

ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ГЕНЕЗИСА МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЕРИЛЛИЯ РАЗНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ

И.И.Куприянова

ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского, г. Москва

На основе опубликованных и вновь полученных данных о геологических и геохимических факторах формирования бериллиевых месторождений предложена новая, частично дискуссионная, интерпретация истории и условий развития бериллиевого оруденения разнообразных генетических и промышленных типов. Сравнивается относительное соотношение запасов BeO месторождений различных геолого-промышленных и генетических типов в России и в мире, анализируются причины установленных соотношений с учётом геохимических свойств бериллия, геолого-тектонической ситуации и корово-мантийного взаимодействия.

Ключевые слова: бериллий, месторождение, запасы, генезис, тектоника, кора, мантия.

Бериллий, обладающий уникальными свойствами, применяется во многих высокотехнологических отраслях производства – атомной, аэрокосмической, элетротехнической, электронной, автомобильной и др., и объём его потребления является показателем их уровня развития [10, 17]. Бериллий – лёгкий металл, характеризуется высокими отношениями прочности к весу, жаропрочностью, тугоплавкостью, теплопроводностью, удельной теплоёмкостью, модулем упругости, жёсткостью, коррозионной устойчивостью в химически агрессивных средах, а также очень низким коэффициентом теплового расширения. Он прозрачен для рентгеновских лучей, пропускает их в 17 и восемь раз лучше, чем алюминий и специальное линдemanовское стекло соответственно. Не имеют аналогов ядерные свойства бериллия и исключительно важны легирующие.

После спада производства в 90-е, в 2004–2013 гг. мировое производство и потребление бериллиевой продукции неуклонно растут [2]. В нашей стране также поставлена задача восстановления бериллиевой отрасли, что требует

дальнейшего решения геолого-генетических проблем формирования бериллиевого оруденения для уточнения прогнозно-поисковых признаков.

Миграция бериллия в земной коре и его концентрация в виде промышленных месторождений в первую очередь определяются геохимическими свойствами элемента, которые хорошо изучены [14, 25]. Бериллий – типичный литофильный элемент. Его среднее содержание в земной коре составляет 3,8 г/т и возрастает по мере увеличения кремнекислотности изверженных пород: в ультраосновных и габброноритах (<0,2 г/т), габбро (0,3 г/т), средних (0,8–0,9 г/т), кислых (1–32, среднее 5 г/т), щелочных (5–32, среднее 7 г/т). Основная масса бериллия в этих породах связана с его изоморфным вхождением в алюмосиликаты (преимущественно в плагиоклазы) благодаря кристаллохимическому сходству тетраэдрических групп $[\text{BeO}_4]^{6-}$ с $[\text{SiO}_4]^{4-}$ и $[\text{AlO}_4]^{5-}$ и параллельной заменой иона Na^+ на Ca^{2+} или REE^{3+} и Ti^{4+} .

Геохимическая миграция бериллия прежде всего связана с фтором, с которым он образует

весьма устойчивые комплексы $[\text{BeF}_4]^{2-}$, $[\text{BeF}_3]$, $[\text{BeF}_2]^0$, $[\text{BeF}]^+$ [7]. При повышении температуры и щёлочности комплексы легко гидролизуются до соединений $[\text{Be}(\text{OH})\text{F}]^0$, $[\text{Be}(\text{OH})_2\text{F}]^-$, в виде которых бериллий мигрирует. Фтор выполняет роль главного экстрактора бериллия при дифференциации гранитоидных магм и накоплении элемента в заключительных магматических фазах и флюидонасыщенной пегматитовой магме, а также его переносчика в постмагматических процессах [5]. Кроме того, в переносе бериллия могут участвовать фторкарбонатные комплексы [21]. В щелочных магмах накопление бериллия в последовательных магматических фазах происходит лишь в особых случаях, благодаря его интенсивному рассеянию в породообразующих и акцессорных минералах щелочных пород [3].

