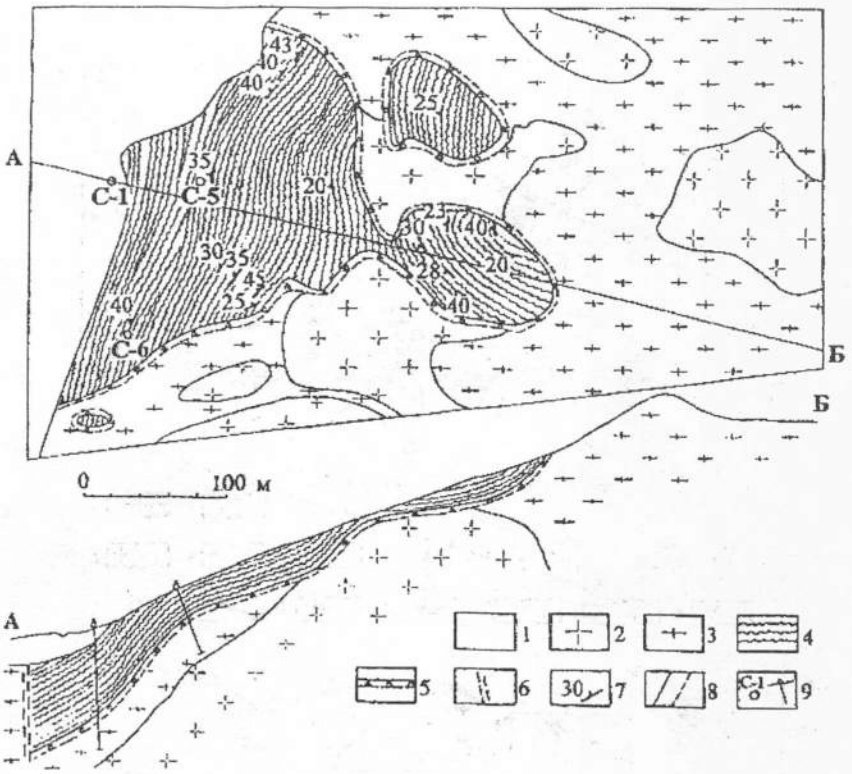



Рис. 9.26. Схема геологического строения Халютинского участка (с использованием материалов Е.С. Гольдберга) По: [Рипп и др., 1998].

*1 – аллювиальные отложения; 2 – средне-крупнозернистые порфировидные биотитовые граниты, кварцевые сиениты, сиениты; 3 – мелкозернистые граниты, кварцевые сиениты гнейсовидные; 4 – карбонатитовые залежи; 5 – выветрелые дезинтегрированные породы; 6 – зоны разломов; 7 – ориентировка полосчатости; 8 – геологические границы отчетливые и размытые (пунктир); 9 – буровые скважины на плане и разрезе.*

| Компонент | Содержание, %: Y, Nb и Zr (г/т) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Y | 47 | 73 | 73 | 79 | 64 | 35 | 56 | 47 | 50 | 56 | 48 | 54 |
| Nb | – | – | 6 | 17 | 6 | 14 | 9 | 13 | 5 | 8 | 9 | 9 |
| Zr | 430 | 310 | 300 | 320 | 420 | 640 | 230 | 630 | 370 | 210 | 500 | 510 |
| $P_2O_5$ | 1,08 | 0,86 | 0,79 | 0,62 | 1,37 | 1,49 | 1,16 | 1,27 | 1,41 | 0,70 | 1,05 | 1,11 |
| ΣTR | 0,18 | 0,23 | 0,31 | 0,33 | 0,24 | 0,2 | 0,22 | 0,2 | 0,23 | 0,24 | 0,18 | 0,22 |
| Ba | 6,9 | 7,1 | 8,1 | 10 | 5,8 | 6,4 | 8,1 | 5,4 | 6,7 | 5,6 | 5 | 5,6 |
| Sr | 7,1 | 5 | 6,4 | 8,4 | 8,5 | 9,9 | 5,1 | 11,2 | 7,1 | 0,05 | 0,04 | 0,54 |
| FeO общ. | 4,0 | 3,64 | 1,96 | 2,1 | 3,54 | 3,73 | 4,1 | 4,1 | 3,73 | 1,15 | 2,47 | 2,4 |
| $SiO_2$ | 13,9 | 16,5 | 0,4 | 0,3 | 0,05 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 1,7 | 0,8 | 5,3 | 2,8 |
| $Cal_1$ | 40 | 20 | 35 | 40 | 40–50 | 60 | 60 | 50 | 50 | 80 | 80 | 85 |
| $Cal_2$ | 30 | 50 | 35 | 30 | 40 | 15 | 20 | 30 | 20 | 10 | 10 | 5 |

