

«Стратегическое, дефицитное и критическое минеральное сырьё»
(редкие легкие металлы: литий, бериллий)



Ерёмин Николай Иосифович
Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

Литий (Lithium) - Li

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		
1	1	H 1,008 ВОДОРОД																He 4,003 ГЕЛИЙ	2
2	2	Li 6,941 ЛИТИЙ	Be 9,0122 БЕРИЛЛИЙ	B 10,811 БОР	C 12,011 УГЛЕРОД	N 14,007 АЗОТ	O 15,999 КИСЛОРОД	F 18,998 ФТОР										Ne 20,179 НЕОН	10
3	3	Na 22,99 НАТРИЙ	Mg 24,312 МАГНИЙ	Al 26,982 АЛЮМИНИЙ	Si 28,086 КРЕМНИЙ	P 30,974 ФОСФОР	S 32,064 СЕРА	Cl 35,453 ХЛОР										Ar 39,948 АРГОН	18
4	4	K 39,102 КАЛИЙ	Ca 40,08 КАЛЬЦИЙ	Sc 44,956 СКАНДИЙ	Ti 47,956 ТИТАН	V 50,941 ВАНАДИЙ	Cr 51,996 ХРОМ	Mn 54,938 МАРГАНЕЦ	Fe 55,849 ЖЕЛЕЗО	Co 58,933 КОБАЛЬТ	Ni 58,7 НИКЕЛЬ								
	5	Cu 63,546 МЕДЬ	Zn 65,37 ЦИНК	Ga 69,72 ГАЛЛИЙ	Ge 72,59 ГЕРМАНИЙ	As 74,922 МЫШЬЯК	Se 78,96 СЕЛЕН	Br 79,904 БРОМ											Kr 83,8 КРИПТОН
5	6	Rb 85,468 РУБИДИЙ	Sr 87,62 СТРОНЦИЙ	Y 88,906 ИТТРИЙ	Zr 91,22 ЦИРКОНИЙ	Nb 92,906 НИОБИЙ	Mo 95,94 МОЛИБДЕН	Tc [99] ТЕХНЕЦИЙ	Ru 101,07 РУТЕНИЙ	Rh 102,906 РОДИЙ	Pd 106,4 ПАЛЛАДИЙ								
	7	Ag 107,868 СЕРЕБРО	Cd 112,41 КАДМИЙ	In 114,82 ИНДИЙ	Sn 118,69 ОЛОВО	Sb 121,75 СУРЬМА	Te 127,6 ТЕЛЛУР	I 126,905 ИОД											Xe 131,3 КСЕНОН
6	8	Cs 132,905 ЦЕЗИЙ	Ba 137,34 БАРИЙ	57-71 ЛАНТАНОИДЫ		Hf 178,49 ГАФНИЙ	Ta 180,948 ТАНТАЛ	W 183,85 ВОЛЬФРАМ	Re 186,207 РЕНИЙ	Os 190,2 ОСМИЙ	Ir 192,22 ИРДИЙ	Pt 195,09 ПЛАТИНА							
	9	Au 196,967 ЗОЛОТО	Hg 200,59 РУТУТЬ	Tl 204,37 ТАЛЛИЙ	Pb 207,19 СВИНЕЦ	Bi 208,98 ВИСМУТ	Po [210] ПОЛОНИЙ	At [210] АСТАТ											Rn [222] РАДОН
7	10	Fr [223] ФРАНЦИЙ	Ra [226] РАДИЙ	89-103 АКТИНОИДЫ		Rf [261] РЕЗЕРФОРДИЙ	Db [262] ДУБНИЙ	Sg [263] СИБОРГИЙ	Bh [262] БОРИЙ	Hn [265] ХАНИЙ	Mt [268] МЕЙТНЕРИЙ								
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		R_2O		RO		R_2O_3		RO_2		R_2O_5		RO_3		R_2O_7		RO_4			
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ						RH_4		RH_3		H_2R		HR							



Д.И. Менделеев
1834-1907



- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

ЛАНТАНОИДЫ

57 La 138,906 ЛАНТАН	58 Ce 140,12 ЦЕРИЙ	59 Pr 140,908 ПРАЗЕОДИМ	60 Nd 144,24 НЕОДИМ	61 Pm [145] ПРОМЕТИЙ	62 Sm 150,4 САМАРИЙ	63 Eu 151,96 ЕВРОПИЙ	64 Gd 157,25 ГАДОЛИНИЙ	65 Tb 158,926 ТЕРБИЙ	66 Dy 162,5 ДИСПРОЗИЙ	67 Ho 164,93 ГОЛЬМИЙ	68 Er 167,26 ЭРБИЙ	69 Tm 168,934 ТУЛИЙ	70 Yb 173,04 ИТТЕРБИЙ	71 Lu 174,97 ЛЮТЕЦИЙ
-----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac [227] АКТИНИЙ	90 Th 232,038 ТОРИЙ	91 Pa [231] ПРОТАКТИНИЙ	92 U 238,29 УРАН	93 Np [237] НЕПТУНИЙ	94 Pu [244] ПЛУТОНИЙ	95 Am [243] АМЕРИЦИЙ	96 Cm [247] КЮРИЙ	97 Bk [247] БЕРКЛИЙ	98 Cf [251] КАЛИФОРНИЙ	99 Es [254] ЭЙНШТЕЙНИЙ	100 Fm [257] ФЕРМИЙ	101 Md [258] МЕНДЕЛЕВИЙ	102 No [259] НОБЕЛИЙ	103 Lr [260] ЛОУРЕНСИЙ
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

➤ **Литий (Li)** – химический элемент первой группы периодической системы Менделеева, ат. н. 3, ат. м. 6,941, редкий щелочной металл. Открыт в 1817 г. Шведским ученым А.Арфведсоном в минерале петалите. Металлический литий впервые получен в 1818 г. Английским ученым Г.Дэви. В природе встречаются два стабильных изотопа ${}^6\text{Li}$ (7,42%) и ${}^7\text{Li}$ (92,58%). Электронная конфигурация – $1s^2 2s^1$.

- Литий - самый легкий металл, типичный литофильный элемент. Важнейшее техническое свойство: резкое различие в поглощении тепловых нейтронов его изотопами: ${}^6\text{Li}$ (910), ${}^7\text{Li}$ (0,033).
- Кларк лития в земной коре $3,2 \cdot 10^{-3}\%$, он повышается в кислых породах ($4 \cdot 10^{-3}\%$) и глинах ($6,6 \cdot 10^{-3}\%$). Накапливается в наиболее поздних продуктах дифференциации магмы – пегматитах.

Промышленные минералы:

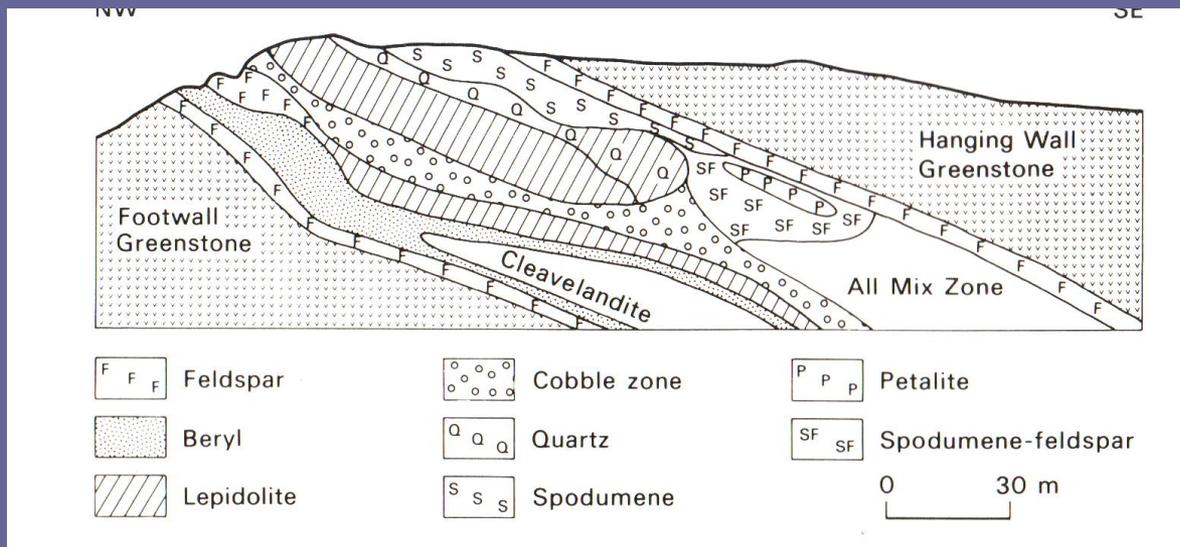
- *сподумен* $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ (сод. Li_2O 5,9-7,6%),
 - *петалит* $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ (3,5-4,1%),
 - *амблигонит* $(\text{Li,Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{F,OH})$ (6-9%),
 - *монтебразит* $\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH,F})$,
 - *эвкрипит* LiAlSiO_4 ,
- а также *литиевые слюды* –
- *циннвальдит* $\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$ (3-3,5%),
 - *лепидолит* $\text{K}(\text{Li,Al})_3(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$ (3,5-5,5%),
 - *полилитионит* $\text{KLi}_2\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$ (5,5-8,8%).

Близость ионных радиусов Li, Mg, Fe позволяет литию изоморфно входить в решетки Fe-Mg силикатов.

- **Промышленные месторождения лития** представлены гранитными *пегматитами* (24,5% мировых запасов, 55% мировой добычи), редкометалльными Та-Nb циннвальдитовыми/лепидолитовыми *грейзенами* (0,5%) и *гидроминеральными источниками* (75% запасов, около 45% добычи). Почти все они являются комплексными: помимо Li они содержат Та, Nb, Rb, Cs, Sn, Be (в пегматитах); К, Na, Br, В, Mg и др. (в рапе).
- **По масштабам оруденения месторождения лития** подразделяют на (тыс. т Li₂O): *очень крупные* – более 600; *крупные* – 300-600; *средние* – 100-300; *мелкие* – 40-100. Содержание Li₂O в разрабатываемых пегматитовых месторождениях составляет 1,3-3,0%; минимальное промышленное – 1%.
- **Месторождения литийсодержащих рассолов** характеризуются крупными запасами – в целом более 200 тыс. т Li₂O; при содержаниях Li₂O – от 0,01 до 0,5%.

Литиеносные гранитные пегматиты подразделяют на два основных подтипа:

- **Сподумен-микроклин-альбитовые пегматиты** – преимущественно месторождения тантала и цезия, содержащие также литий и бериллий: Гринбушес (Австралия), Берник-Лейк (Канада), Бикита (Зимбабве), Блэк-Хиллс (США) и др.
- **Альбит-сподуменовые пегматиты.** Содержание Li_2O в рудах 1,1-1,5%; попутные компоненты – тантал, бериллий, олово; запасы – 400-800 тыс. т. Месторождения: Кингс-Маунтин (США), Берник-Лейк (Канада), Маноно-Китотоло (Заир), Бикита (Зимбабве) и др.



Бикита (Зимбабве) – разрез СЗ-ЮВ

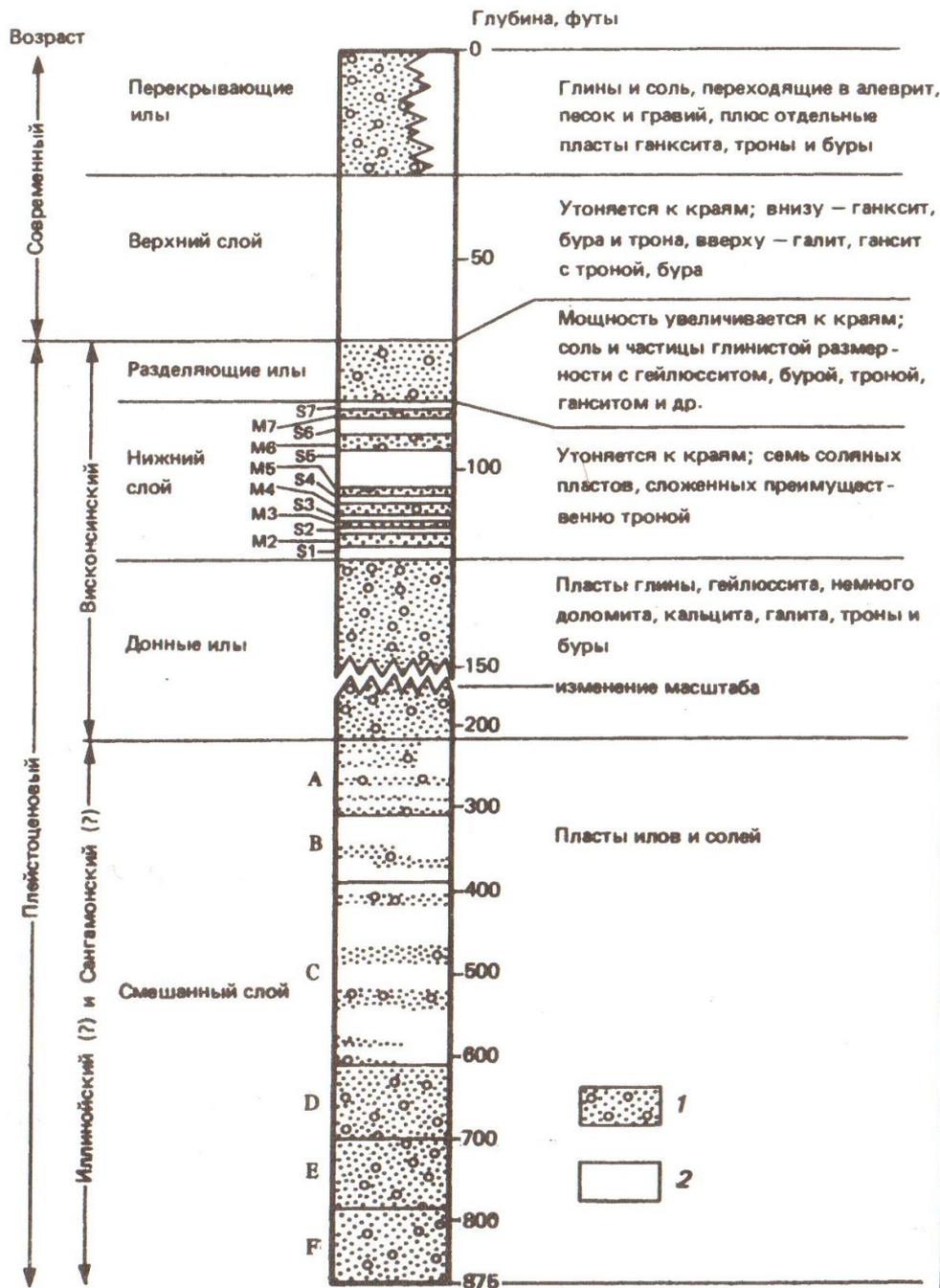
Одно из крупнейших Li-Cs-Be месторождений мира. Главное пегматитовое тело вытянуто на 2 км при мощности 45-60 м в составе архейского зеленокаменного пояса Форт Виктория. Отчетливое зональное строение пегматитового тела. Важнейшие минералы: петалит, лепидолит, сподумен, поллуцит, берилл, эвкрипит, амблигонит, а также рассеянная вкрапленность касситерита, танталита и микролита. Длина кристаллов сподумена достигает 3 м. Запасы Li_2O – около 70 тыс. т, сод.-1,4% cobble – «булыжник»

Минералы пегматитов Бикита

- Сподумен – $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
- Микроклин – KAlSi_3O_8
- Альбит – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (квивеландит – ламеллярная рзн. альбита)
- Петалит – $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
- Лепидолит – $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$
- Поллуцит – $(\text{Cs},\text{Na})_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot\text{H}_2\text{O}$
- Берилл – $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
- Эвкрипит – LiAlSiO_4
- Амблигонит – $(\text{Li},\text{Na})\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$
- Касситерит – SnO_2
- Танталит – $(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$
- Микролит - $(\text{Ca},\text{Na})_2\text{Ta}_2\text{O}_6(\text{O},\text{OH},\text{F})$ и др.