Известно более 100 собственно бериллиевых минералов [25], из которых 57 обнаружены в составе бериллиевых руд [24]. Три из них относятся к главным промышленным: берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ (12–14% BeO), берtrandит $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ (40–45% BeO), фенакит Be_2SiO_4 (42–45% BeO). Ввиду амфотерности бериллия в условиях повышенной щёлочности он входит в анионный каркас и образует бериллосиликаты: лейкофан $\text{CaNa}[\text{BeSi}_2\text{O}_6(\text{F},\text{OH})]$ (9,9% BeO), мелинофан $\text{Ca}(\text{Na},\text{Ca})[\text{BeSi}_2\text{O}_6(\text{F},\text{OH})]$ (9–10,5% BeO), эвидимит $\text{Na}_2[\text{Be}_2\text{Si}_6\text{O}_{15}]\text{H}_2\text{O}$ (9,5–10,0% BeO), миларит $\text{KCa}_2[\text{AlBe}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{30}]\text{H}_2\text{O}$ (4,5–6,5% BeO), которые в некоторых случаях приобретают промышленное значение [17]. Минералы, в составе которых Be может существенно рассеиваться в виде изоморфной примеси, – это везувиан (до 1–4% BeO) и бериллиевый маргарит (до 3%).

Все месторождения бериллия являются эндогенными. Литофильность металла и другие его геохимические свойства определяют региональную связь месторождений с областями развития гранитоидного магматизма разных формационных типов: известково-щелочных гранитных серий нормального ряда, завершающихся фазами лейкократовых и литий-фтористых гранитов, а также гранитоидных серий щелочного ряда, завершающихся фазами рибекитовых и эгириновых гранитов. Первые развиваются в структурно-геологических условиях тыловых орогенных зон, связанных с поясами

субдукции океанической коры или столкновения континентальных плит. Вторые характерны для анорогенной обстановки в связи с рифтовыми поясами и авлакогенами, заложенными на континентальной коре древних и молодых щитов и платформ.

Основные типы месторождений [24, 17] формировались в связи с интрузивными сериями трёх гранитоидных формаций – щёлочно-гранитоидной, субщёлочно-гранитовой литий-фтористой, гранит-лейкогранитовой нормального ряда [15] на протяжении всей геологической истории от протерозоя до миоцена (табл. 1). Со щёлочно-гранитоидными комплексами (включая вулканогенные фации) сопряжены гидротермальные уникально богатые месторождения берtrandит-фенакитовой (Ермаковское) и берtrandитовой (Спор-Маунтин) формаций, а также бериллиеносные кварц-полевошпатовые метасоматиты (Тор-Лейк, Перга, Урма). Нормальные, обычно лейкократовые, граниты продуцируют более разнообразные типы месторождений – грейзеновые разной морфологии и состава, скарново-грейзеновые и пегматитовые [15].

Промышленными источниками бериллия служат как его собственные месторождения, так и комплексные объекты, в которых он является важным попутным компонентом. Для собственно бериллиевых месторождений промышленное значение имеют берtrandит-аргиллизитовые (Спор-Маунтин), бериллиеносные полевошпатовые (Тор-Лейк, Пержанское), берилл-слюдяные, близкие к грейзенам (Боёвское, Малышевское, Боа-Виста), берtrandит-фенакит-флюоритовые (Ермаковское) метасоматиты. Среднее содержание BeO в рудах колеблется от 0,1 до 1,5%. Комплексные месторождения по формационной принадлежности относятся к пегматитам, грейзенам и скарнам [17].

Объём общих и подтверждённых запасов бериллия в мире весьма нестабилен и существенно изменяется по странам и континентам с течением времени (рис. 1, 2, табл. 2, 3). Географическое распределение мировых общих запасов неравномерное. В 2006–2008 гг. 61% запасов принадлежал Америке (из них 42% Бразилии, по 8% США и Аргентине), ~20% – Азии, 16% – Африке, 3% – Австралии. Западная Европа почти лишена бериллиевых руд. По данным