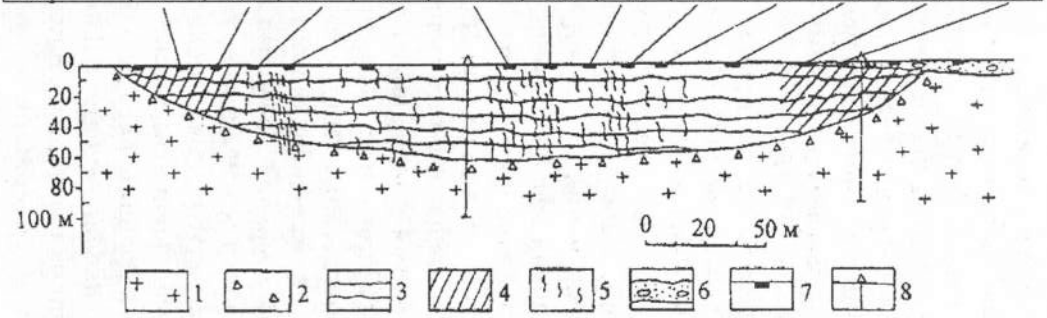



Рис. 9.27. Разрез главной залежи Халютинского месторождения с результатами опробования канав. По: [Рипп и др., 1998].

*1 – мелкозернистые граниты и кварцевые сиениты гнейсовидные; 2 – выветрелые дезинтегрированные породы; 3 – карбонатиты; 4 – зоны окварцевания; 5 – существенно стронцианитовые прожилки; 6 – делювиальные свалы; 7 – канавы; 8 – буровые колонковые скважины.*

*$Cal_1$ и $Cal_2$ – содержание кальцита разных генераций.*

являются барий-стронциевыми рудами. Среднее содержание SrO – 10,17%, BaO – 8,4% и РЗО – 0,21%.

Падение рудного тела западное, под углом 30–40°. В нижней части погружается под аллювий р. Халюта. Руды имеют полосчатую, линзовидно-полосчатую и брекчиевую текстуры и состоят из кальцита, барито-целестина, стронцианита, магнетита, апатита и флогопита. Лабораторными технологическими исследования установлена принципиальная возможность получения гидроокиси стронция или углекислого стронция непосредственно из руды без применения кислот, дорогостоящих и дефицитных реагентов. Попутно получена известь, которая может использоваться в строительстве. Прогнозные ресурсы окиси стронция по категории $P_1$ – 2,0 млн. т, по категории $P_2$ – 1,7 млн. т. В качестве попутного компонента оценены ресурсы окиси бария ($P_1+P_2$ = 4,1 млн. т) и суммы РЗО ($P_1+P_2$ = 117,8 тыс. т). Проявление весьма перспективно и рекомендовано для первоочередного изучения.

**Верхне-Халютинское** проявление стронция, бария и редкоземельных элементов представляет собой в плане линзообразное тело карбонатитов размером 180х50 метров. В отличие от Халютинского проявления здесь преобладают массивные руды с более высокими содержаниями полезных компонентов. По данным В.С. Платова, при подвеске 50 м оценены ресурсы категории $P_2$ стронция – 0,13 млн. т, бария – 0,07 млн. т, РЗО – 2,58 тыс. т при средних содержаниях 12,15%, 7,27% и 0,25%, соответственно. Несмотря на небольшие размеры в плане, это тело рекомендовано для изучения на глубину.

Источником редких земель может быть также и **Гурвунурское** редкоземельно-апатит-железорудное месторождение, входящее в состав Озернинского рудного узла.

Редкоземельное оруденение в Забайкалье, скорее всего, не исчерпывается охарактеризованными месторождениями. Анализ данных по содержанию РЗО в щелочных горных породах и гранитоидах Байкальской области, полученных В.В. Архангельской [1974], табл. 9.36, показывает, что высокие их концентрации, более чем на два порядка превышающие

Таблица 9.36

**Содержания редких земель в верхнепалеозойских и мезозойских горных породах Байкальской горной области, мас.%**

| Тип горной породы | Интрузивный комплекс | Массив | $TR_2O_3$ |
|---|---|---|---|
| Калиевые нефелиновые сиениты | Витимкано-сыннырский | Сыннырский | 0,034 |
| Натриевые нефелиновые сиениты | То же | Гоуджекитский | 0,014 |
| Щелочные сиениты | То же | Сыннырский и Бурпалинский | 0,044 |
| Гранитоиды | То же | Восточный и Западный эзконтакта Сыннырского | 0.06 |
| | Ингамакитско-Сакунский | Ингамакитский | 0,03 |
| | Витимкано-сыннырский | Тельмамамские граниты | 0,04 |
| Кларк по А.П. Виноградову для гранитов | | | 0,0012 |

кларки, характерны для витимкано-сыннырского и ингамакитско-сакунского интрузивных комплексов. Наибольшими перспективами характеризуются Сыннырский и Бурпалинский массивы, средние содержания $TR_2O_3$ в которых, соответственно, составляют (%) 0,034 и 0,044.