➤ *Галургические (гидроминеральные) источники:*

- межкристалльная рапа высохших соляных и содовых озер (оз. Сёрлз, США, Li 96-115 мг/кг, запасы Li₂O 0,4 млн. т.),
- рассолы усыхающих бассейнов (Мертвое море, Израиль, Li₂O 0,004%),
- подземные рассолы (Сильвер-Пик, США, Li₂O 0,08%, 7,4 млн. т.),
- подземные нефтяные воды (Li₂O до 0,08% и др.),
- термальные воды областей современного активного вулканизма.



Стратиграфический разрез современных и плейстоценовых отложений оз. Сёрлз (Калифорния)

1 – илы; 2 – соли

Площадь озера более 115 кв. км. Его поверхность сложена современными глинами и илами за исключением центральной части, где на площади около 15 кв. км обнажается каменная соль.

Впадина озера выполнена 900-метровой толщей аллювия и континентальных эвапоритовых осадков, залегающих на кварцевых монзонитах. Верхняя 270-метровая часть этой толщи детально изучена и имеет промышленное значение.

Основное промышленное значение имеют верхний и нижний соляные (галитовые) пласты с ганкситом, тронной, бурой, гейлюсситом и др. Помимо этих минералов, 45-50% объема пластов занимает межкристалльная рапа с растворенными в ней солями Na, K, B, Li, хлоридом K и др.

При скважинной добыче рассолов (рапы) и комплексной переработке получают соду, сульфаты Na и K, хлористый K, жидкий Br, щелочные бромиды, очищенную буру, борную к-ту, пироборат Na, карбонат и фосфат лития – Li_2NaPO_4 .

МСБ лития

- **Мировые запасы лития** (3400 тыс. т): Боливия (56%), Чили (31%), США и Канада (по 4%). В литиеносной рапе – 75% мировых запасов, в гранитных пегматитах и грейзенах -25%.
- Россия по запасам лития занимает третье место в мире, причем более 70% запасов связано с редкометалльными пегматитами, а остальная часть приходится на редкометалльные граниты и около 2% - на слюдисто-флюоритовые пегматиты.
- **Мировое производство лития** в концентратах и рапе (в пересчете на металл) Горным бюро США оценивалось (2000 г) в 13 тыс. т (сведения без США, производство в которых составляет около 2 тыс. т); более одной трети (5,5 тыс. т) приходится на Чили, где его получают из рапы оз. Салар-де-Атакама.

Переработка руд и производство лития

- **Li-руды обогащаются** флотацией или в тяжелых суспензиях с получением сподуменового (сод. Li_2O 4,5-6%), петалитового (2,5-3,5%), лепидолитового (3-4%), амблигонитового (7-8%) и др. концентратов, переработка которых обычно ведется по сернокислотной технологии, основанной на сульфатизации серной кислотой обожженного при температуре 1000°C концентрата.
- **Технология извлечения солей Li из минерализованных вод** основана на частичном естественном выпаривании Li и последующей его экстракции ионнообменными смолами.
- **Металлический Li** получают электролизом расплавленной смеси хлоридов Li и K при 400-460 °C с последующей очисткой от примесей вакуумной дистилляцией, ректификацией или зонной плавкой.

Применение лития

- **Важнейшая область использования лития – ядерная энергетика** (изготовление регулирующих стержней в системе защиты реакторов). Жидкий ${}^7\text{Li}$ применяется в качестве теплоносителя в ядерных реакторах. ${}^6\text{Li}$ – единственный промышл. источник радиоактивного изотопа водорода – трития ${}^3\text{H}$.
- **В металлургии** литий используют для получения на основе Mg и Al литийсодержащих сплавов; его добавление улучшает пластичность, повышает прочность, устойчивость к коррозии.
- **В мобильных технологиях** (производство планшетных компьютеров iPad, гибридных автомобилей и др.) литий – один из ключевых элементов, используемый, прежде всего, в аккумуляторах (Li и Li-ion).

По данным Геологической Службы США

(USGS, Mineral Commodity Summaries-2020)

- Операторы по производству (добыче) Li: а) из рассолов (континентальных, геотермальных, нефтяных и др.) функционируют в Аргентине, Боливии, Чили, Китае и США; б) по рудничной добыче из пегматитов (сподумен) – в Австралии, Австрии, Канаде, Китае, Чехии, Финляндии, Мали, Намибии, Португалии, Сербии и Испании; в) по рудничной добыче из гекторитовых (Mg-Li-сметит) глин – в Мексике и США. Содержание Li в гекторите – 0,53%.
- Рециклинг металлического Li и Li-ионных батарей осуществляется одной американской компанией с 1992 года в Канаде (Британская Колумбия). В 2015 году компания начала заниматься рециклингом Li-ионных автомобильных аккумуляторов в США (Ланкастер).
- Мировое рудничное производство Li в 2018 году выросло за 1 год на 16000 т и составило около 85000 т, из которых в Австралии – 51000 т (60% от мирового), Чили – 16000 (18,9), Китае – 8000 (9,5), Аргентине – 6200 (7,4), Зимбабве – 1600 (1,9), в Португалии, Бразилии, Намибии и др. совместно – 1900 (2,3).
- Мировые запасы (reserves) Li на начало 2019 года составили 14 млн.т, из которых 8 млн. т (57,1% от мировых) приходятся на Чили; 2,7 (19,3) – на Австралию; 2,0 (14,3) – Бразилию; 1,0 (7,1) – Китай.
- Мировые ресурсы (resources) Li на начало 2019 года оцениваются величиной около 62 млн.т, подавляющая часть которой приходится на Аргентину. Боливию, Австралию, США, Китай, Канаду, Мексику, Чехию и др. страны.

Бериллий (Beryllium) - Be

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
		a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б		
1	1	H 1,008 ВОДОРОД																He 4,003 ГЕЛИЙ	2
2	2	Li 6,941 ЛИТИЙ	Be 9,0122 БЕРИЛЛИЙ	B 10,811 БОР	C 12,011 УГЛЕРОД	N 14,007 АЗОТ	O 15,999 КИСЛОРОД	F 18,998 ФТОР										Ne 20,179 НЕОН	10
3	3	Na 22,99 НАТРИЙ	Mg 24,312 МАГНИЙ	Al 26,982 АЛЮМИНИЙ	Si 28,086 КРЕМНИЙ	P 30,974 ФОСФОР	S 32,064 СЕРА	Cl 35,453 ХЛОР										Ar 39,948 АРГОН	18
4	4	K 39,102 КАЛИЙ	Ca 40,08 КАЛЬЦИЙ	Sc 44,956 СКАНДИЙ	Ti 47,956 ТИТАН	V 50,941 ВАНАДИЙ	Cr 51,996 ХРОМ	Mn 54,938 МАРГАНЕЦ	Fe 55,849 ЖЕЛЕЗО	Co 58,933 КОБАЛЬТ	Ni 58,7 НИКЕЛЬ								
	5	Cu 63,546 МЕДЬ	Zn 65,37 ЦИНК	Ga 69,72 ГАЛЛИЙ	Ge 72,59 ГЕРМАНИЙ	As 74,922 МЫШЬЯК	Se 78,96 СЕЛЕН	Br 79,904 БРОМ											Kr 83,8 КРИПТОН
5	6	Rb 85,468 РУБИДИЙ	Sr 87,62 СТРОНЦИЙ	Y 88,906 ИТТРИЙ	Zr 91,22 ЦИРКОНИЙ	Nb 92,906 НИОБИЙ	Mo 95,94 МОЛИБДЕН	Tc [99] ТЕХНЕЦИЙ	Ru 101,07 РУТЕНИЙ	Rh 102,906 РОДИЙ	Pd 106,4 ПАЛЛАДИЙ								
	7	Ag 107,868 СЕРЕБРО	Cd 112,41 КАДМИЙ	In 114,82 ИНДИЙ	Sn 118,69 ОЛОВО	Sb 121,75 СУРЬМА	Te 127,6 ТЕЛЛУР	I 126,905 ИОД											Xe 131,3 КСЕНОН
6	8	Cs 132,905 ЦЕЗИЙ	Ba 137,34 БАРИЙ	57-71 ЛАНТАНОИДЫ		Hf 178,49 ГАФНИЙ	Ta 180,948 ТАНТАЛ	W 183,85 ВОЛЬФРАМ	Re 186,207 РЕНИЙ	Os 190,2 ОСМИЙ	Ir 192,22 ИРДИЙ	Pt 195,09 ПЛАТИНА							
	9	Au 196,967 ЗОЛОТО	Hg 200,59 РУТУТЬ	Tl 204,37 ТАЛЛИЙ	Pb 207,19 СВИНЕЦ	Bi 208,98 ВИСМУТ	Po [210] ПОЛОНИЙ	At [210] АСТАТ											Rn [222] РАДОН
7	10	Fr [223] ФРАНЦИЙ	Ra [226] РАДИЙ	89-103 АКТИНОИДЫ		Rf [261] РЕЗЕРФОРДИЙ	Db [262] ДУБНИЙ	Sg [263] СИБОРГИЙ	Bh [262] БОРИЙ	Hn [265] ХАНИЙ	Mt [268] МЕЙТТЕРИЙ								
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		R_2O	RO	R_2O_3	RO_2	R_2O_5	RO_3	R_2O_7				RO_4							
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ					RH_4	RH_3	H_2R	HR											



Д.И. Менделеев
1834-1907



- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

ЛАНТАНОИДЫ

57 La 138,906 ЛАНТАН	58 Ce 140,12 ЦЕРИЙ	59 Pr 140,908 ПРАЗЕОДИМ	60 Nd 144,24 НЕОДИМ	61 Pm [145] ПРОМЕТИЙ	62 Sm 150,4 САМАРИЙ	63 Eu 151,96 ЕВРОПИЙ	64 Gd 157,25 ГАДОЛИНИЙ	65 Tb 158,926 ТЕРБИЙ	66 Dy 162,5 ДИСПРОЗИЙ	67 Ho 164,93 ГОЛЬМИЙ	68 Er 167,26 ЭРБИЙ	69 Tm 168,934 ТУЛИЙ	70 Yb 173,04 ИТТЕРБИЙ	71 Lu 174,97 ЛЮТЕЦИЙ
-----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac [227] АКТИНИЙ	90 Th 232,038 ТОРИЙ	91 Pa [231] ПРОТАКТИНИЙ	92 U 238,29 УРАН	93 Np [237] НЕПТУНИЙ	94 Pu [244] ПЛУТОНИЙ	95 Am [243] АМЕРИЦИЙ	96 Cm [247] КЮРИЙ	97 Bk [247] БЕРКЛИЙ	98 Cf [251] КАЛИФОРНИЙ	99 Es [254] ЭЙНШТЕЙНИЙ	100 Fm [257] ФЕРМИЙ	101 Md [258] МЕНДЕЛЕВИЙ	102 No [259] НОБЕЛИЙ	103 Lr [260] ЛОУРЕНСИЙ
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

➤ **Бериллий**– химический элемент второй группы периодической системы Менделеева, атомный номер 4, атомная масса **9,0122**, редкий (кларк $6 \cdot 10^{-4}\%$) литофильный амфотерный элемент (легкий металл), характерный для кислых и щелочных пород. Имеет один стабильный изотоп **^9Be** . Открыт в 1798 г. французским химиком Л. Вокленом. Электронная конфигурация атома $1s^2 2s^2$

Минералы бериллия

- Известно 55 минералов бериллия – силикаты, алюмосиликаты, фосфаты, окислы и бораты. В рудах бериллий находится главным образом в форме собственных минералов, а также в виде изоморфной примеси (до 1-2%) в породообразующих минералах (везувиан и др.).

Минералы Be-руд:

- *берилл* $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ (10-12% BeO),
- *фенакит* Be_2SiO_4 (40-44%),
- *берtrandит* $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ (40-42%),
- *гельберtrandит* $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_{2n}\text{H}_2\text{O}$ (32-35%),
- *хризоберилл* BeAl_2O_4 (18-20%),
- *барилит* $\text{BaBe}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)$ (16%)
- *гентгельвин* $(\text{Zn},\text{Mn})(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$
- *гельвин* $(\text{Mn},\text{Fe})(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$ (12-13%)
- *эвклаз* $\text{BeAlSiO}_4(\text{OH})$ (16-17%),
- *лейкофан* $(\text{Na},\text{Ca})_2\text{BeSi}_2(\text{O},\text{OH},\text{F})_7$ (10-12%).

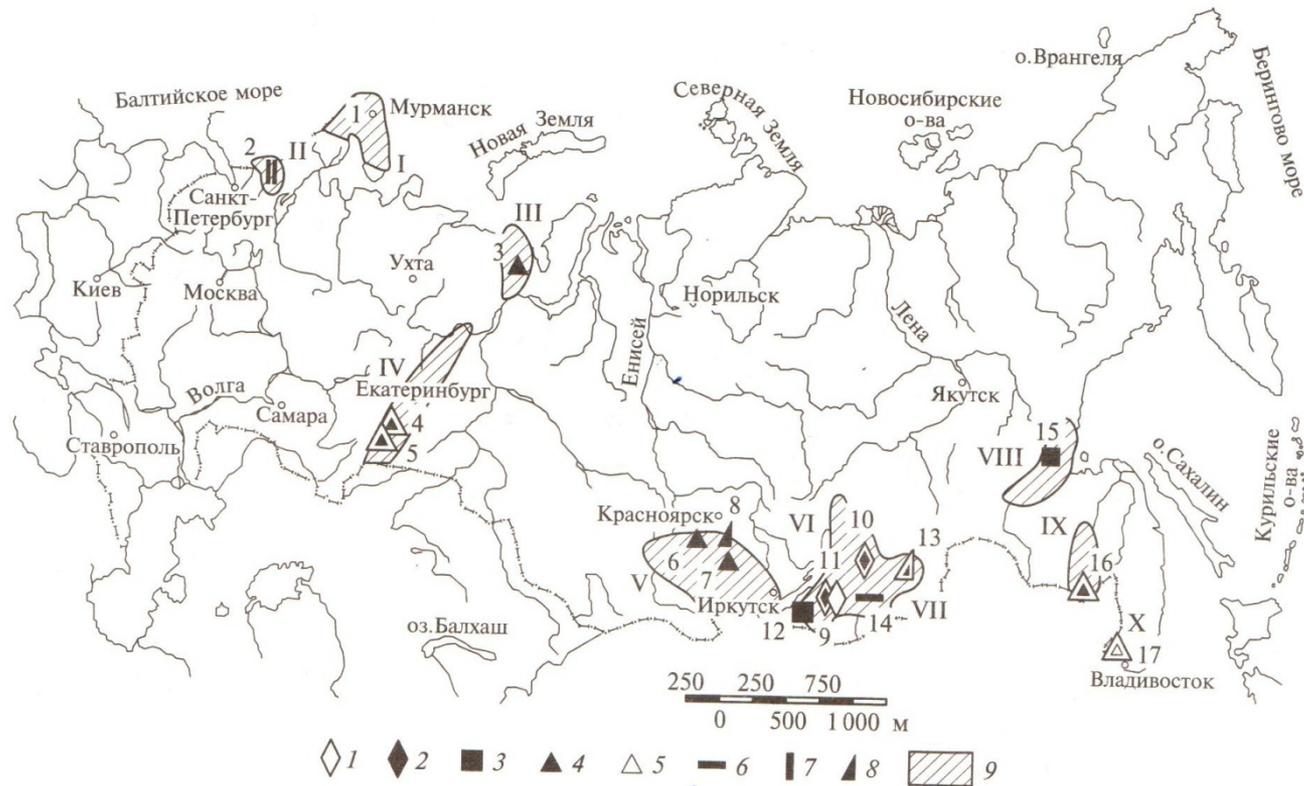
Попутно из Be-руд извлекают W, Mo, Sn, Ta, Li, Cs, Rb и др.