Общие вопросы геологии и металлогении

1. Систематика собственных и комплексных месторождений бериллия

Геолого-промышленные типы	$T_{\text{форм}}^{\circ}\text{C}$	Возраст	Примеры месторождений (содержание BeO, %)
<i>Фтористые риолиты и трахиты</i>			
I. Берtrandит-аргиллизитовые метасоматиты	200–120	KZ–MZ	Спор-Маунтин (0,72), Сьерра-Бланка (1,5–2) – США, Орот (0,25) – Россия
<i>Щелочные гранитоиды</i>			
II. Берtrandит-фенакит-флюоритовые метасоматиты	450–140	MZ	Ермаковское (1,3), Ауник (0,18), Амандак (0,41), Окунёвское (0,50) – Россия
III. Бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты	500–200	MZ–PR	Пержанское (0,54) – Украина, Тор-Лейк (0,76) – Канада, Урма, Убур-Ташир (0,18–0,44) – Россия
<i>Нормальные лейкократовые граниты</i>			
IV. Берилл-слюдяные грейзены и минерализованные зоны дробления	500–200	PZ	Малышевское (0,14), Снежное (0,90), Боёвское (0,12) – Россия, Редскин-Шток (2) – США, Боа-Виста (0,25) – Бразилия
V. Апокарбонатные (Be-Li-Rb-Cs)-флюоритовые грейзены	450–140	PZ	Вознесенское (0,06), Пограничное (0,247) – Россия
VI. Комплексные (Be-W-Mo-Sn)-кварцево-жильно-грейзеновые	600–200	MZ–PZ	Казыр (0,38) – Россия, Кара-Оба, Акча-Тау, Нура-Талды (0,02–0,3) – Казахстан
VII. Бериллий-полиметалл-оловорудные скарны	500–150	PR	Укса, Хопунвара (0,1–0,8) – Россия, Лост Ривер (0,3–1,75), Айрон-Маунтин (0,7) – США
VIII. Редкометалльные (Li-Ta-Nb-Be) пегматиты	700–200	PZ–PR	Квартальное, Липовый Лог (0,03), Завитая (0,05), Вишняковское (0,03) – Россия, Берник-Лейк (0,22) – Канада, Серидозинью, Борборема (0,02–0,3) – Бразилия, Коктогай (0,06) – Китай

2. Мировые ресурсы и запасы бериллия на начало 2014 г., тыс. т [2]

Континенты, страны	Ресурсы	Подтверждённые запасы	Среднее содержание BeO в руде, %
Европа	-	2	
Норвегия	-	1	0,50
Португалия	-	1	0,10
Азия	109	15	
Афганистан	26	-	0,12
Индия	57	1	0,18
Китай	26	14	0,20
Африка	58	16	
Конго	6	1	0,14
Зимбабве	8	1	0,15
Мадагаскар	3	2	0,10
Мозамбик	4	1	0,18
Руанда	7	-	0,19
Уганда	7	7	0,22
Эфиопия	10	2	0,06
ЮАР	13	2	0,23
Америка	65	24	
Аргентина	23	2	0,24
Бразилия	4	2	0,36
Канада	1	5	1,00
США	37	15	0,74
Австралия и Океания	11	4	
Австралия	11	4	0,20
Мир в целом	243	61	

3. Запасы оксида бериллия по странам на 01.01.2006 г., по данным Л.И.Клаповской, 2008 г.

Континент, страна	Запасы общие, тыс. т	Доля в мире, %	Запасы подтверждённые, тыс. т	Содержание BeO, %
Европа	5	0,5	4,3	
Норвегия	2	0,2	2	
Португалия	3	0,2	2,3	0,1
Азия	343	31,4	42,5	
Афганистан	73	6,7	0	0,12
Индия	160	14,7	3	0,18
Китай	110	10,1	39,5	0,2
Африка	198	18,1	43,3	
ДР Конго	20	1,8	3	0,14
Зимбабве	25	2,3	2,5	0,15
Мадагаскар	15	1,4	4,8	0,1
Мозамбик	18	1,7	3	0,18
Руанда	25	2,3	5	0,19
Уганда	30	2,8	20	0,2
Эфиопия	25	2,3	0	0,06
ЮАР	40	3,7	5	0,23
Америка	501	45,9	109,4	
Аргентина	70	6,4	4,9	0,24
Бразилия	350	32,1	40	0,36
Канада	16	1,5	13,5	1
США	65	6,0	51	0,6
Австралия	45	4,1	11	0,2
ИТОГО	1092	100	210,5	