Возможность находок редкометалльных карбонатитов не исключена в бассейне р. Хилок, в области распространения щелочных магматических горных пород мезозойского возраста, аналогов цаган-хунтейской свиты и куналейского интрузивного комплекса. Редкоземельная минерализация, выявленная ав-

тором в 1959 г. в связи с зонами развития гидроксидов марганца в граносиенитах в правобережье р. Ингода в бассейне её притока Красная Речка, является доказательством этого предположения. Более того, в Каменско-Черновском пегматитовом поле, связанном с яблоновым комплексом, известна редкоземельная поликраз-эвксенитовая минерализация, а также россыпи, содержащие редкоземельные ниоботанталлаты.

Суммарные запасы редких земель в Забайкальском крае, по оценке «Читанедра», составляют 783 тыс. т, а стоимость их оценена в 939391 млн. рублей.

## Контрольные вопросы

1. Каковы основные химические, физические и экологические свойства лантаноидов?
2. Найдите промышленные типы месторождений, способы добычи и переработки руд лантаноидов.
3. К каким промышленным типам относятся главные месторождения руд лантаноидов в Забайкалье?
4. Из каких руд и минералов извлекают лантаноиды?
5. Назовите месторождения и типы руд лантаноидов в Забайкалье.
6. В каких отраслях хозяйственной и других видов деятельности используются лантаноиды?

## Литература

### Основная

Нетрадиционные типы редкометалльного сырья / Н.А. Солодов, Т.Ю. Усова, Е.Д. Осокин и др. – М.: Недра, 1989.

Онтоев Д.О. Геология комплексных редкоземельных месторождений. – М.: Недра, 1984.

Солодов Н.А. Минерагения редкометалльных формаций. – М.: Недра, 1985.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч.1 / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

**Дополнительная**

Андреев Г.В. О принадлежности карбонатитов Западного Забайкалья к формации, связанной с калиевыми щелочными породами / Магматические и метаморфические комплексы Восточной Сибири: Проблемы петрогенезиса, корреляции, геологической картографии. – Иркутск, 1997.

Бойцов В.Е., Пилепенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Учебное пособие. – М.: НИА – Природа, 1999.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн.1, 2.

## Заключение

Суммарная оценка стоимости сырьевых ресурсов редких элементов, даваемая «Читанедра» для Забайкальского края по состоянию на 01.01.2006, составляет 3 098 464 000 000 рублей. Это более 20% всего минерально-сырьевого потенциала Забайкалья и примерно более чем в 2 раза превышает минерально-сырьевой потенциал запасов золота.

Регион обладает огромными перспективами наращивания ресурсов редких металлов.

Традиционные подходы к использованию минеральных ресурсов Забайкалья, ориентированные на вывоз сырья, должны быть пересмотрены коренным образом. Необходимо воссоздание и совершенствование на современных технологических принципах действовавших в советское время горно-металлургических предприятий с целью получения конечных видов продукции.

Для этого необходимо возобновление деятельности Петровск-Забайкальского металлургического завода с ориентированием его как на переработку вторичного сырья (металлолома), так и на электроплавку Чинейских Fe-Ti-V концентратов, производство высоколегированных сталей и ферросплавов и сплавов молибдена, кремния, ниобия, титана, вольфрама и других цветных и редких элементов.

Для переработки редкометалльных концентратов Завитинского, Этыкинского, Катугинского, Ермаковского и других месторождений с получением товарной продукции (тантал, ниобий, литий, олово, бериллий, цирконий, редкие земли, гафний, торий и другие редкие и цветные металлы) необходимо задействовать Первомайский горно-металлургический комбинат.

Анализ мировой литературы, а также многолетний опыт КНР и Японии, ориентированный на ввоз металлолома и отходов бытовой техники, лома автомобилей, электронных приборов и техники, содержащих огромное количество редких и благородных металлов, свидетельствует о том, что мировое потребление редких, благородных и редкоземельных металлов в значительной мере ориентировано на использование вторичного минерального сырья. Так, до 50% всех редких элементов в США добывается из зол от сжигания углей и еще около 20% – из металлолома. Большинство редких металлов и редкоземельных элементов за рубежом отнесено к стратегическому сырью.