Благородный берилл и хризоберилл – цветные камни

- Неповторимая разнообразная окраска – отличительная черта благородного берилла, в первую очередь травяно-зеленого изумруда и голубого, иногда с зеленоватым оттенком аквамарина. Встречаются также розовые (воробьевит), золотисто-желтые (гелиодор), землянично-красные (биксбит), сапфирово-синие (аквамарин-максис) цвета и др.
- Известны ювелирные прозрачные кристаллы хризоберилла зеленовато-желтого или оливкового цвета, популярна его опалесцирующая разновидность с эффектом «кошачьего глаза» – цимофан, но наиболее ценным является александрит – изумрудно-зеленый камень при дневном освещении и фиолетово-красный при электрическом.

Распределение запасов бериллия по промышленным типам месторождений, % от запасов в мире и в России соответственно (по И.И.Куприяновой и др.2005)

Промышленный тип	В мире	В России	Сод-ние BeO,%	Примеры месторождений
1.Бернtrandит-аргиллизитовые метасоматиты	21,0	-	0,6-1,5	Спёр-Маунтин (США)
2.Бертрандит-фенакит-флюоритовые метасоматиты	-	11,5	0,2-1,2	Ермаковское, Ауник (Россия)
3.Бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты	6,0	-	0,3-1,4	Тор-Лейк (Канада), Пержанское (Украина)
4.Берилл-слюдяные метасоматиты	25,0	26,0	0,12-0,75	Малышевское, Боёвское (Россия)
5.Апокарбонатные редкометалльно-флюоритовые метасоматиты	-	12,0	0,1-0,3	Вознесенское, Пограничное (Россия)
6.Комплексные (Be, W, Mo) кварцево-жильные	-	2,5	0,05-0,3	Каракольское, Казандинское (Россия)
7.Редкометалльные пегматиты	48,0	48,0	0,03-0,3	Завитинское, Колмозерское (Россия)



Основные бериллиеносные провинции и месторождения России

Провинции: I – Карело-Кольская, II – СвекоФинская, III – Полярно-Уральская, IV – Вост.-Уральская, V – Алтае-Саянская, VI – Зап.-Забайкальская, VII - Вост.-Забайкальская, VIII – Алданская, IX – Буреинская, X – Ханкайская.

Типы месторождений: 1 – берtrandит-аргиллизитовые, 2 – флюорит-берtrandит-фенакитовые, 3 – бериллиеносные полевошпатовые, 4 – берилл-слюдяные, 5 – бериллиеносные флюоритовые, 6 – кварцево-жильные, 7 – бериллиеносные скарны, 8 – редкометалльные пегматиты, 9 – бериллиеносные провинции.

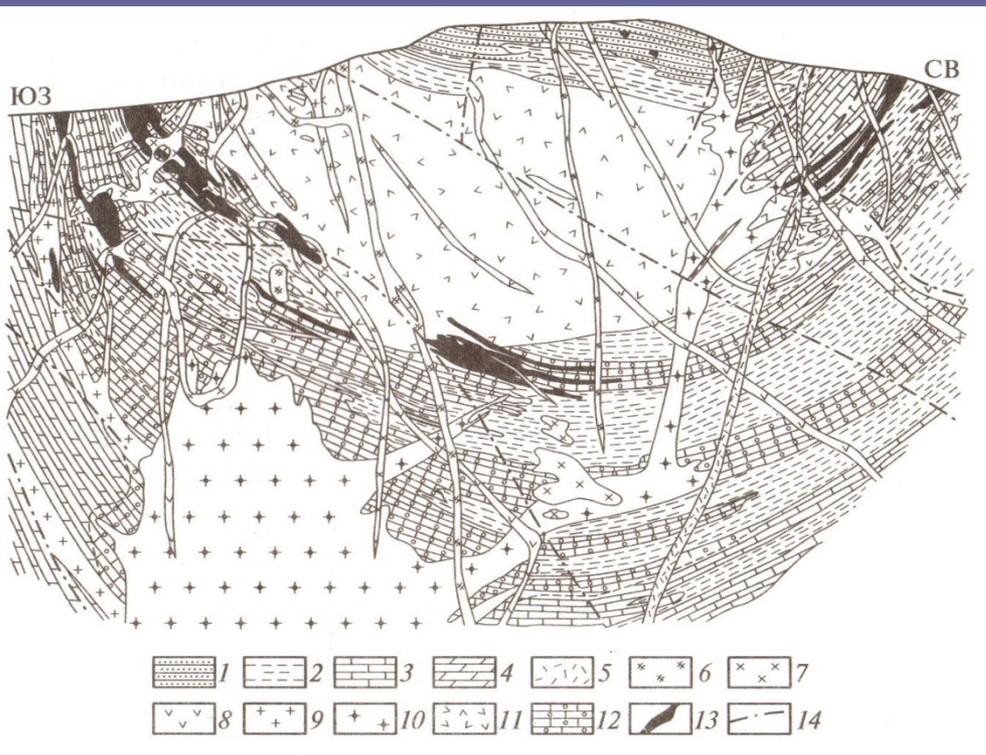
Месторождения: 4 – Малышевское, 5 – Боевское, 8 – Вишняковское, 9 – Ермаковское, 13 – Завитинское, 14 – Шерловогорское, 17 – Вознесенское и Пограничное

Ермаковское месторождение в Бурятии (геологический разрез ЮЗ-СВ)

Берtrandит-фенакит-
флюоритовые метасоматиты,
связанные с гипабиссальными
куполами альбитизированных
граносиенитов, кварцевых
сиенитов и щелочных гранитов
в зонах Mz-активизации
складчатых областей.

Рудные тела (13) – послойные
метасоматические зоны по
известнякам (3) длиной до
сотен м, мощностью – до дес.
м.

В рудах: берtrandит, флюорит,
фенакит, реже мелинофан,
лейкофан, эвдидимит,
бавенит, миларит, гелвин,
сульфиды Zn и Pb. Ср. сод.
BeO – 1,19%, CaF₂ – 24,6%



Минералы руд Ермаковского месторождения

- Берtrandит – $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$
- Флюорит – CaF_2
- Фенакит – Be_2SiO_4
- Мелинофан – $(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Be},\text{Al})(\text{Si}_2\text{O}_6)\text{F}$
- Лейкофан – $(\text{Na},\text{Ca})_2\text{BeSi}_2(\text{O},\text{F},\text{OH})_7$
- Эвдимит – $\text{NaBeSi}_3\text{O}_7(\text{OH})$
- Бавенит – $\text{Ca}_4\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{26}(\text{OH})_2$
- Миларит – $\text{K}_2\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Be}_4\text{Si}_{24}\text{O}_{60}\cdot\text{H}_2\text{O}$
- Гельвин – $\text{Mn}_4\text{Be}_3(\text{SiO}_4)_3\text{S}$
- Сульфиды цинка и свинца и др.

Бериллиевые руды по содержанию BeO (%) подразделяются на:

богатые (более 0,6),
рядовые (0,6-0,3),
бедные (0,3-0,1),
убогие (0,1-0,04)

Для собственно бериллиевых месторождений минимальное промышленное содержание в рудах BeO составляет 0,25-0,35%, а для комплексных – 0,05-0,10%.

Вредной примесью (при использовании бериллия в атомной промышленности) являются редкие земли, характеризующиеся высокой способностью поглощать нейтроны.

**Месторождения бериллия по величине
разведанных запасов (тыс.т BeO)
подразделяются на:**

уникальные (более 50),
очень крупные (50-20),
крупные (20-10),
рядовые (10-5),
мелкие (до 5).

Общие мировые запасы бериллия (без России)
превышают 1 млн. т BeO (2003). Наиболее крупные
запасы в США, Бразилии, Китае, Канаде, Австралии.

Запасы бериллия в России весьма значительны и
сопоставимы с мировыми.

Переработка руд и производство бериллия

- По термофлотационной схеме из руды (ок.~ 1% BeO), после ее обесшламливания флотацией получают концентраты с 18-22% BeO.
- Металлический Be получают термическим восстановлением магнием, а Be высокой чистоты – переплавкой в вакууме и вакуумной дистилляцией.
- Лидирующую роль в мировом промышленном производстве бериллиевых концентратов (около 70%) играет вулканогенно-гидротермальное берtrandитовое месторождение Спёр-Маунтин (США). Другими крупными мировыми продуцентами бериллия являются Казахстан, Китай, Бразилия и Россия.

Применение бериллия

- **В металлургии** бериллий и его соединения - легирующие добавки к сплавам на основе Cu, Ni, Zn, Al, Pb др. цветных металлов (свыше 70% общего потребления металла).
- **В ядерной технике** бериллий – источник, отражатель и замедлитель нейтронов, материал для оболочек твэлов (тепловыделяющий элемент с ядерным топливом в активной зоне ядерного реактора; в нем протекает ядерная реакция деления, в результате которой выделяется тепло, передаваемое теплоносителю; состоит из сердечника и герметизирующей оболочки).
- **В авиа-, ракетостроении и космической технике** бериллий и его сплавы - конструкционные материалы.
- **А также** в электротехнике, радиоэлектронике, полупроводниковых приборах, в изготовлении окон рентгеновских трубок, нанесении твердого диффузионного слоя на поверхность стали (бериллизация), как присадки к ракетному топливу, для изготовления тиглей и специальной керамики.

По данным Геологической Службы США (USGS, Mineral Commodity Summaries-2020)

- Потребление Ве промышленностью США оценивается в 220 т, распределяясь по отраслям: электроника – 37%, промышленные компоненты – 22%, оборона – 9%, телекоммуникационная инфраструктура – 8%, энергетика – 7%, медицина – 1%, прочие -16%. Подавляющая часть металлического Ве и бериллиевых композитов использовались в военных и научных целях.
- За счет рециклинга (утилизация скрапа, образующегося при производстве -содержащей продукции) покрывается около 20-25% потребляемого промышленностью США Ве.
- Мировое рудничное производство Ве в 2018 году составило около 230 т металла, увеличившись за год на 20 т; по странам оно составило: США – 170 т, Китай – 50 т, Мадагаскар – 6 т, Нигерия – 4 т, Бразилия – 3 т, Руанда – 1 т.
- Мировые запасы (reserves) Ве неизвестны. В районе Спур Маунтин (штат Юта) эксплуатируемое одноименное эпитермальное м-ние содержит крупные ресурсы берtrandита; доказанные (proven) и вероятные (probable) запасы которого в пересчете на Ве составляют около 21 тыс.т.
- Установленные мировые ресурсы (identified resources) Ве превышают 100 тыс. т; около 60% этих ресурсов находится в США (кроме Юты в Неваде, Южной Дакоте, Техасе, Аляске)

Заключение

- Литий (Li) и бериллий (Be) обладают уникальными свойствами, обусловившими их исключительную значимость в ядерной энергетике и целом ряде других отраслей экономики России, что предопределяет отнесение их к числу **стратегических** видов сырья.
- Сведения о балансовых запасах в недрах, добыче, об объемах производства в натуральном выражении по литию и бериллию в РФ составляют государственную тайну. Ресурсы этих видов минерального сырья в стране значительны.
- Основу МСБ лития и бериллия в РФ составляют обычно комплексные эндогенные месторождения гранитоидного ряда; господствующие в мире литиеносные месторождения минеральных вод в стране отсутствуют.
- Качественное укрепление МСБ РФ по литию и бериллию - промышленное освоение ряда новых месторождений (Ермаковское и др.), снижение потерь металлов при обогащении руд и металлургическом переделе путем обновления оборудования и внедрением новейших технологий.

Литература

- 1.. ***О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах.*** Государственный доклад. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Москва 2018.
2. ***Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года.*** Утверждена распоряжением Правительства РФ от 22.12.2018 г No 2914-р Председатель правительства Д.Медведев.
3. ***Стратегия национальной безопасности Российской Федерации.*** Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 31.12.2015 года No 683.
4. ***Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года.*** Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 13.05.2017 года. No 208.
5. ***О стимулировании добычи редких металлов.*** Законопроект Подписан Президентом Российской Федерации В.Путиным в августе 2019 года, его основные положения вступят в силу 01.01.2020 года. Рассмотрен в первом чтении государственной думой.
6. ***Mineral Commodity Summaries-2020.*** USGS.

Critical Metals Handbook

Edited by

Gus Gunn

British Geological Survey

Keyworth

Nottingham

UK

10. Lithium

Keith Evans

Independent Consultant, San Diego, California, USA

The background of the lower half of the page features several sets of concentric, light-colored circles of varying sizes, resembling ripples in water or a stylized pattern, set against the dark blue background.

Локализация действующих литиевых рудников и отдельных завершающихся разведочных литиевых проектов

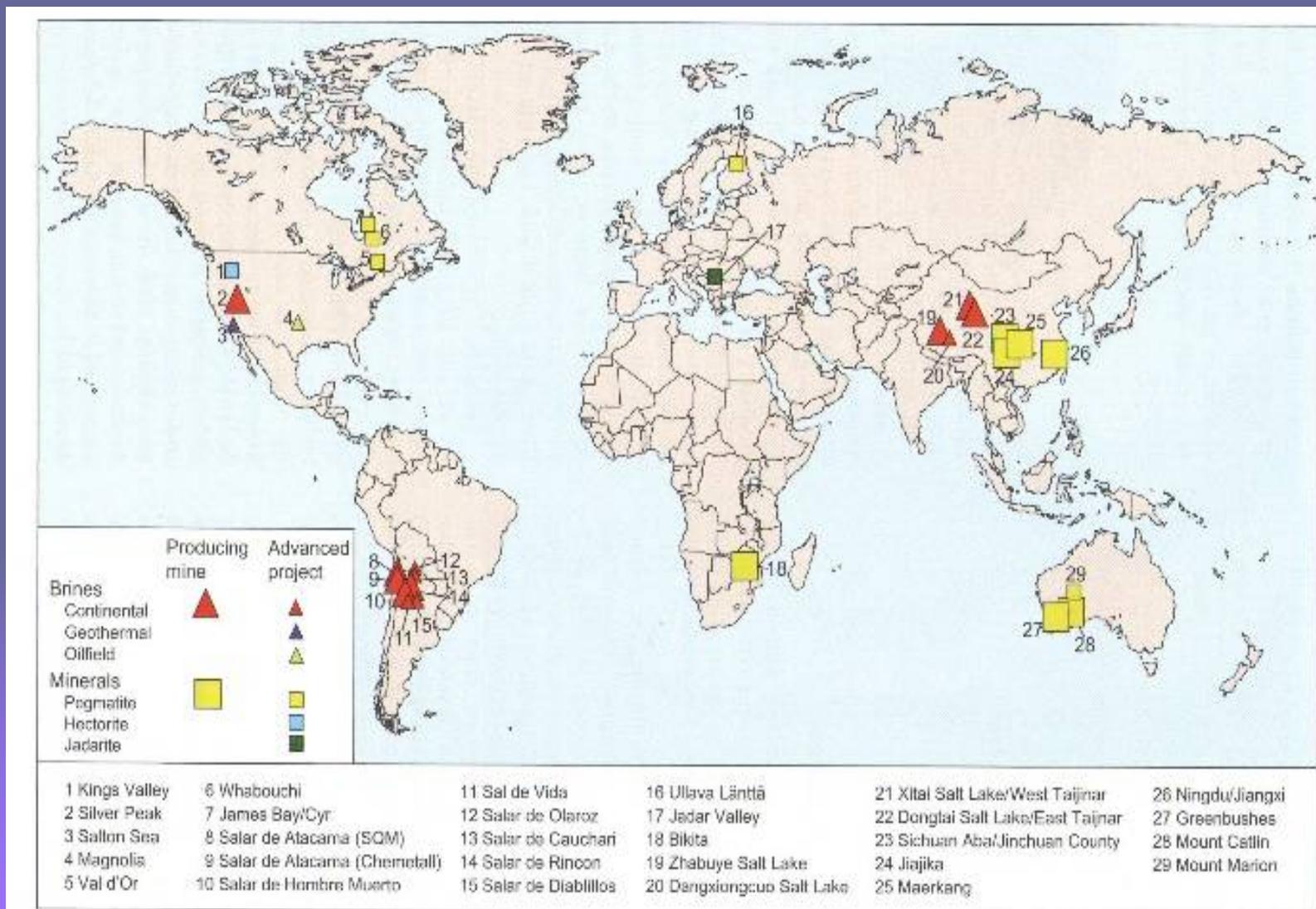


Figure 10.1 Location of producing lithium mines and selected advanced-stage lithium projects.