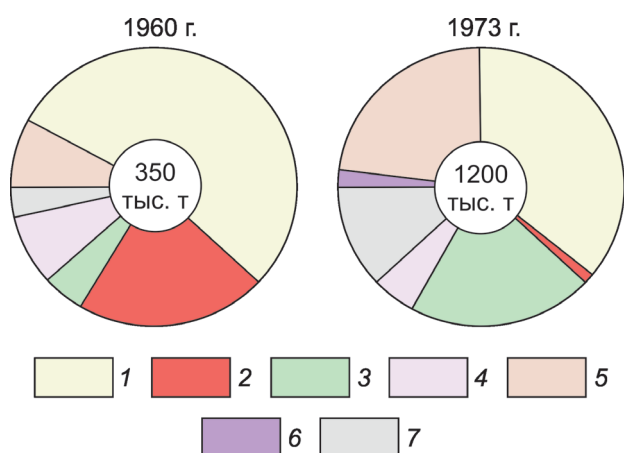


Рис. 1. Изменение сырьевых ресурсов ВеО в мире в 1960, 1973 гг. [13]:

1 – Бразилия; 2 – Аргентина; 3 – Африка; 4 – Индия; 5 – США; 6 – Канада; 7 – другие

2015 г. ситуация заметно изменилась: 39,3% запасов принадлежат Америке (по 3,3% Бразилии и Аргентине, 24,6% США), 24,6% – Азии (23,0% Китаю), 26,2% – Африке, по 3,3% – Австралии и Западной Европе. В последние годы добыча бериллиевых руд сосредоточена главным образом в США и Китае (табл. 4).

По промышленным типам подтвержденные запасы мира по данным за 2006–2008 гг. распределяются следующим образом, % от мировых запасов: редкометалльные пегматиты 48 (Бразилия, Африка, Индостан, Австралия, Китай, 0,03–0,3% ВеО), берtrandит-аргиллизитовые метасоматиты 21 (США, 0,6–1,5% ВеО), грейзеновые – берилл-слюдяные метасоматиты, кварцево-жильные зоны и штокверки – 25 (Бразилия, 0,03–0,3% ВеО), бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты 6 (Канада, 0,3–1,4% ВеО). Большая часть запасов приходится на относительно бедные пегматитовые и грейзеновые руды (табл. 5), причём на долю пегматитов – ~80% запасов, однако добывается из них лишь 30–35% ВеО, а из флюоритизированных риолитовых туфов (Спор-Маунтин, Сьерра-Бланка) 65–70%. Бериллий-полиметалл-оловорудные скарны не рассматриваются ввиду их сложных технологических свойств.

Месторождения типа I – берtrandит-аргиллизитовые метасоматиты – занимают треть ме-

сто в мире по запасам. Представлены объектами Спор-Маунтин и Сьерра-Бланка в США, мелкое проявление Орот в России. Месторождения этого типа приурочены к бортам мезокайнозойских рифтогенных депрессий и связаны с разломами, контролирующими распределение риолитовых вулканических комплексов.

Самое крупное месторождение мира Спор-Маунтин расположено в штате Юта в рудном районе Томас-Рейндж [24]. Район находится на северо-востоке стабилизированной структуры плато Колорадо, являющейся частью Северо-Американской платформы, подвергшейся в триасе рифтогенезу, с которым связано широкое проявление бимодального вулканизма. Это определило приповерхностное субвулканическое образование гидротермального оруденения. В состав палеоген-неогенового интрузивно-вулканогенного комплекса (39–6 млн лет) входят риолито-дациты, риолиты повышенной щёлочности ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=8,72\text{--}9,23\%$), в том числе топазовые, и их туфы, обогащённые F, Be, Sc, U. Месторождение вмещают риолиты, липариты, трахилипариты, туфы и их туфолавы, интенсивно окварцованные, серицитизированные и диккитизированные. Рудовмещающим служит горизонт пористых туфов в основании разреза вулкано-генной толщи, обогащённый обломками подстилающих известняков и доломитов (рис. 3). Участок месторождения находится в боковой части стратовулкана, где вулкано-генные породы имеют пологое моноклинальное залегание. Минерализованные зоны образуют субсогласные пластообразные залежи протяжённостью 1–2 км и более при мощности до 16 м. Оруде-