Несмотря на достаточно большие запасы минерального сырья, металлического в том числе, в регионе следует ставить и решать проблемы максимально возможного использования вторичного сырья. При этом, вопреки пресловутой свободе предпринимательства, должна быть создана законодательная база государственного контроля за источниками металлолома, поступающего в частные структуры и вывозимого за границу. Важным экономическим рычагом воздействия на продавцов металлолома должны быть непомерные таможенные пошлины. Обоснованием этим действиям государства должно быть объявление металлолома стратегическим сырьем, каковым оно на самом деле является. Только эти и подобные меры могут способствовать прекращению хищения изделий, содержащих черные, цветные, редкие и благородные металлы.

## Список литературы к Книге II

Андреев Г.В. О принадлежности карбонатитов Западного Забайкалья к формации, связанной с калиевыми щелочными породами / Магматические и метаморфические комплексы Восточной Сибири: Проблемы петрогенезиса, корреляции, геологической картографии. – Иркутск, 1997.

Архангельская В.В. Редкометалльные щелочные комплексы южного края Сибирской платформы. – М.: Недра, 1974.

Бериллий. Токсикология, гигиена, профилактика, диагностика и лечение бериллиевых поражений / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Бойцов В.Е., Пилепенко Г.Н., Солодов Н.А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов. Учебное пособие. – М.: НИА – Природа, 1999.

Борисенко Л.Ф. Ванадий (минералогия, геохимия и типы эндогенных месторождений). – М.: Недра, 1973.

Борисенко Л.Ф. Основные направления повышения комплексного использования железных руд / Рудная геохимия и геология магматогенных месторождений. – М.: Наука, 1980.

Борисенко Л.Ф. Руды ванадия. – М.: Наука, 1983.

Борисенко Л.Ф., Комиссарова Л.Н. Минеральные источники скандия и технология его извлечения. – М.: ВИЭМС, 1989.

Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. Методические рекомендации по перспективной оценке различных типов скандийсодержащего сырья. – М.: ИМГРЭ, 1991.

Борисенко Л.Ф., Поликашина Н.С. Минеральное сырье. Скандий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Борисенко Л.Ф., Слотвинский-Сидак Н.П. Минерально-сырьевые ресурсы ванадия и способы получения его соединений. – М.: ВИЭМС, 1991.

Борисенко Л.Ф., Слотвинский-Сидак Н.П., Поликашина Н.С. Минеральное сырье. Ванадий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Булнаев К.Б. О возможности выявления крупных запасов стронцианитовых руд в Бурятии // Разведка и охрана недр. – 1997. – № 4.

Булнаев К.Б. Стронцианитовые карбонатиты Халютинского месторождения (Западное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1996. – № 5.

Булнаев К.Б. Условия образования и локализации фторредкоземельного оруденения // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 2.

Бурков В.В. Литофильные редкие элементы в корах выветривания. – М.: ИМГРЭ, 1996.

Быховский Л.З., Линде Т.П., Петрова Н.В. Перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы лития // Минеральные ресурсы России. – 1997. – № 6.

Ванадий в черной металлургии / Н.П. Лякишев, Н.П. Слотвинский-Сидак, Ю.Л. Плинер и др. – М.: Металлургия, 1983.

Вершковская О.В., Зуева Т.И., Прокопчук В.П. Минеральное сырье. Галлий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Виноградова В.Н. Промышленная оценка рассеянных элементов в комплексных рудах. – М.: Недра, 1972.

Генетические типы гидротермальных месторождений бериллия / А.И. Гинзбург, Н.П. Заболотная, И.И. Куприянова и др. – М.: Недра, 1975.

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука, 1999.

Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным элементам / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Л.Ф. Борисенко и др. – М.: Недра, 1990.

Горная энциклопедия. – М., 1986. – Т. 2.

Гурвич С.И., Болотов А.М. Титано-циркониевые россыпи Русской платформы и вопросы поисков. – М.: Недра, 1969.

Дамдинова Л.Б. Условия и факторы, влиявшие на эффективность переноса и отложения Be из рудоносных растворов Ермаковского Fe-Be месторождения (по результатам изучения флюидных включений). – Автореф. ... дис. канд. геол.-минер. наук. – Улан-Удэ, 2005.

Зырянов М.Н., Надольский А.П. Основы технологии получения рассеянных элементов. – М.: Металлургия, 1968.