Некоторые свойства лития

Table 10.1 Selected properties of lithium.

Property	Value	Units
Symbol	Li	
Atomic number	3	
Atomic weight	6.94	
Density at 25 °C	533	kg/m ³
Hardness (Mohs scale)	0.6	
Melting point	181	°C
Atomic radius	145	pm
Ionic radius of Li ⁺	90	pm
Electrical conductivity	11.7×10^6	S/m
Electric potential	3.04	V
Specific heat capacity at 25 °C	3.58	J/(g °C)

Локализация саларов в Андах где добывают, либо предполагают (планируют) добычу лития

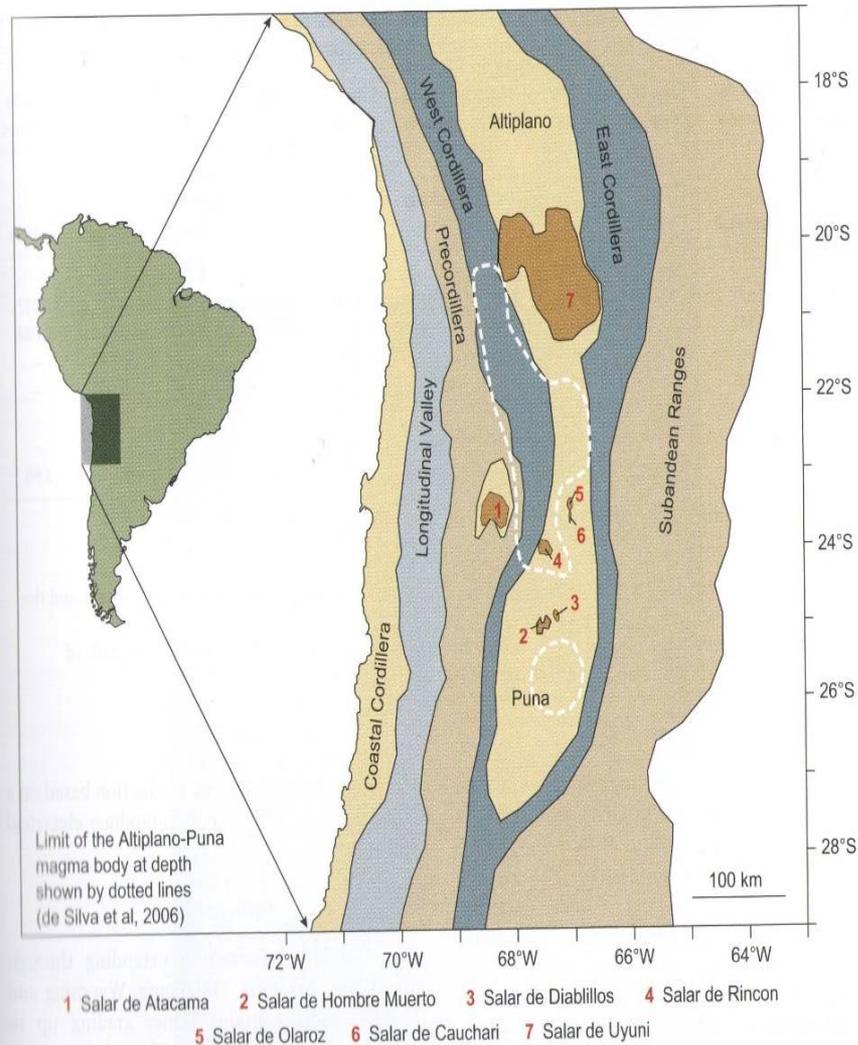


Figure 10.2 Location of salars in the Andean region where lithium extraction is active or proposed. (Compiled by John Houston.)

Выборочный анализ андийских рассолов, вес.%%

Table 10.2 Partial analysis of Andean brines. All figures are wt%. (Compiled by the author from published information.)

Salar name	Salar de Atacama	Salar de Atacama	Salar de Atacama	Salar de Hombre Muerto	Salar de Hombre Muerto	Salar de Rincon	Salar de Olaroz	Salar de Cauchari	Salar de Uyuni**	Salar de Diablillos
Company	Chemetall	SQM	SQM	FMC	Lithium One	Rincon Lithium	Orocobre	Lithium Americas Corp	Comibol	Rodinia
		(MOP)*	(SOP)*							
K	1.8	2.97	1.49	0.617	0.62	0.656	0.477	0.57	0.72	0.517
Li	0.147	0.305	0.11	0.062	0.057	0.033	0.057	0.064	0.045	0.046
Mg	0.96	1.53	0.82	0.085	–	0.303	–	–	0.65	–
Ca	0.031	0.04	0.02	0.053	–	0.059	–	–	0.046	–
SO ₄	1.46	0.88	2.19	0.853	–	1.015	–	–	0.85	–
B	0.058	0.065	0.068	0.035	–	0.04	–	–	0.02	–
Mg/Li	6.53	5.02	7.45	1.37	2.19	9.29	2.4	2.34	18.6	3.68

K, potassium; Li, lithium; Mg, magnesium; Ca, calcium; SO₄, sulphate; B, boron.

Notes:

*MOP & SOP analyses are in respect of the feed to the potassium chloride/lithium chloride pond system and the potassium sulfate/boric acid pond systems

**Initial production from the Salar de Uyuni will probably commence from an area with a lithium grade of approximately 0.15% Li containing an estimated 400,000 tonnes Li

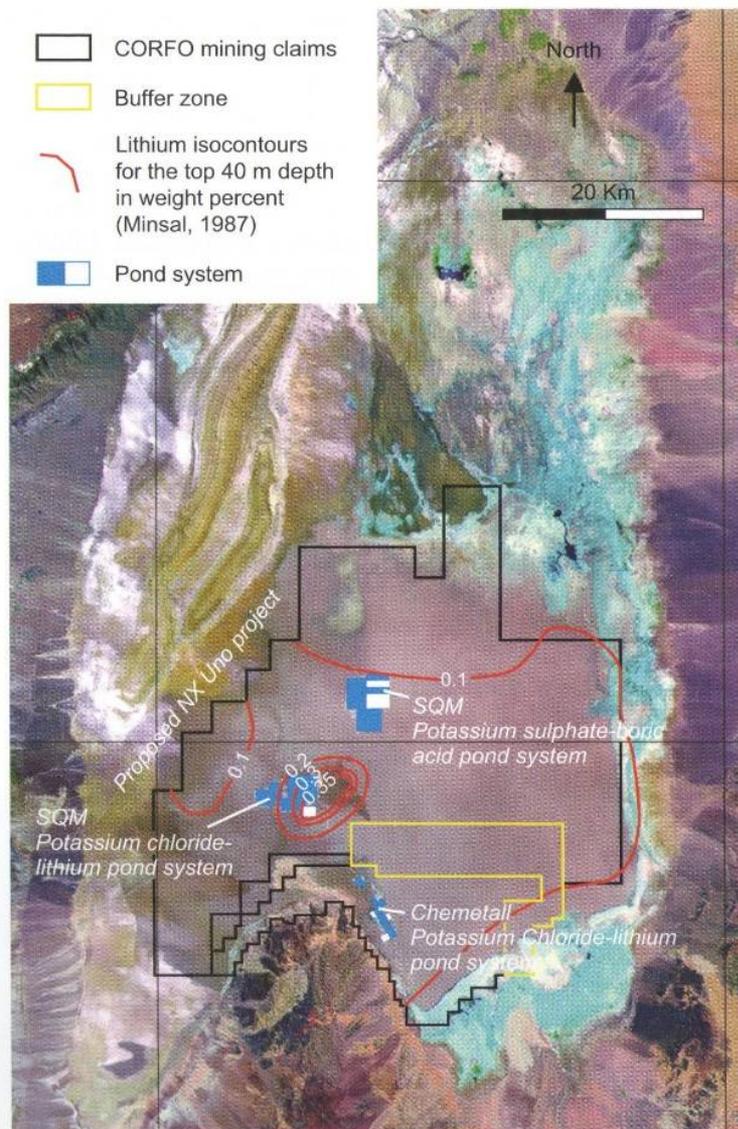


Figure 10.3 Landsat 7 ETM+ image of the Salar de Atacama showing the outline of the mining claims held by SQM and Chemetall, together with the buffer zone between these claims and the lithium isocontours in red. Background is Landsat 7 ETM+, December 2001 (ETM+, Enhanced Thematic Mapper Plus). (Compiled by John Houston.)

Снимок салара
Атакама:
оконтурены
заявочные
площади ряда
горнорудных
компаний;
красные линии –
изоконцентрации
лития



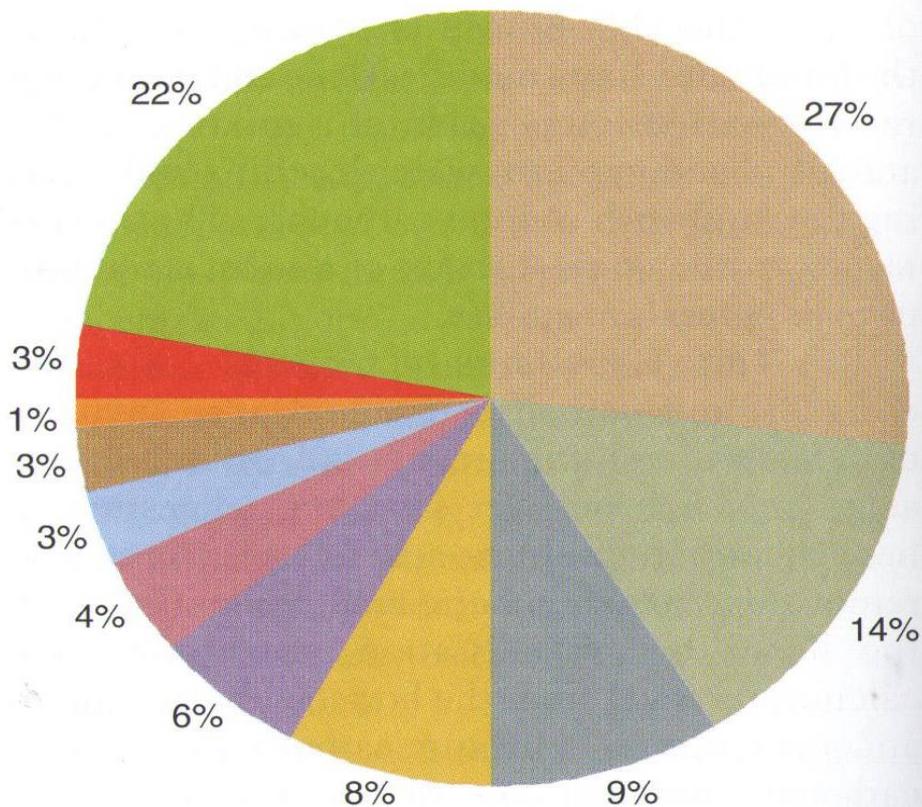
Figure 10.4 C3 Pit at the Greenbushes pegmatite in Western Australia, the world's leading source of spodumene.
(Photograph courtesy of Talison Lithium Ltd.)

СЗ карьер
пегматитового
месторождения
Гринбушес в
Западной
Австралии –
ведущий
мировой
источник
сподумена
 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$

Система прудов солнечного испарения в Салар де Атакама, занимающая площадь, эквивалентную 7000 футбольных полей и превышающую 30 км²



Figure 10.5 SQM's solar evaporation pond system at the Salar de Atacama covering an area equivalent to 7000 football pitches and in excess of 30 km². (Photograph courtesy of Sociedad Quimica y Minera de Chile S.A. (SQM).)



Области ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХИМИКАТОВ ЛИТИЯ

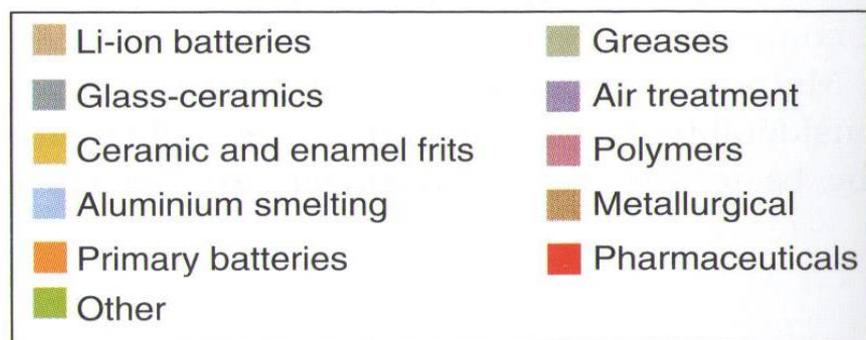


Figure 10.6 Lithium chemical uses, 2010. (Data from Roskill Information Services Ltd, personal communication.)

Авторская оценка мировых ресурсов ЛИТИЯ

Table 10.3 Estimated world lithium resources compiled by the author based on previous work and published sources.