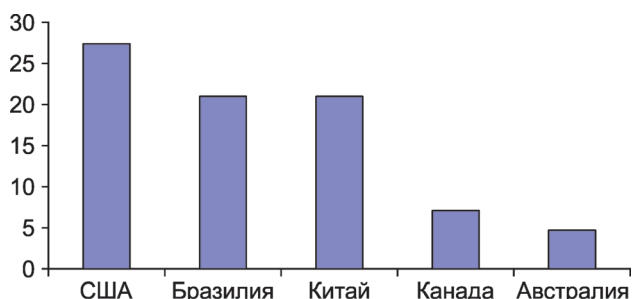


Рис. 2. Вариации подтвержденных запасов бериллия в зарубежных странах, % от мировых запасов [2]

4. Динамика мирового производства бериллия в концентратах, т [2]

Континенты, страны	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2013
Европа	6	2	2	<0,1	-	-	-
Португалия	6	2	2	<0,1	-	-	-
Азия	15	15	55	20	22	20	20
Китай	15	15	55	20	22	20	20
Африка*	5	5	15	7	3	3	7
Замбия	-	-	-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Зимбабве	3	2,5	7	-	-	-	-
Мадагаскар	-	0,5	1	<0,1	1	1	1
Мозамбик	1	-	3	6	2	2	6
Намибия	-	1,5	1	-	-	-	-
Уганда	-	-	-	1	-	-	-
ЮАР	1	0,5	3	-	-	-	-
Америка	208	236	193	110	180	225	236
Аргентина	1	1	1	-	-	-	-
Бразилия	27	35	12	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
США	180	200	180	110	180	225	235
Мир в целом**	234	258	265	137	205	248	262

* Кроме того, бериллиевые концентраты производят в незначительном количестве в Руанде, Кении и некоторых других странах, данные по которым не публикуются.

** В России с 2003 г. перерабатывают складированный бериллиевый концентрат.

нение представлено вкрапленностью, тонкими прожилками берtrandита (гельберtrandита, сфероберtrandита) и бецоита. Среднее содержание BeO в рудах 0,6–1,5%. В повышенном количестве отмечаются Li, Cs, Zn, иногда U и Sc. Оруденение относится к эпитеpмальному приповерхностному типу с метасоматозом аргиллизитовой формации. Разрабатываемое месторождение Спор-Маунтин обеспечивает >50% мирового производства бериллия [2].

Уникально богатое месторождение *Сьерра-Бланка* [24] размещается в шт. Техас. В районе выявлено пять риолитовых лакколитов, прорывающих среднемерловые органогенные известняки. Риолиты (32,6±0,6 млн лет) содержат повышенные концентрации Li, Be, F, Zn, Rb, Y, Zr, Nb, Sn, Cs, REE. На контактах с риолитами по известнякам развито флюорит-бериллиевое оруденение, наиболее детально изученное вблизи лакколита Раунд-Топ. Сложные по морфологии рудные тела локализованы в пологих или крутых экзоконтактах риолитов, вблизи которых известняки и риолиты брекчированы и сцементированы флюоритовым агрегатом. Содержание BeO в рудах составляет 1,5–2%, CaF₂ 21–

5. Формационный состав бериллиевых месторождений в России и за рубежом (% от общих запасов в мире и в России), по данным Л.И.Клаповской, 2008 г.