Иванов В.В. Минеральное сырье. Теллур / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Иванов В.В., Видякин Н.С. Минеральное сырье. Индий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Иванов В.В., Видякин Н.С. Минеральное сырье. Таллий / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Иванов В.В., Видякин Н.С., Юшко-Захарова О.Е. Минеральное сырье. Селен / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Иванов В.В., Поплавко Е.М. Рений в месторождениях цветных металлов и горных ископаемых / Комплексные месторождения халькофильных редких элементов. – М.: Наука, 1982.

Иванов В.В., Поплавко Е.М., Малевский А.Ю. Минеральное сырье. Рений / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Иванова В.В., Поплавко Е.М., Горохова В.И. Геохимия рения. – М.: Наука, 1969.

Инвестиционные проекты Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. – Чита, 2002.

Каленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Клюев О.С. Первичные (эндогенные) геохимические ореолы месторождений бериллиевого оруденения / Геохимические критерии прогнозирования и поисков рудных месторождений. – М.: ИМГРЭ, 1973.

Коган Б.И., Капустинская К.А., Топунова Г.А. Бериллий. – М.: Наука, 1975.

Кожевникова Н.М., Цыбикова Н.Л., Ермакова Е.П., Константинова К.К. Природные цеолиты, модифицированные редкоземельными элементами – эффективные абиотические катализаторы // Проблемы геологии, минеральных ресурсов и геоэкологии Западного Забайкалья / Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Бурятского ордена Трудового Красного Знамени геологического управления. 19–21 декабря 2007 г., г. Улан-Удэ. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007.

Коленкова М.А., Крейн О.Е. Металлургия рассеянных и легких редких металлов. – М.: Металлургия, 1977.

Комплексные месторождения халькофильных редких элементов / В.В. Иванов, О.Е. Юшко-Захарова, Э.Ф. Минцер и др. – М.: Недра, 1982.

Коршунов Б.Г., Резник А.М., Семенов С.А. Скандий. – М.: Металлургия, 1987.

Кудрявцев А.А. Химия и технология селена и теллура. – М.: Высшая школа, 1961.

Кузнецов К.Ф., Мейтув Г.М. Геохимия редких элементов в свинцово-цинковых месторождениях Восточного Забайкалья. – М.: Наука, 1967.

Кушпаренко Ю.С., Петрова Н.В. Технология переработки редкометалльных руд. – М.: «Геоинформмарк», 1994.

Левиуш И.Т., Эйгелес М.А. Исследования по флотации берилла / Флотация силикатов и окислов. – М.: Госгеолтехиздат, 1961.

Межуева Г.С., Егорова М.Н., Роговой В.М. Об учете и оценке попутных редких элементов в горно-металлургических и геологоразведочных работах. – М.: ИМГРЭ, 1990.

Месторождения Забайкалья / Под ред. акад. А.П. Лаверова. – Чита; М., 1995. – Т. 1, кн. 1, 2.

Методические рекомендации по проведению поисковых работ на бериллий / И.И. Куприянова, А.А. Шутин, М.И. Пахомов и др. – М.: ВИМС, 1992.

Методические рекомендации по прогнозированию, поискам и перспективной разведке экзогенных месторождений иттрия и иттриевых лантаноидов. – М.: ИМГРЭ, 1991.

Минералогия гидротермальных месторождений бериллия / Под ред. А.И. Гинзбурга. – М.: Недра, 1976.

Минеральное сырье. Бериллий / И.И. Куприянова, Е.П. Шпаков, М.И. Новикова и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Минеральное сырье. Литий / А.А. Кременецкий, Т.П. Линде, Н.А. Юшко и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Минеральное сырье. Ниобий и тантал / В.С. Кудрин, Ю.С. Кушпаренко, Н.В. Петрова и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Минеральное сырье. Рубидий и цезий / А.А. Кремнецкий, Т.П. Линде, А.Юшко и др. / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Минерально-сырьевая база редких элементов СНГ и зарубежных стран / Под ред. В.М. Рогового. – М.: ИМГРЭ, 1992.

Минеральные ресурсы Читинской области. Инвестиционные предложения / Ю.Ф. Харитонов, В.С. Чечеткин, Г.А. Шевчук и др.– Чита: ЗабНИИ, 2003.

Михайличенко А.Н., Михнин Б.Б., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. – Металлургия, 1987.

Нетрадиционные типы редкометаллического минерального сырья / Н.А. Солодов, Т.Ю. Усова и др. – М.: Недра, 1991.

Ниобий и тантал / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов, А.В. Елютин, А.М. Захаров. – М.: Металлургия, 1990.

Новое в развитии минерально-сырьевой базы редких металлов. – М.: ИМГРЭ, 1991.

Онтоев Д.О. Геология комплексных редкоземельных месторождений. – М.: Недра, 1984.