	Tonnes Li
Pegmatites	
North Carolina, USA *undeveloped	2,600,000
Manono, *D.R. Congo	2,300,000
Greenbushes, Australia (Talison)	1,500,000*
Russia, numerous	1,000,000
China, numerous	750,000*
Canada, others	430,000
North Carolina, USA (Former Operations)	230,000
Quebec Lithium, Canada (Canada Lithium)	230,000
Whabouchi, Canada (Nemaska)	187,000
Karalpa, Austria (E. Coast Minerals)	134,000
Lithium One, Canada (James Bay)	130,000
Mibra, Brazil (CIF Mineracao)	100,000
Mount Marion, Australia (Reed)	93,500
Mount Cattlin, Australia (Galaxy)	90,000*
Brazil, other	85,000
Bikita, Zimbabwe	56,700*
Lantiar, Finland (Keliber Oy)	14,000
Total Pegmatites	9,930,000*
Continental Brines	
Salar de Uyuni, Bolivia (Comibol)	8,900,000
Salar de Atacama, Chile (SQM & Chemetall)	6,900,000*
China & Tibet, numerous	2,600,000*
Salar de Cauchari, Argentina (Lithium Americas)	1,520,000
Salar de Rincon, Argentina (Rincon Lithium)	1,400,000*
Salar de Olarez, Argentina (Orocobre)	1,200,000
Sal de Vida, Argentina (Lithium One)	1,020,000
Salar de Hombre Muerto, Argentina (FMC)	850,000*
Salar de Diablillos, Argentina (Rodinia)	530,000
Salar de Maricunga, Chile	200,000
Silver Peak, Nevada, USA (Chemetall)	40,000*
Total Continental Brines	25,160,000*
Others	
<i>Hectorite</i>	
Kings Valley, U.S.A (Western Lithium)	2,000,000
La Ventana, Sonora, Mexico (Bacanora)	180,000
<i>Geothermal Brines</i>	
Brawley, California (Simbol)	1,000,000
<i>Jadarite</i>	
Jadar, Serbia (Rio Tinto)	950,000
<i>Oilfield Brines</i>	
Smackover Formation, U.S.A (Albermarle)	850,000
Total Others	4,980,000
Total Overall	40,070,000

*Adjusted for mining losses

*Includes reserves at producing operations (where published)

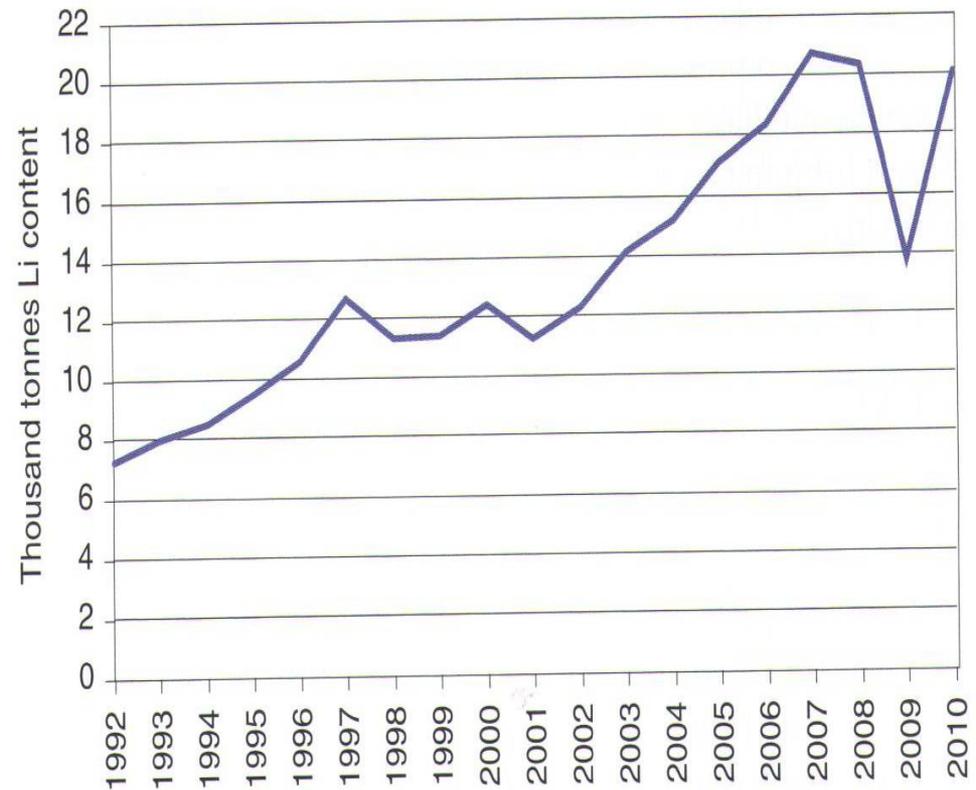
Секущее тело сподуменовых пегматитов Вабучи во вмещающих породах (район Джеймс Бэй, Квебек, Канада)



Figure 10.7 The Whabouchi spodumene pegmatite cutting through host rocks in the James Bay region, Quebec, Canada. (Photograph courtesy of Nemaska Lithium Inc.)

Мировая ежегодная добыча лития 1996 - 2010

Figure 10.8 Worldwide annual production of lithium 1996-2010 (Li content). (Data from World Mineral Statistics Database, British Geological Survey.)



Литий добывающие страны, 2010

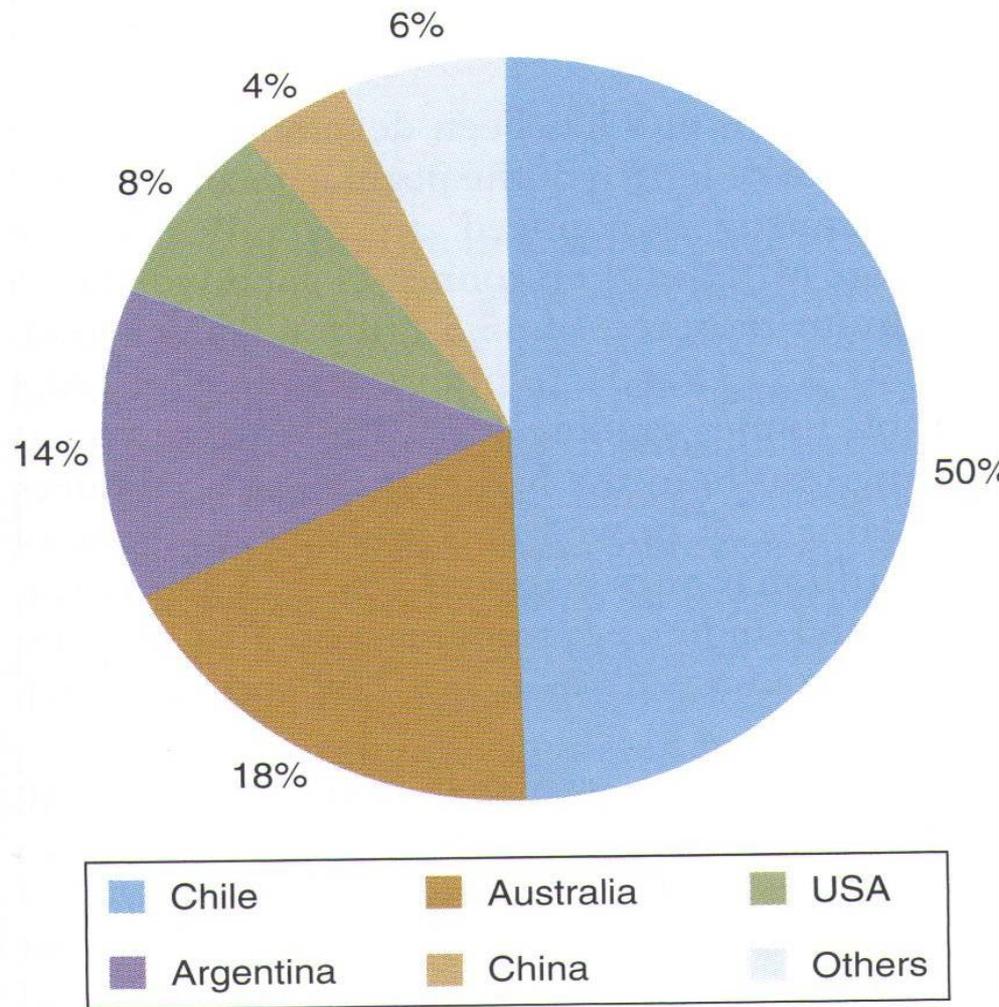
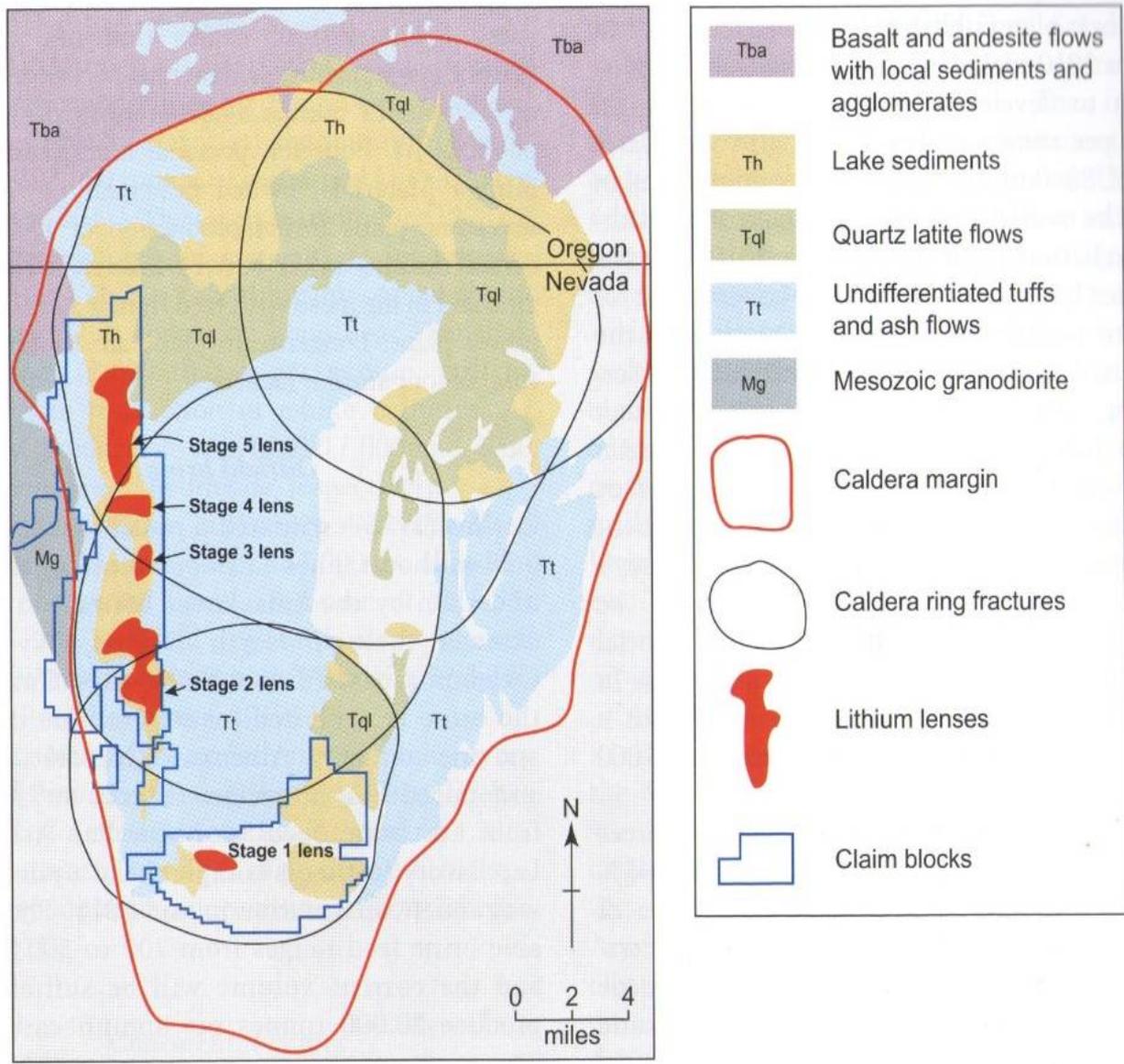
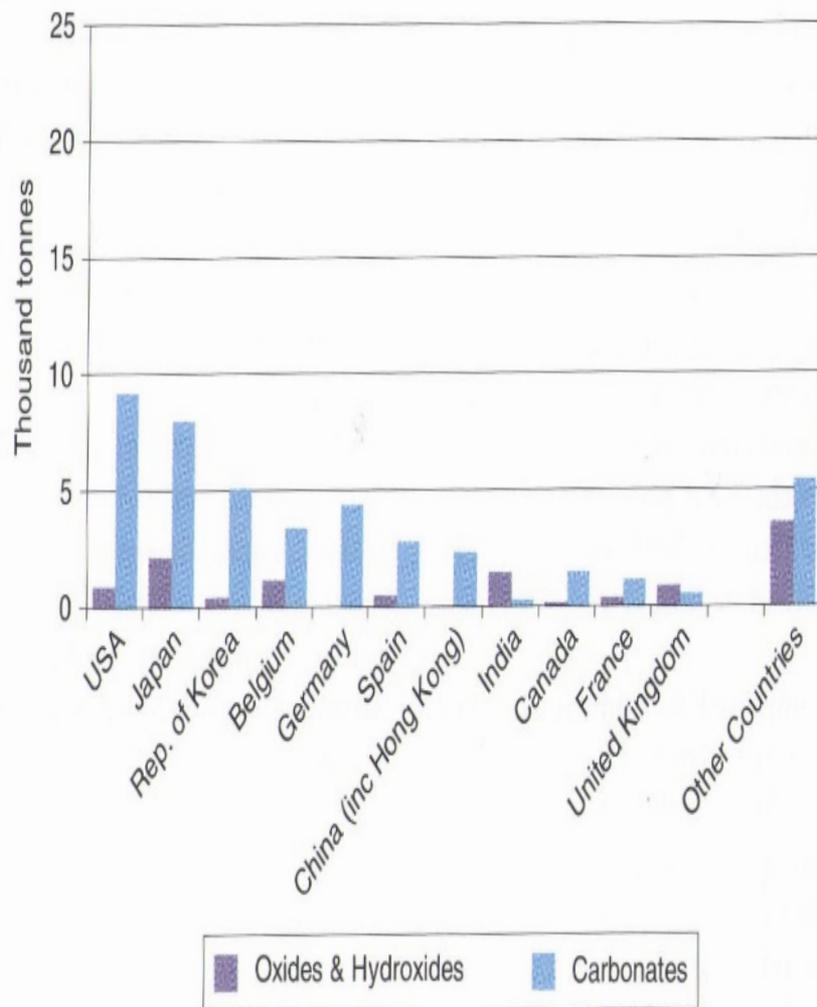


Figure 10.9 Lithium producing countries 2010 (based on tonnes Li content). (Data from British Geological Survey, 2012.)



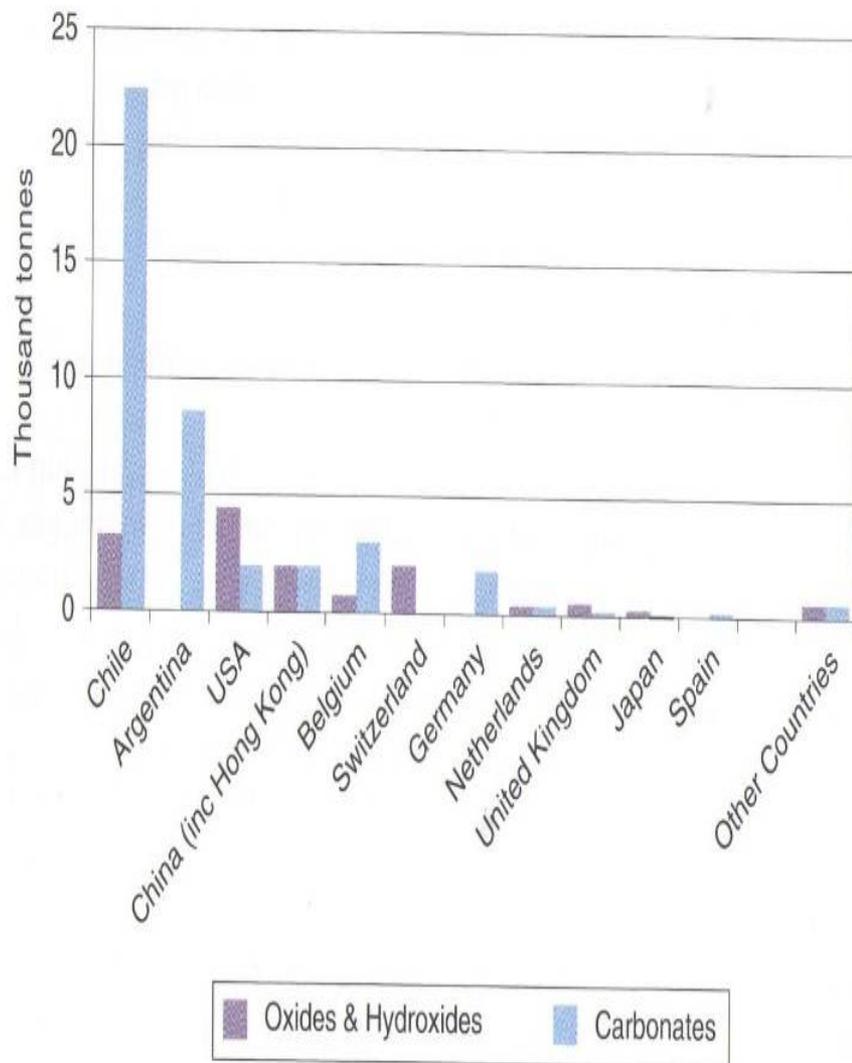
Геологическая карта района Кингз Вэлли с пятью линзами глин, обогащенных гекторитом – $\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$

Figure 10.10 Geological map of Kings Valley showing the five hectorite-rich clay lenses. (Modified from Chmelauskas, 2010.)