Геолого-промышленные типы	Мир	Россия
I. Берtrandит-аргиллизитовые метасоматиты	21	0
II. Берtrandит-фенакит-флюоритовые метасоматиты	0	11,5
III. Бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты	6	0
IV. Берилл-слюдяные грейзены и зоны дробления	25	26
V. Апокарбонатные редкометалльно-флюоритовые метасоматиты	0	12
VI. Комплексные (Be, W, Mo)-кварцевожильные	0	2,5
VIII. Редкометалльные пегматиты	48	48

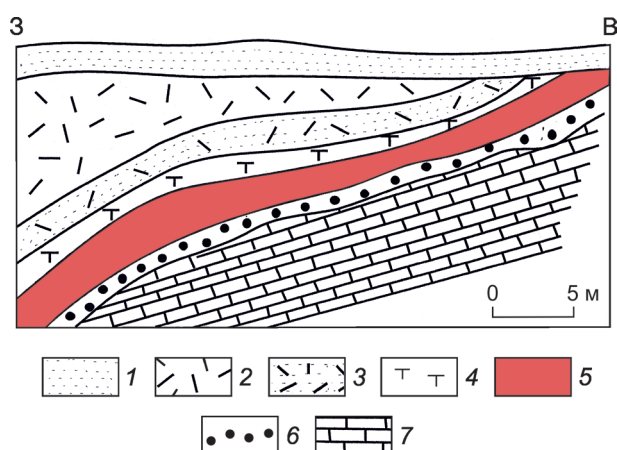


Рис. 3. Геологическое строение месторождения Спор-Маунтин:

1 – аллювиальные отложения; 2 – риолиты, часто топазсодержащие, Р; 3 – гидротермально изменённые риолиты; 4 – туфы риолитового и дацит-риолитового составов; 5 – рудное тело; 6 – туфы с обломками известняков; 7 – известняки и доломиты, PZ

34%. Набор бериллиевых минералов сложный, главные – бехоит, бертрандит, фенакит, отмечаются берборит и хризоберилл, сопутствующие – флюорит, кварц, кальцит, халцедон, анальцим, барит, церуссит, целестин, каолинит, монтмориллонит, гроссуляр. Наличие граната и хризоберилла, по-видимому, свидетельствует о проявлении скарнирования, предшествующего рудному гидротермальному процессу. По минеральному составу объект Сьерра-Бланка занимает промежуточное положение между субвулканическими месторождениями бертрандитового типа и гипабиссальными бертрандит-фенакитового.

Месторождения типа II – бертрандит-фенакит-флюоритовые метасоматиты – известны только в России в провинции Западного Забайкалья, которая приурочена к северо-восточному флангу Северо-Монголо-Забайкальского внутриконтинентального рифтогенного вулканического пояса, наложенного на краевую часть раннепалеозойского Баргузино-Витимского микроконтинента. С рифтогенезом связано развитие бимодальной серии, включающей триасовые контрастные по составу вулканы цаган-хунтейской свиты и интрузии щелочных сиенитов

и гранитов малокуналейского комплекса, а также месторождения бериллия. Рифтогенез сопровождался дизъюнктивными нарушениями с появлением глубоко проникающих трещинных структур, послуживших каналами для поднятия глубинных потоков тепла и флюидов под воздействием мантийного плюма [11, 12].

Провинция, отличающаяся ярко выраженной флюорит-бериллиевой специализацией, включает месторождения и рудопроявления Ермаковское, Ауник, Амандак, Окунёвское, которые сформировались в связи с широким развитием щелочных магматических серий раннемезозойского возраста и локализовались в раннепалеозойских метаморфических породах, представляющих коллаж террейнов разного состава [4], последовательно наращивавших Сибирский кратон с севера на юг с конца рифея до позднего палеозоя [17, рис. 8.1]. Существенные вариации в составе террейнов определили качественные различия бериллиевых месторождений. Более бедные объекты (Ауник, Амандак) локализовались в турбидитовых террейнах, сложенных терригенно-карбонатными и флишевыми отложениями на пассивной континентальной окраине Сибирской платформы. Осадочно-метаморфические толщи Еравнинского островодужного террейна, на территории которого расположено богатое *Ермаковское месторождение*, преимущественно сложены основными вулканитами, метаморфизованными до кристаллических сланцев, с карбонатными прослоями.