Определение бериллия в горных породах и бериллиевых рудах фотонейтронным методом. – М., 1968.

Осипова Г.А. Колломорфный касситерит в оловорудных жилах месторождения Дубровское (Кавалеровский район) / Минералогия и генезис месторождений Приморья и Приамурья. – Владивосток, 1976.

Осипова Г.А., Азарова Л.И., Бутенко Л.А. Элементы-примеси в касситеритах различной модификации и окраски / Минералогия и генезис месторождений Приморья и Приамурья. – Владивосток, 1976.

Осокин Е.Д., Бойко Т.Ф., Линде Т.П. Минеральное сырье. Цирконий и гафний / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997.

Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. – М.: Недра, 1987.

Производство и использование ванадиевых шлаков / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябик, А.А. Филиппенко и др. – М.: Металлургия, 1985.

Разведка и оценка комплексных месторождений цветных металлов / А.М. Сеченова, В.В. Иванов, В.Н. Иванов и др. – М.: Недра, 1990.

Редкие металлы-спутники: состояние и тенденции развития потребления и производства и сырьевая база за рубежом / В.В. Иванов, Л.Ф. Борисенко и др. – М.: ВИЭМС, 1988.

Резниченко В.А., Шабалин Л.И. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология. – М.: Наука, 1986.

Рипп Г.С., Ходанович П.Ю., Смирнова О.К., Кобылкина О.В. Халютинское месторождение барий-стронциевых карбонатитов (Западное Забайкалье). – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ, 1998.

Салихов В.С., Федотова В.М., Августинчик И.А. и др. Типоморфные особенности халькопирита Кодаро-Удоканской медно-рудной провинции // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1989. – № 6.

Семенов Е.И. Минералогия редких земель. – М.: Изд-во АН СССР, 1963.

Сечевица А.М. Геолого-промышленная оценка попутных полезных ископаемых в комплексных рудах. – М.: Недра, 1987.

Скурский М.Д. Недра Забайкалья. – Чита, 1996.

Солодов Н.А. Минерагения редкометалльных формаций. – М.: Недра, 1985.

Солодов Н.А., Балашов Л.С., Кремнецкий А.А. Геохимия лития, рубидия, цезия. – М.: Недра, 1980.

Солодов Н.А., Семенов Е.И., Усова Т.Ю. Минеральное сырье. Иттрий и лантаноиды / Справочник. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998.

Солодова Н.А., Бурков В.В., Овчинников Л.Н. Геологический справочник по легким литофильным редким металлам. – М.: Недра, 1986.

Справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Кокин, А.Е. Мирошников, В.Г. Прохоров. – М.: Недра, 1990.

Технологическое опробование месторождений цветных металлов в процессе разведки. – М.: Мингео и Минцветмет СССР, 1982.

Удоканское медное, Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России / В.В. Архангельская, Ю.В. Быков, Р.Н. Володин и др. – Чита, 2004.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. II / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. III / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Химия и технология редких и рассеянных элементов. Ч. I / Под ред. К.А. Большакова. – М.: Высшая школа, 1976.

Химия, технология и аналитический контроль рения. – М., 1990.

Холодов В.Н. Осадочный рудогенез и металлургия ванадия. – М.: Наука, 1973.

Цыбжитов В.Ж. Новые данные о флюорит-бертрандит-фенакитовой формации / Эволюция эндогенных процессов и оруденения в Забайкалье. – Улан-Удэ: БФ СО АН СССР, 1981.

Чжун Цзя-жун. О селенсодержащей сурьмяно-ртутной формации // Геохимия. – 1962. – № 8.

Чумаченко Н.М., Полетаев В.В., Свирский М.А. и Кривокобыльский А.С. Важнейшие геологоструктурные особенности рудных полей свинцово-цинковых месторождений Приаргунья / Рудные месторождения Забайкалья и методы их поисков // Записки Заб. филиала Геогр. общ-ва СССР. – Вып. XCIII. – 1973.

## Используемые сокращения

Be, II, 4 – название химического элемента, группа в Периодической системе и атомный номер;

ПДК – предельно допустимая концентрация химических веществ;

$ПДК_{р.з}$ – в воздухе рабочей зоны, мг/м$^3$;

$ПДК_{м.р}$ – максимальная разовая в воздухе населенных мест, мг/м$^3$;

$ПДК_{с.с}$ – среднесуточная в воздухе населенных мест, мг/м$^3$;

$ПДК_{в}$ – в водоемах санитарно-бытового и хозяйственного назначения, мг/дм$^3$;

$ПДК_{в.р}$ – в водоемах, используемых для рыбохозяйственных целей, мг/дм$^3$.