Главные
 страны-
 импортеры
 карбоната,
 оксидов и
 гидроксидов
 лития в 2009
 г.

Figure 10.11 The main importing countries for lithium carbonate, oxides and hydroxides, 2009. (Data from British Geological Survey World Mineral Statistics database and UN Comtrade, 2013.)



Главные
 страны-
 экспортеры
 карбоната,
 оксидов и
 гидроксидов
 лития в 2009 г.

Figure 10.12 The main exporting countries for lithium carbonate, oxides and hydroxides, 2009. [Data from British Geological Survey World Mineral Statistics database and UN Comtrade, 2013.]

Table 10.4 Lithium chemical production capacities in 2010. (Data from Solminihac, 2010.)

Company	Country	Source	Tonnes LCE
<i>Continental</i>			
<i>Brines</i>			
SQM	Chile	Atacama	40,000
Chemetall	Chile	Atacama	38,000
	Nevada	Silver Peak	
FMC	Argentina	Hombre Muerto	17,500
CITIC	China	Taijinaer L	5000
QLL	China	Taijinaer L	2000
Tibet	China	Zhabuye L	2500
<i>Pegmatites</i>			
ABA	China	Maerkang	2500
Jianxi	China	Ningdu	2000
Minfeng	China	Maerkang	2000
Ni & Co	China	Maerkang	5000
XLP	China	Kekeluhai / Talison	5500
Panasia	China	Talison	4000
Tianqi	China	Talison	9500
CBL	Brazil	Cachoeira	2300
Total			137,800

Объемы
производства
литиевой
химической
продукции в
2010 г

РАСШИРЕННОЕ
ПРОИЗВОДСТВО
И НОВЫЕ
ПРОЕКТЫ
(АВТОРСКИЕ
ДАНИЕ
ПО
ОПУБЛИКОВАННЫМ
МАТЕРИАЛАМ)

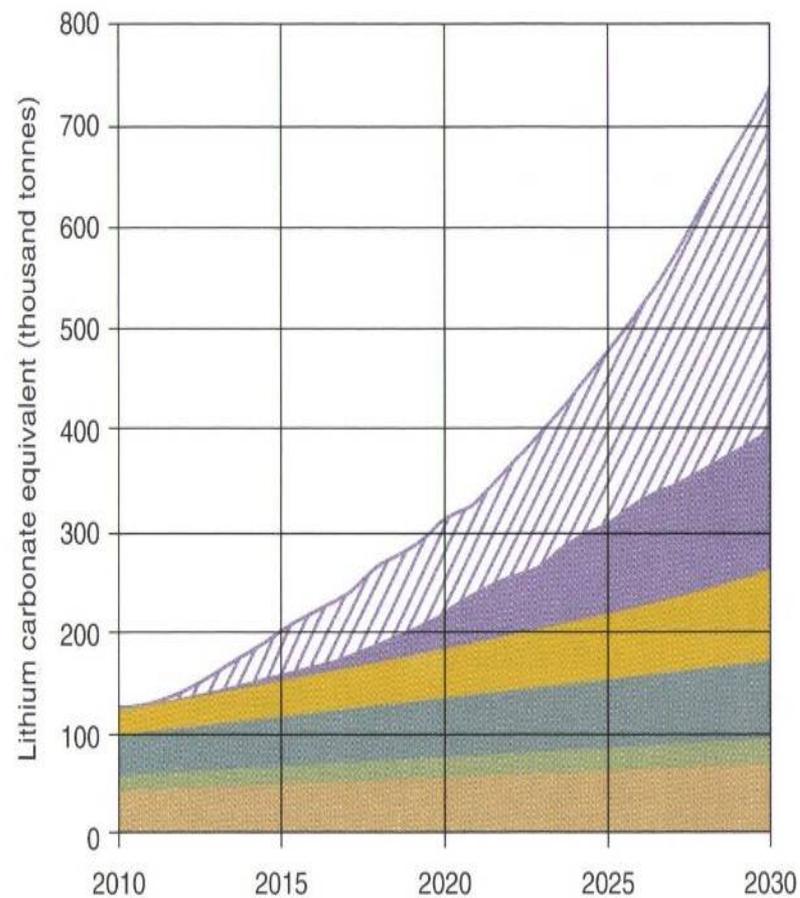
Table 10.5 Expanded production and new projects.
(Compiled by the author from published sources.)

	Tonnes LCE
Continental Brines	
FMC, Hombre Muerto, Argentina	5500 Expansion
Chemetall, Atacama (Chile) & Silver Peak (Nevada)	12,000–27,000 Expansion
SQM, Atacama, Chile	20,000 Expansion
Chinese brine expansion	?
Zong Chuan, China	5000
Orocobre, Olaroz, Argentina	16,400
Sentient, Rincon, Argentina	15,000
Lithium Americas, Cauchari, Argentina	20,000–40,000
Lithium One, Sal de Vida, Argentina	25,000
Rodinia, Diablillos, Argentina	15,000–25,000
Comibol, Uyuni, Bolivia	20,000
Pegmatites	
Talison, Greenbushes, Australia	83,000*
Galaxy, Mount Catlin, Australia/ China	21,000
Reed Resources, Mt. Marion, Australia	19,000**
Altura, Pilgangoora, Australia	19,000**
Canada Lithium, Quebec, Canada	20,000
New & Expansions, China	11,000
Keliber Oy, Finland	6500
Nemaska, Quebec, Canada	30,000**
Lithium One/Galaxy, Quebec, Canada	?
Geothermal Brine	
Simbol, Salton Sea, USA	16,000
Oilfield Brine	
Albermarle, Arkansas, USA	20,000
Hectorite	
Western Lithium, Kings Valley, USA	13,000–27,700
Bacanora, La Ventana, Mexico	35,000
Jadarite	
Rio Tinto, Jadar, Serbia	27,000***
TOTAL (excluding Lithium One/ Galaxy and major Chinese brine expansions)	455,400–515,100

*Assumes 90% of estimate production is converted to carbonate at 85% recovery

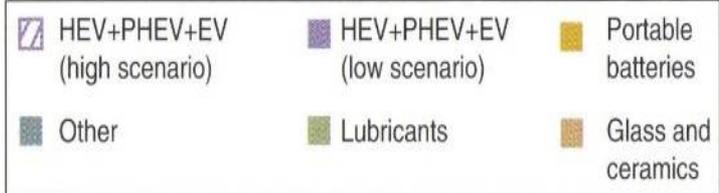
**Assumes concentrate production is converted to carbonate at 85% recovery

***Not announced. Potential estimate if mined at 1.0 million tpa



Прогноз
потребности в
литии
до 2030 г.
(два различных
сценария)

Figure 10.13 Forecast of the demand for lithium to 2030, with two different scenarios relating to the uptake of electric vehicles. (Courtesy of Rockwood Lithium.)



Critical Metals Handbook

Edited by

Gus Gunn

British Geological Survey

Keyworth

Nottingham

UK

5. Beryllium

David L. Trueman¹ and Phillip Sabey²

¹ Consulting Geologist, Richmond, British Columbia, Canada

² Manager, Technology and Quality, Materion Natural Resources, Delta, Utah, USA

Table 5.1 Selected properties of beryllium.

Property	Value	Units
Symbol	Be	
Atomic number	4	
Atomic weight	9.01	
Density at 25°C	1846	kg/m ³
Melting point	1287	°C
Boiling point	2475	°C
Hardness (Mohs scale)	5.5	
Specific heat capacity at 25°C	1.82	J/(g °C)
Latent heat of fusion	1350	J/g
Coefficient of linear thermal expansion	11.5×10^{-6}	/°C
Thermal conductivity	210	W/(m °C)
Electrical resistivity at 25°C	0.38	$\mu\Omega$ m
Young's modulus	287	GPa
Mass magnetic susceptibility	1.26×10^{-8}	m ³ /kg
Brinell hardness	600	MN/m ²

Некоторые свойства бериллия

Потребление бериллия в секторе конечного использования, 1999 - 2011

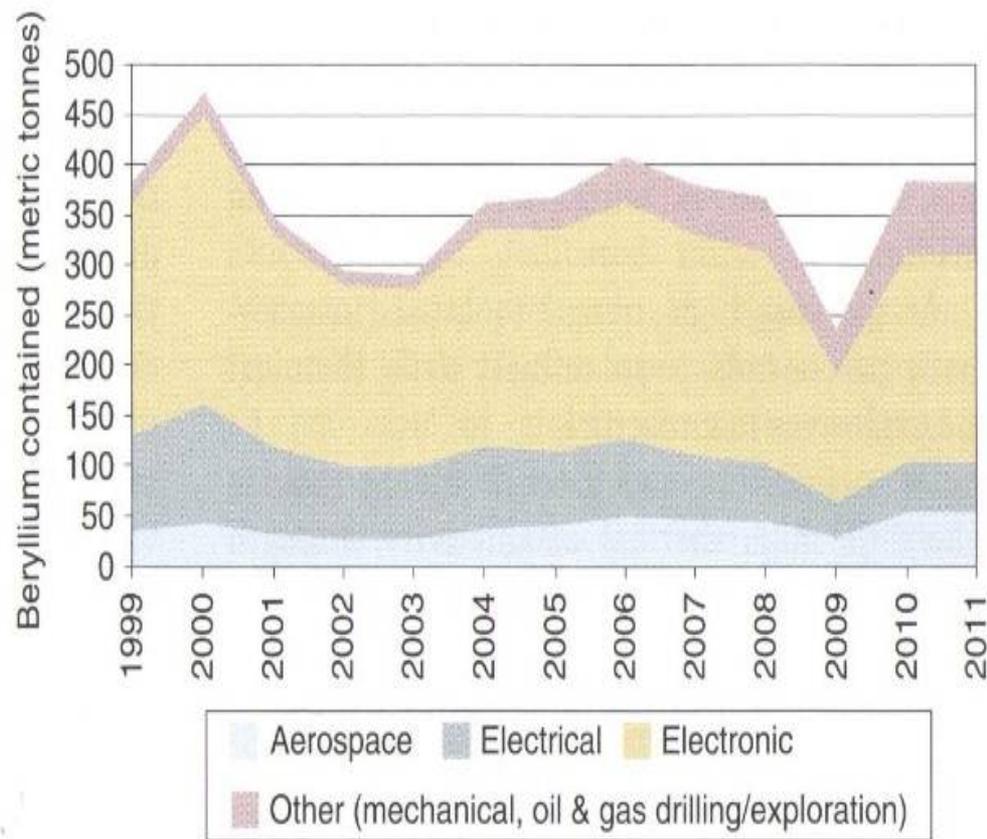


Figure 5.1 Consumption of beryllium by end-use sector, 1999–2011. (Data from BeST, 2012a.)

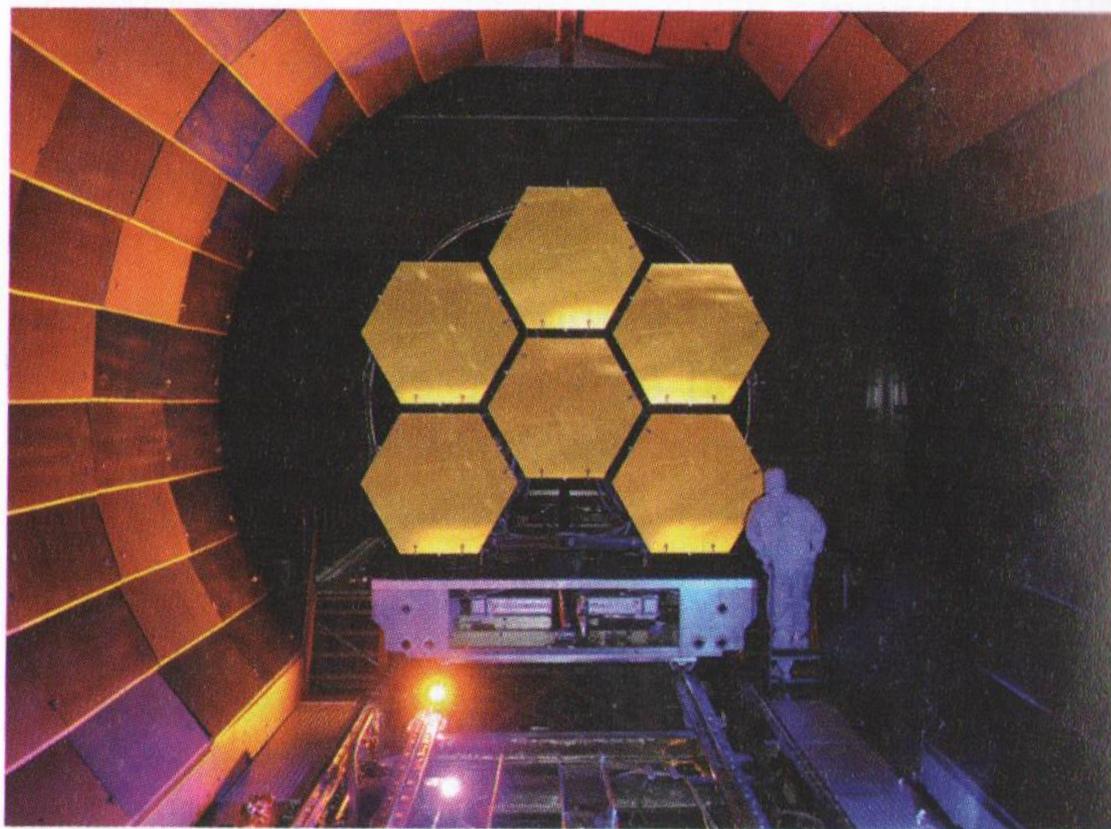


Figure 5.2 Six of the 18 mirrors of the James Webb space telescope undergoing cryogenic testing at the Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama, USA. (Photo: K. Hutchison, courtesy of Ball Aerospace and Technologies Corp.)

Шесть из 18
зеркал
космического
телескопа
Джеймс Вэбб,
подвергнутые
криогенному
тестированию

Оценка глобального производства бериллия по регионам из всех источников в 2011 г.

Table 5.2 Estimated global production of beryllium from all sources by region in 2011 (Source: Beryllium Science and Technology Association, 2012a.)