На участке Ермаковского месторождения осадочно-метаморфические породы образуют синклиналию складку, крылья которой сложены доломитами, перекрытыми пачкой переслаивания кристаллических известняков и сланцев, а мульда выполнена метаморфизованными песчаниками [17, рис. 8.5, 8.6]. Отличаясь значительной анизотропией физико-механических и химических свойств, терригенно-карбонатные породы представляют благоприятную среду для возникновения рудовмещающих структур и развития в них метасоматических процессов. В пределах пачки тонкого переслаивания локализуются основные рудные тела месторождения, наиболее богатые флюорит-бериллиевые руды избирательно развиваются по пластам кристаллических известняков. Фор-

мированию богатого оруденения также способствовало интенсивное развитие тектонических трещин и брекчий, оперяющих крупные разломы и пересекающих эти толщи. Трещинные системы играли рудораспределяющую роль, в сочетании с переслаиванием терригенно-карбонатных пород они обусловили появление эффективных геохимических ловушек разнообразного строения и локализацию в них метасоматического, реже брекчиевого флюорит-бериллиевого оруденения. Химический состав сланцевой толщи отвечает метаморфизованным вулканическим базальтам и андезитам [17], а их повышенная основность в соответствии с принципом кислотно-щелочного взаимодействия повысила щёлочность рудоносных флюидов, что, в свою очередь, вызвало проявление амфотерных свойств бериллия и образование не только его силикатов (фенакита, берtrandита), но и нескольких бериллосиликатов (лейкофана, мелинофана, эвидимита, миларита, бавенита) в составе руд.

Элементом вмещающей среды служат также палеозойские изверженные породы, прорывающие стратифицированные толщи. Наиболее древнее межпластовое тело раннепалеозойских габброидов (332–318 млн лет) [11], залегающее в верхней части пачки переслаивания, оказало существенное экранирующее воздействие на отложение флюорит-бериллиевого оруденения.

Для определения источников магматических, осадочно-метаморфических пород и руд месторождения проведены Sr-Nd изотопно-геохимические исследования [11]. Они показали, что источники базитовых даек, синрудных щелочных гранитоидов и бериллиевых руд сопоставимы между собой, но источники гранитоидов более обогащены компонентом EM-II по сравнению с базитами. Изотопный состав этих пород и руд варьирует между умеренно обогащёнными мантийными источниками и вмещающими осадочно-метаморфическими толщами, а также гранитами Ангаро-Витимского батолита. На основании полученных данных авторы исследования сделали вывод о том, что синрудные магматические породы и бериллиевое оруденение формировались с участием мантийных плюмовых источников с частичной ассимиляцией

вещества гранитоидов батолита и вмещающих осадочных пород.

В мире разведаны два **месторождения типа III – бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты**, запасы которых составляют 6% от общих (см. табл. 1, рис. 2), в Канадском и Украинском щитах. Они соответствуют платформенным областям с горстовыми поднятиями линейной конфигурации в краевых частях авлакогенов. В России известны рудопроявления с прогнозными ресурсами в Убур-Таширском (Западное Забайкалье) и Улканском (Алдан) районах, приуроченные к более молодым рифтам.

На территории Канадского щита *месторождение Тор-Лейк* локализуется в пределах раннепротерозойского (2057–2175 млн лет) многофазного плутона Блэчфорд-Лейк в борту раннепротерозойского авлакогена Атапуско [24]. Рудоносный массив имеет зональное строение. Во внешней зоне находится габброанортозит, затем – зона рибекитового гранита, преобладающая по объёму, центральная часть сложена сиенитом. Оруденение залегает преимущественно в сиенитовом ядре, частично среди рибекитовых гранитов. Рудные тела тяготеют к зонам дробления, пересекающим эти породы. Наиболее важная зона представляет собой крупное бериллиевое месторождение, протягивается по простиранию до 1 км при максимальной мощности до 300 м. Форма её чётковидная с отчётливым зональным строением. Во внешней части зоны преобладает альбит, сопровождаемый калишпатом, кварцем, слюдами, в ядре – кварц. С альбитом ассоциируют фенакит, литиевые слюды и ряд минералов Y, Zr, Ga, Nb, Ta; содержание BeO в рудах 0,76%. Отношение Th/U > 1, что говорит о мантийном происхождении щёлочно-гранитной магмы [26].