# Содержание

**Предисловие** ..... 3

**Глава 9. Минеральное сырье редких элементов** ..... 4

**9.1. Бериллий** ..... 5
9.1.1. Свойства ..... 5
9.1.2. Распространенность и запасы ..... 5
9.1.3. Области использования ..... 6
9.1.4. Минеральный состав и типы руд ..... 6
9.1.5. Добыча и переработка руд ..... 7
9.1.6. Месторождения бериллия в Забайкалье ..... 8
Контрольные вопросы ..... 22
Литература ..... 22
**9.2. Литий** ..... 24
9.2.1. Свойства ..... 24
9.2.2. Распространенность и запасы ..... 24
9.2.3. Области использования ..... 25
9.2.4. Минеральный состав и типы руд ..... 26
9.2.5. Добыча и переработка руд ..... 26
9.2.6. Месторождения лития в Забайкалье ..... 27
Контрольные вопросы ..... 34
Литература ..... 34
**9.3. Рубидий и цезий** ..... 36
9.3.1. Рубидий ..... 36
9.3.1.1. Свойства ..... 36
9.3.1.2. Распространенность и запасы ..... 36
9.3.1.3. Области использования ..... 37
9.3.1.4. Минералы рубидия ..... 37
9.3.1.5. Добыча и переработка руд ..... 38
9.3.2. Цезий ..... 39
9.3.2.1. Свойства ..... 39
9.3.2.2. Распространенность и запасы ..... 39
9.3.2.3. Области использования ..... 39

9.3.2.4. Минералы и типы руд ..... 40
9.3.2.5. Добыча и переработка руд ..... 41
9.3.2.6. Месторождения рубидия и цезия в Забайкалье ..... 42
Контрольные вопросы ..... 43
Литература ..... 44
**9.4. Ниобий и тантал** ..... 45
9.4.1. Ниобий ..... 45
9.4.1.1. Свойства ..... 45
9.4.1.2. Распространенность и запасы ..... 46
9.4.1.3. Области использования ..... 46
9.4.1.4. Минеральный состав и типы руд ..... 48
9.4.1.5. Способы добычи и переработки руд ..... 49
9.4.2. Тантал ..... 50
9.4.2.1. Свойства ..... 50
9.4.4.2. Распространенность и запасы ..... 50
9.4.2.3. Области использования ..... 50
9.4.2.4. Минеральный состав и типы руд ..... 51
9.4.2.5. Способы добычи и переработки ..... 52
9.4.3. Месторождения ниобия и тантала в Забайкалье ..... 53
Контрольные вопросы ..... 70
Литература ..... 70
**9.5. Ванадий** ..... 72
9.5.1. Свойства ..... 72
9.5.2. Распространенность и запасы ..... 72
9.5.3. Области использования ..... 72
9.5.4. Минеральный состав и типы руд ..... 73
9.5.5. Добыча и переработка руд ..... 73
9.5.6. Месторождения ванадия в Забайкалье ..... 76
Контрольные вопросы ..... 77
Литература ..... 77
**9.6. Рений** ..... 81
9.6.1. Свойства ..... 81

9.6.2. Распространенность и запасы ..... 81
9.6.3. Области использования ..... 82
9.6.4. Минералы и типы месторождений ..... 82
9.6.5. Добыча и переработка руд ..... 82
9.6.6. Источники рения в Забайкалье ..... 83
Контрольные вопросы ..... 86
Литература ..... 86
**9.7. Таллий** ..... 88
9.7.1. Свойства ..... 88
9.7.2. Распространенность и запасы ..... 88
9.7.3. Области использования ..... 89
9.7.4. Минералы и промышленные типы руд ..... 90
9.7.5. Способы добычи и переработки руд ..... 92
9.7.6. Источники таллия в Забайкалье ..... 93
Контрольные вопросы ..... 94
Литература ..... 94
**9.8. Галлий** ..... 96
9.8.1. Свойства ..... 96
9.8.2. Распространенность и запасы ..... 96
9.8.3. Области использования ..... 97
9.8.4. Минералы и типы руд ..... 98
9.8.5. Способы добычи и переработки руд ..... 100
9.8.6. Источники галлия в Забайкалье ..... 100
Контрольные вопросы ..... 102
Литература ..... 102
**9.9. Индий** ..... 104
9.9.1. Свойства ..... 104
9.9.2. Распространенность и запасы ..... 104
9.9.3. Области использования ..... 105
9.9.4. Минералы и промышленные типы руд ..... 105
9.9.5. Добыча и переработка руд ..... 106
9.9.6. Источники индия в Забайкалье ..... 107
Контрольные вопросы ..... 111
Литература ..... 111