	USA, Japan and Kazakhstan (a) kilograms	China (b) kilograms	Others (b) kilograms	Total kilograms
Be contained in metal >60% Be content	43,000	5000	1500	49,500
Be contained in alloys <60% Be content	283,000	59,000	5000	347,000
Be contained in BeO ceramics	2500	1000	0	3500
Total Be contained in all products produced in 2011	328,500	65,000	6500	400,000

(a) Total aggregated by an independent auditor from data provided by BeST members.

(b) Estimates.

Глобальное годовое рудничное производство бериллия за период 1992 – 2010 гг.

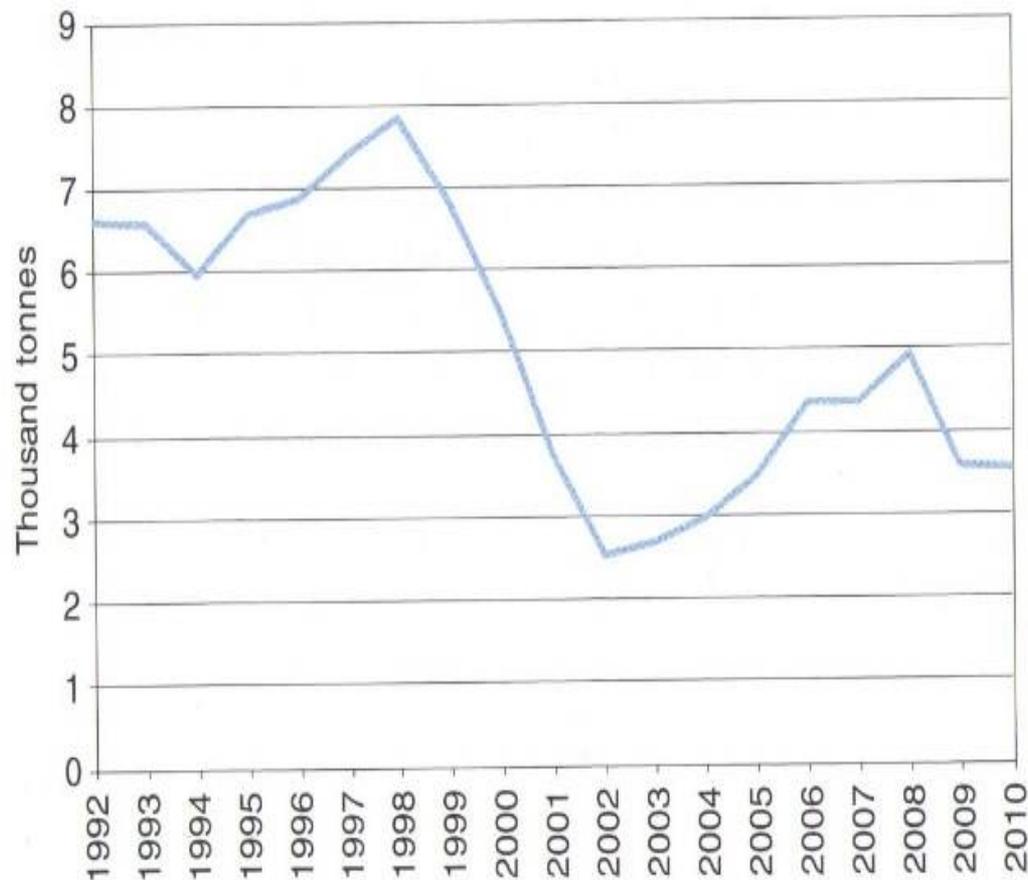


Figure 5.3 Global annual mine production of beryl for the period 1992–2010 (production from bertrandite ore is calculated as equivalent to beryl containing 11% beryllium oxide). (Data from British Geological Survey, 2012.)

Глобальный импорт бериллия по странам в 2009 г.

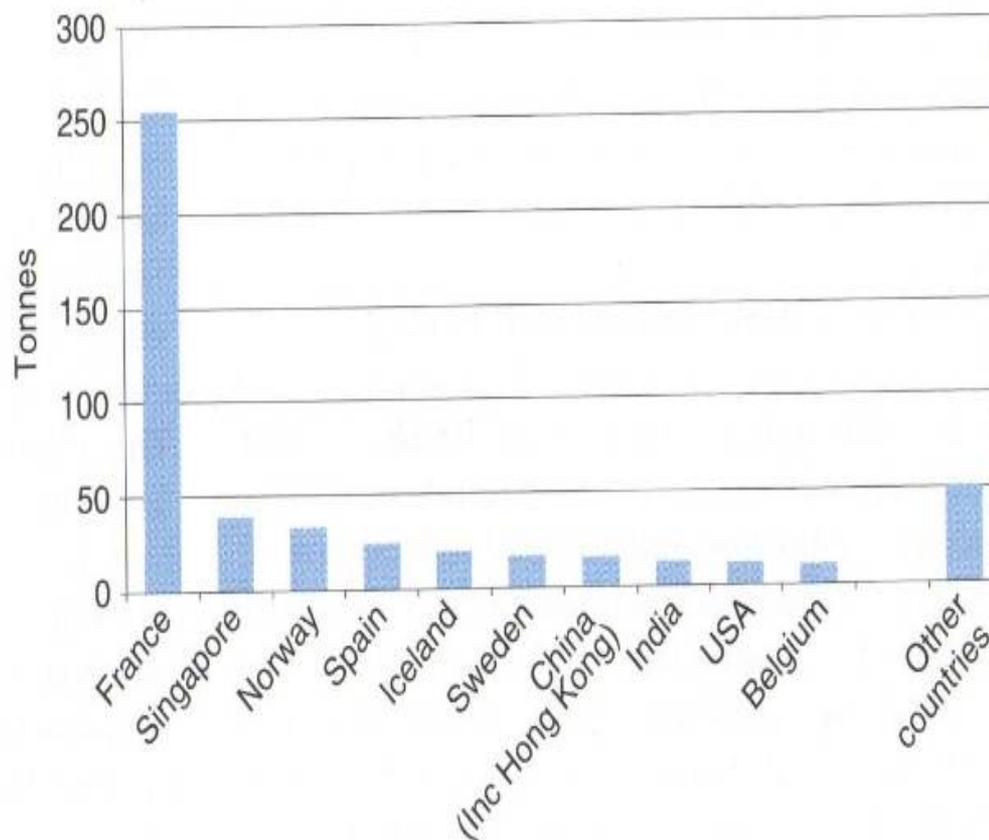


Figure 5.5 Global imports of beryllium by country in 2009. The data are shown in terms of contained beryllium metal in ores, concentrates and scrap. (Data from UN Comtrade, 2013.)

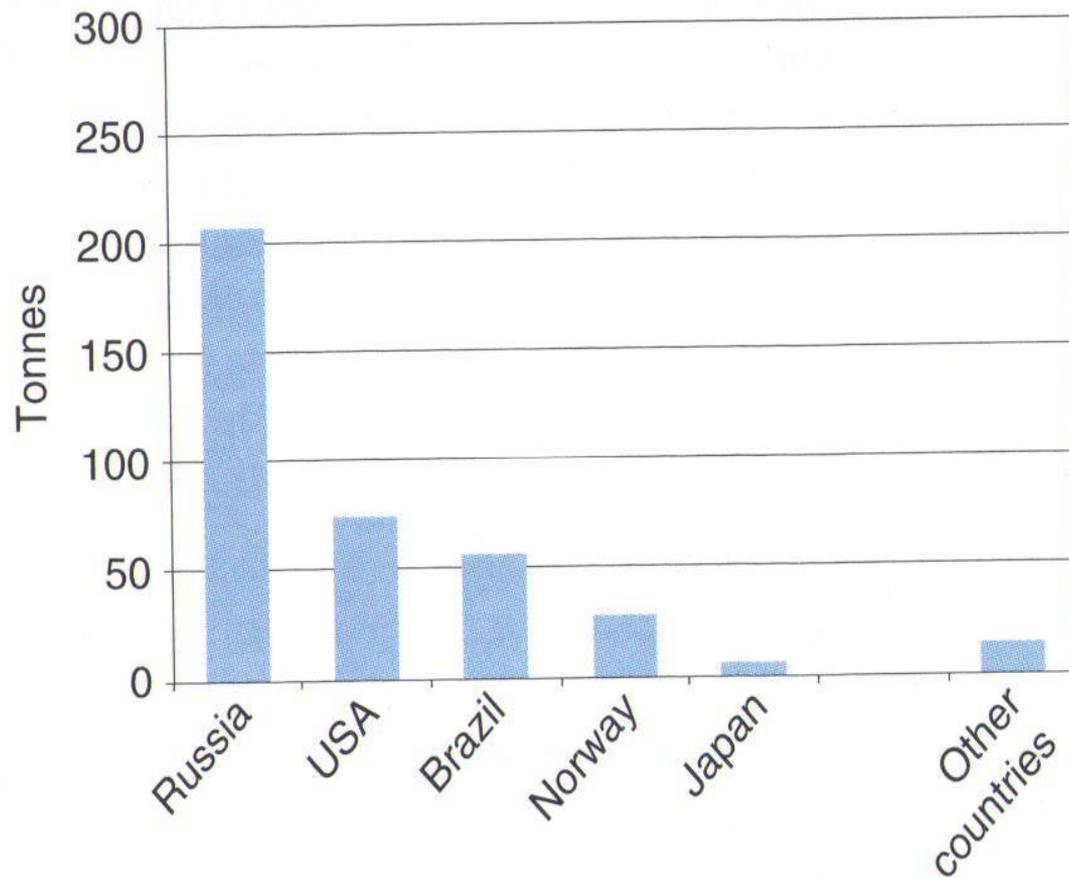


Figure 5.4 Global exports of beryllium by country in 2009. The data are shown in terms of contained beryllium metal in ores, concentrates and scrap. (Data from UN Comtrade, 2013.)

Глобальный
экспорт
бериллия
по странам
в 2009 г.

Table 5.3 Published beryllium resources (as beryllium oxide, BeO). (After Sabey, 2006.)

Deposit(s)	Location	Resource, tons BeO	Grade, % BeO
Various	North Carolina, USA	122,800	0.05
Spor Mountain	Utah, USA	72,315*	0.71
McCullough Butte	Nevada, USA	47,000	0.027
Various	Brazil	42,000	0.04
Strange Lake	Canada	42,000	0.08
Aqshatau	Kazakhstan	16,000	0.03–0.07
Thor Lake	Canada	13,300	0.76
Various, Black Hills	South Dakota, USA	13,300	na
Sierra Blanca	Texas, USA	11,300	>2.0
Lost River	Alaska, USA	>10,000	0.3–1.75
Yermakovskoye	Russia	>10,000	1.3
Seal Lake	Canada	6800	0.35–0.40
Gold Hill	Utah, USA	>5000	0.5
Tanco	Canada	1800	0.20
Boomer	Colorado, USA	<1000	2.0–11.2
Hellroaring Creek	Canada	<1000	0.10
Iron Mountain	New Mexico, USA	<1000	0.2–0.7
Mount Wheeler	Nevada, USA	<1000	0.75

*Remaining reserves 2004

Опубликован ные ресурсы оксида бериллия (BeO)

Table 5.4 Selected beryllium minerals and their compositions. Those of current economic importance, bertrandite and beryl, are in bold.

Mineral	Formula	BeO content (wt %)
Bromellite	BeO	98.02
Behoite	Be(OH) ₂	58.13
Hambergite	Be ₂ (BO ₃)(OH)	53.5
Phenacite	Be ₂ SiO ₄	45.5
Bertrandite	Be₄Si₂O₇(OH)₂	39.6–42.6
Moraesite	Be ₂ (PO ₄)(OH)4H ₂ O	25–28
Hurlbutite	CaBe ₂ (PO ₄)	21.3
Berylonite	NaBe(PO ₄)	19–20
Chrysoberyl	BeAl ₂ O ₄	19.8
Euclase	BeAl(SiO ₄)(OH)	17.0–21.8
Herderite	CaBe(PO ₄)(OH,F)	15–16
Barylite	BaBe ₂ (Si ₂ O ₇)	16
Beryl	Be₃Al₂Si₆O₁₈	11.0–14.3
Helvite	Mn ₈ (BeSiO ₄) ₆ S ₂	11–14.2
Danylite	Fe ₈ (BeSiO ₄) ₆ S ₂	12.7–14.7
Genthelvite	Zn ₈ (BeSiO ₄) ₆ S ₂	12.6
Eudidymite	Na(BeSi ₃ O ₇)(OH)	10.5–11.2
Gadolinite	(Y,Ca) ₂ Fe(BeSiO ₄) ₂ (O,OH) ₂	5.5–12.9

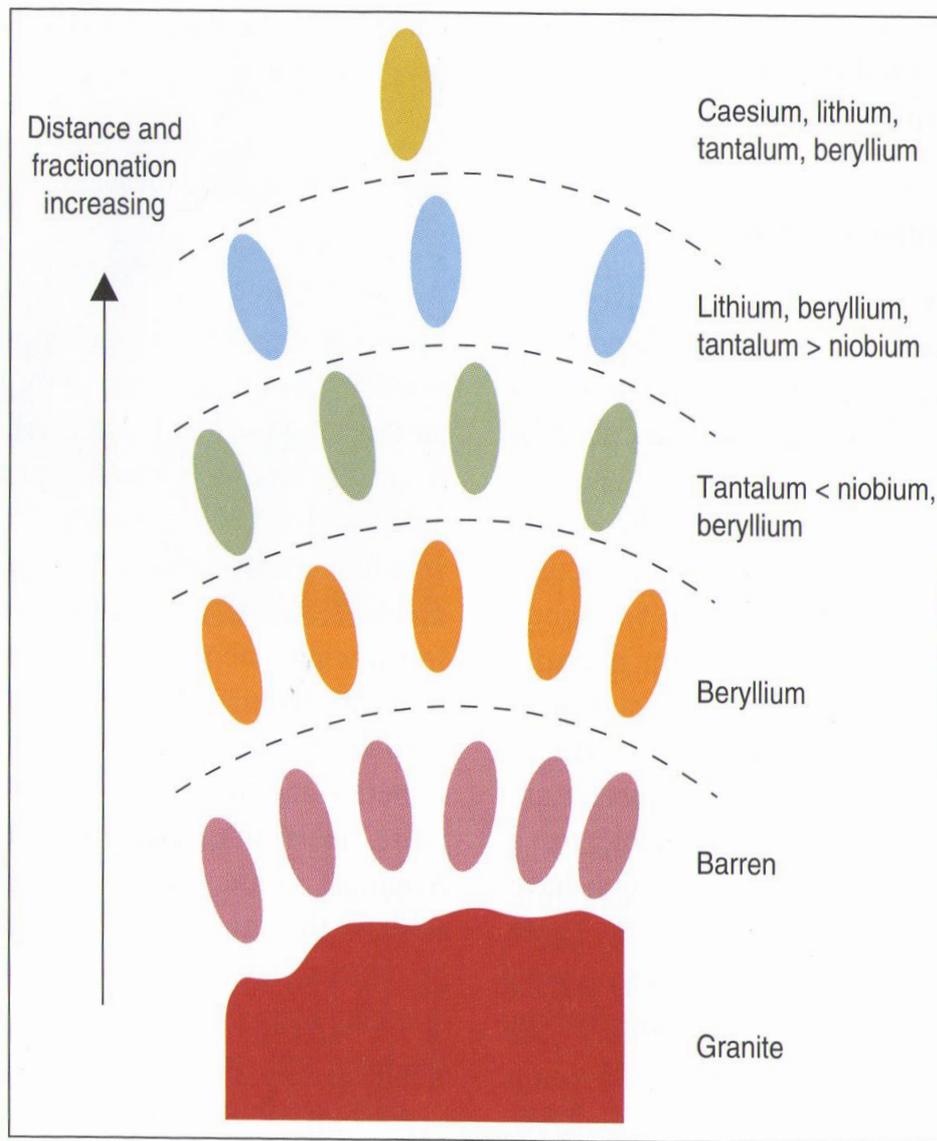
Отдельные
минералы
бериллия и их
состав
(жирно
выделены
экономически
важные
берtrandит и
берилл)



Figure 5.6 The global distribution of significant deposits of beryllium. Some of the symbols on the map represent a single important deposit or resource, while others represent a cluster of deposits in one area or region.