**9.10. Селен** ..... 113
9.10.1. Свойства ..... 113
9.10.2. Распространенность и запасы ..... 113
9.10.3. Области использования ..... 114
9.10.4. Минералы и типы руд ..... 115
9.10.5. Способы добычи и переработки руд ..... 119
9.10.6. Источники селена в Забайкалье ..... 120
Контрольные вопросы ..... 122
Литература ..... 122
**9.11. Теллур** ..... 124
9.11.1. Свойства ..... 124
9.11.2. Распространенность и запасы ..... 124
9.11.3. Области использования ..... 125
9.11.4. Минеральный состав и промышленные типы руд ..... 126
9.11.5. Способы добычи и переработки руд ..... 127
9.11.6. Теллуровое сырье в Забайкалье ..... 128
Контрольные вопросы ..... 131
Литература ..... 131
**9.12. Скандий** ..... 133
9.12.1. Свойства ..... 133
9.12.2. Распространенность и запасы ..... 133
9.12.3. Области применения ..... 134
9.12.4. Минеральный состав и типы руд ..... 134
9.12.5. Способы добычи и переработки руд ..... 136
9.12.6. Возможные источники скандия в Забайкалье .. 137
Контрольные вопросы ..... 156
Литература ..... 156
**9.13. Цирконий** ..... 158
9.13.1. Свойства ..... 158
9.13.2. Распространенность и запасы ..... 158
9.13.3. Области использования ..... 159
9.13.4. Минералы и промышленные типы руд ..... 160
9.13.5. Способы добычи и переработки руд ..... 161

9.13.6. Источники циркония в Забайкалье ..... 163
Контрольные вопросы ..... 163
Литература ..... 164
**9.14. Гафний** ..... 165
9.14.1. Свойства ..... 165
9.14.2. Распространенность и запасы ..... 165
9.14.3. Области использования ..... 166
9.14.4. Минералы и промышленные типы руд ..... 166
9.14.5. Добыча и переработка руд ..... 167
9.14.6. Месторождения гафния в Забайкалье ..... 167
Контрольные вопросы ..... 169
Литература ..... 169
**9.15. Торий** ..... 170
9.15.1. Свойства ..... 170
9.15.2. Распространенность и запасы ..... 171
9.15.3. Области использования ..... 171
9.15.4. Минеральный состав и типы руд ..... 172
9.15.5. Способы добычи и переработки руд ..... 173
9.14.6. Источники тория в Забайкалье ..... 175
Контрольные вопросы ..... 179
Литература ..... 179
**9.16. Иттрий** ..... 181
9.16.1. Свойства ..... 181
9.16.2. Распространенность и запасы ..... 181
9.16.3. Области использования ..... 182
9.16.4. Минеральный состав и типы руд ..... 183
9.16.5. Добыча и переработка руд ..... 185
9.16.6. Источники иттрия в Забайкалье ..... 186
Контрольные вопросы ..... 188
Литература ..... 188
**9.17. Лантаноиды** ..... 190
9.17.1. Общие сведения и свойства ..... 190
9.17.2. Распространенность и запасы ..... 195
9.17.3. Области использования ..... 198

9.17.4. Минеральный состав и типы руд ..... 202
9.17.5. Добыча и переработка руд ..... 209
9.17.6. Источники лантаноидов в Забайкалье ..... 212
Контрольные вопросы ..... 224
Литература ..... 224
**Заключение** ..... 226
Список литературы к Книге II ..... 228
Список используемых сокращений ..... 233

*Учебное издание*

Юргенсон Георгий Александрович

# Минеральное сырье Забайкалья

Учебное пособие
**Часть I**
**Книга 2**
**Редкие элементы**

На обложке использован фрагмент геологической карты полезных ископаемых Олондинского зеленокаменного пояса [Геологическое строение и полезные ископаемые..., 2002] и фото берилловой руды Шерловогорского месторождения

Редактор Т.П. Прокопенко
Компьютерная верстка Т.П. Чернова
Оформление обложки М.Г. Юргенсон

45 руб.

Книжное издательство «Поиск»
Подписано в печать 10.10.2008
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Школьная.
Усл. печ. л. 13,95. Тираж 300. Заказ 28.
672027, г. Чита, ул. Смоленская, 22.
Тел. 26-59-21


45 ЬУ5
Au
gQIII-IV
sAR2–PR1
υσPR1d
gQIII-II
po, ms, cr
ms, po, cr
ms, cr
po, ms
ms, po, cr, kr
kr, zr
pPR1²k
Li
3
aQIV
gQIII-II