Глобальное распределение значимых месторождений бериллия





Зональное распределение редких элементов в полях пегматитов

Figure 5.7 Rare-element zoning in pegmatite fields. (After Trueman and Černý, 1982.)



Действующий
карьер
Материон Бреш
месторождения
Спур Маунтин
(Юта, США)

Figure 5.8 Materion Brush open-pit mining at Spor Mountain, Utah. (Courtesy of Materion Corp.)

Производство
гидроксида
бериллия
из берtrandита
 $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ и
берилла
 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

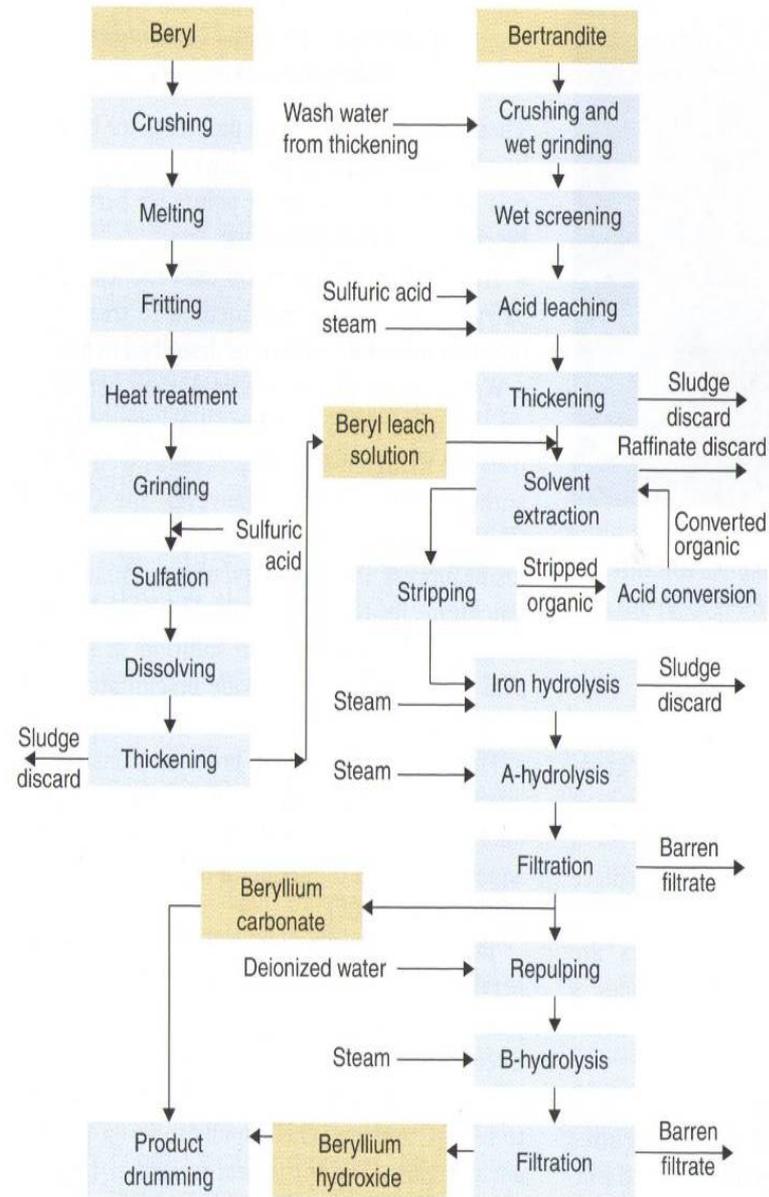


Figure 5.9 Beryllium hydroxide production from bertrandite and beryl. (Source: Materion Corp.)

Производство металлического бериллия

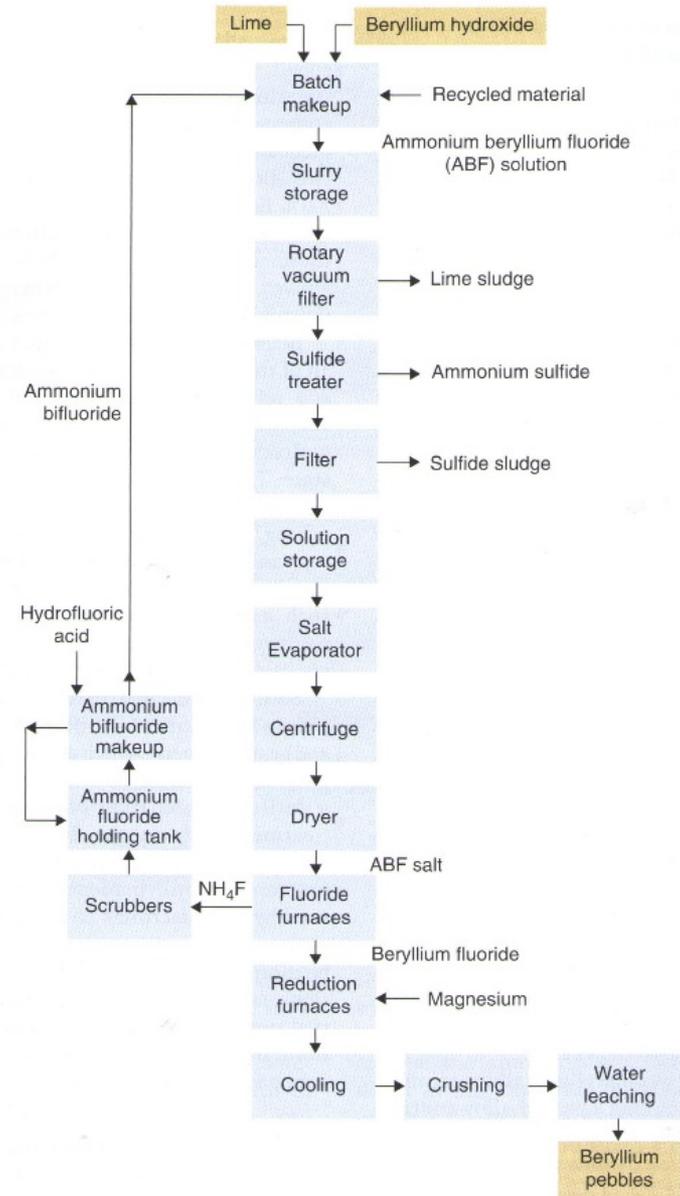


Figure 5.10 Production of beryllium metal [Source: Materion Corp.]

Финальная
очистка,
помол и
сортировка
по крупности
бериллиевого
порошка

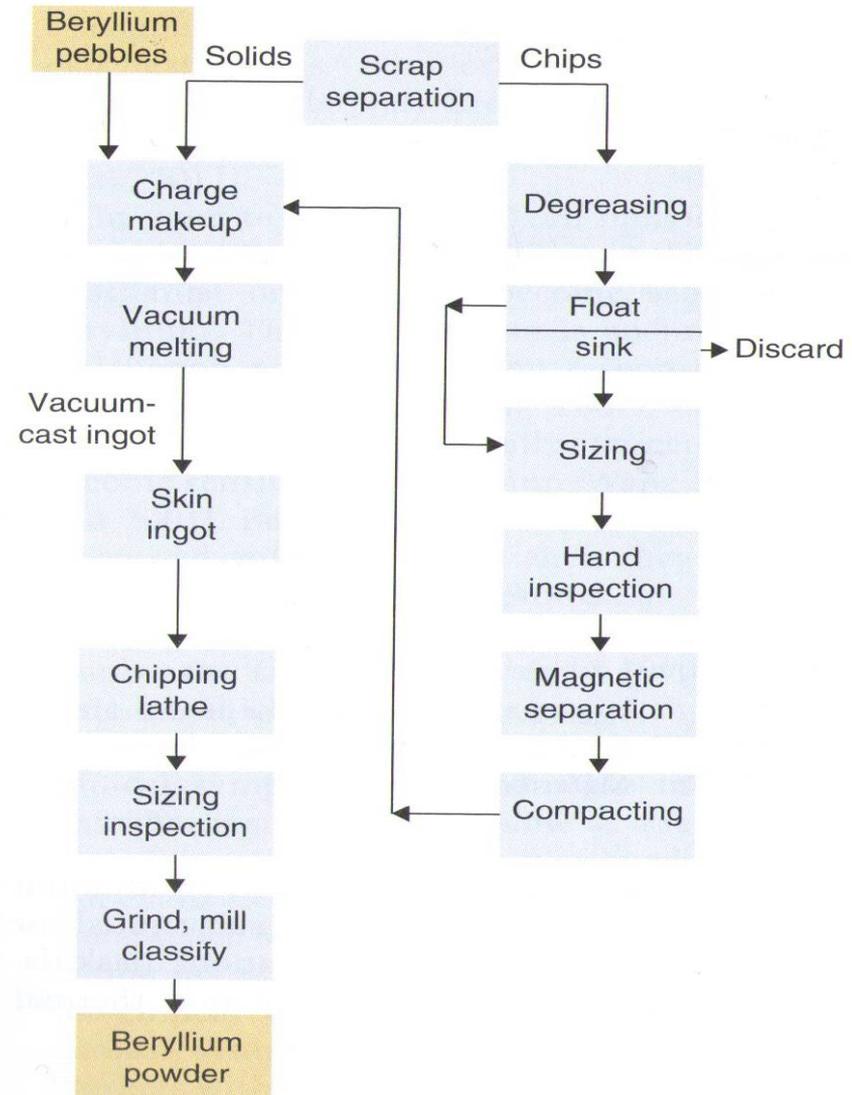


Figure 5.11 Final purification, grinding and sizing of beryllium powders. This is also a starting point for beryllium recycling. (Source: Materion Corp.)

Схема производства бериллиевой соли и оксида бериллия

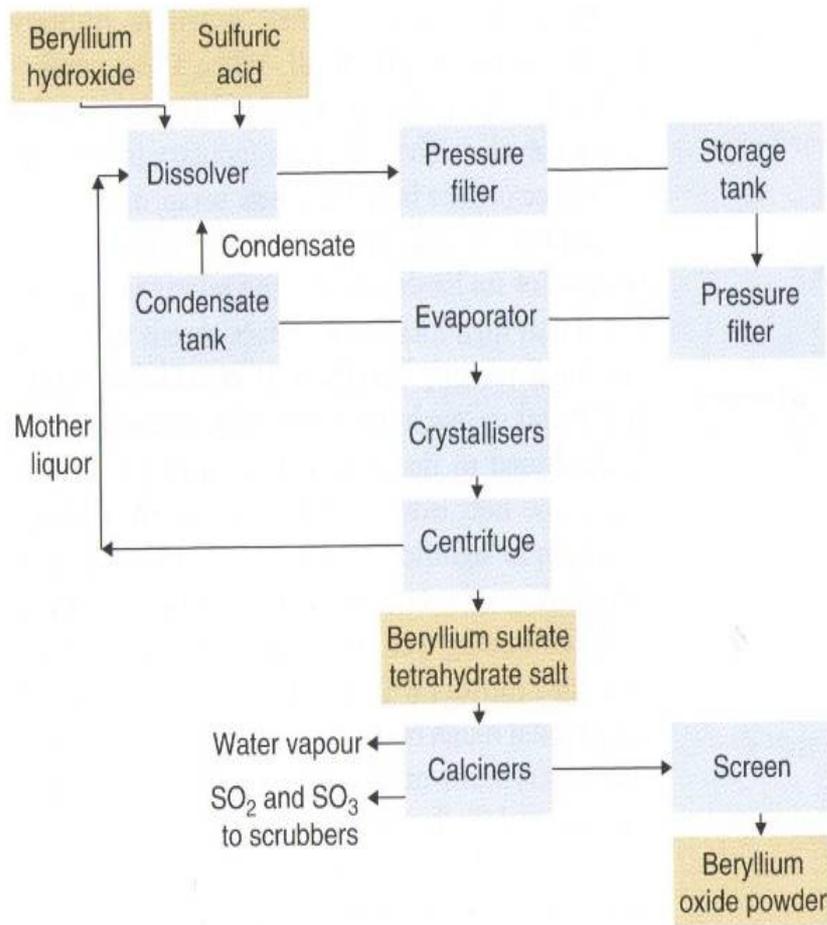


Figure 5.12 Flow sheet for production of beryllia or beryllium oxide. (Source: Materion Corp.)

Среднегодовая оценка медно-бериллиевого сплава на фунт содержания бериллия)

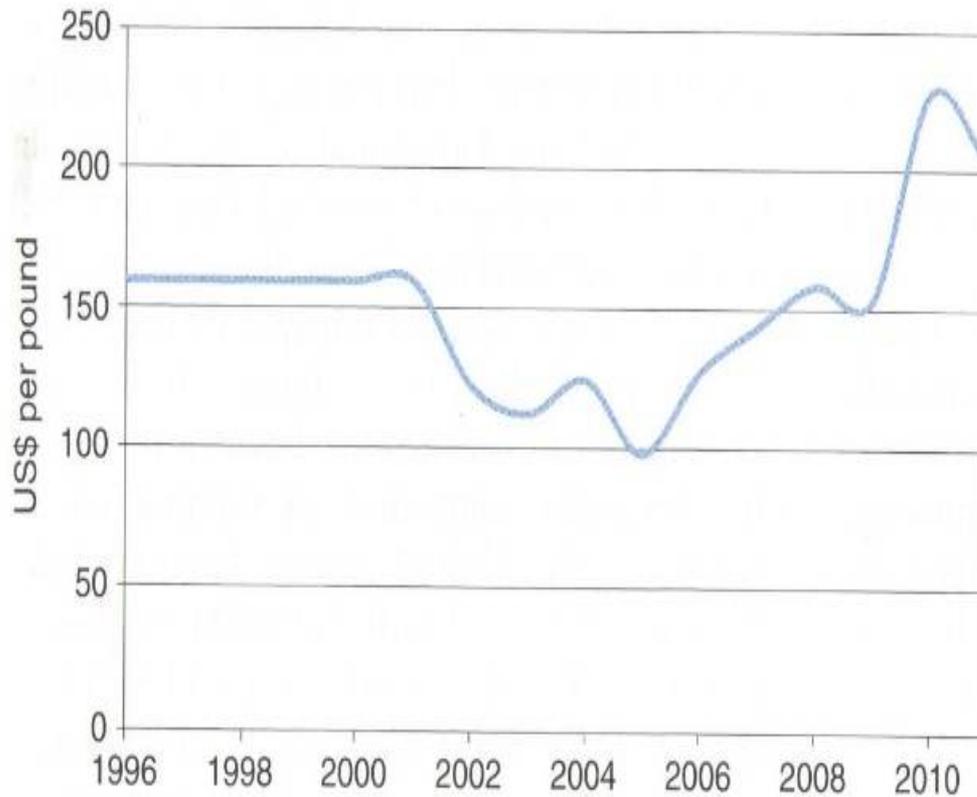


Figure 5.13 Annual average value of copper-beryllium alloy, per pound of contained beryllium, 1996-2011. (Compiled from USGS annual Mineral Commodity Summaries for beryllium from 1996-2012; and Cunningham, 1999.)

Спасибо
за внимание!