Пержанское месторождение приурочено к северо-западной окраине Украинского щита – Волынскому блоку – раннедокембрийскому микроконтиненту с повышенной мощностью сиалической коры. Формирование месторождения связано с гранитными массивами, которые рассматриваются в качестве заключительных фаз Коростеньского рапакиви-анортозитового магматизма, инициированного плюм-тектони-

ческими процессами позднепротерозойского возраста. Оруденение располагается в пределах зон глубинных разломов в узлах их пересечения с оперяющими нарушениями. Рудные тела, сложенные метасоматитами, объединены в несколько зон, согласно залегающих с гнейсовидностью вмещающих гранитов [17, рис. 3.5]. Метасоматиты имеют зональное строение: гранитоподобная порода с голубым кварцем → кварц-полевошпатовый метасоматит → полевошпатовый метасоматит → слюдисто-полевошпатовый метасоматит → сидерофиллитовый грейзен. Среднее содержание Be 0,15–1,70%.

Месторождение отличается уникально промышленной концентрацией бериллия в виде редкого минерала – гентгельвина. Это обстоятельство указывает на высокотемпературные, относительно восстановительные и щелочные условия минералообразования при низких значениях активности S^{2-} . Кристаллизация гентгельвина проходила в интервале T 540–320°C. В надкритических флюидах H_2S диссоциирует очень слабо, поэтому активность S^{2-} низкая и в таких условиях даже типичный халькофильный цинк приобретает литофильные свойства, кристаллизуется в виде гентгельвина и виллемита, в которых он находится в четверной координации (как и бериллий в гентгельвине).

Малоглубинное *Урминское месторождение* типа бериллиеносных полевошпатовых метасоматитов размещается на юго-западе Бурятии в пределах Таширского рудного района [17]. Геолого-тектоническая позиция последнего сходна с положением берtrandит-фенакит-флюоритовых месторождений – в узле пересечения крупных разломов на борту Боргойской рифтовой впадины, выполненной осадочно-вулканогенными породами мезозойского возраста. Прилегающая часть района в основном сложена палеозойскими и мезозойскими гранитоидами, прорывающими протерозойскую осадочно-метаморфическую толщу. Месторождение локализуется в пределах гипабиссального Убур-Таширского массива триасового возраста, сложенного граносиенитами, кварцевыми сиенитами, биотитовыми и роговообманковыми лейкократовыми гранитами и гранодиоритами. Рудоконтролирующими структурами являются системы контракционных, сколовых и сбросо-сдвиговых тре-

щин. Рудные тела линзообразной и неправильной форм, крайне невыдержанные по простиранию и падению, располагаются кулисообразными сериями в составе зон субмеридионального и северо-восточного простирания [17, рис. 8.43]. Бериллиевое оруденение концентрируется в кварц-микроклин-альбитовых метасоматитах и гематит-кварцевых жилах в форме берtrandита и второстепенного по значению гельвина, количество которого возрастает с глубиной. Среднее содержание BeO в рудах варьирует в пределах 0,18–0,44% в зависимости от принятого бортового содержания.

К месторождениям **типа IV – берилл-слюдяные грейзены и минерализованные зоны дробления** – относятся достаточно разнородные объекты, которые объединяют наличие берилла, грейзенов и тектоническая проработка рудных зон (в том числе с богатыми рудами). В сумме и в мире, и в России они содержат до четверти запасов, занимая второе место после пегматитов (см. табл. 1, 5).

Богатое *Снежное месторождение* расположено в восточной части Восточно-Саянского региона в пределах Хамсаринского островодужного террейна [4]. Контролируется узлом пересечения региональной субширотной зоны с группой разломов северо-западного простирания. В результате образуется ромбовидный тектонический блок, ограниченный разрывами и зонами бластомилонитов. Участок месторождения [17, рис. 7.15] сложен метаморфическими породами утхумской свиты (PR_3) – амфиболовыми, биотитовыми и биотит-амфиболовыми сланцами, амфиболитами с прослоями мраморизованных известняков. Сланцы и амфиболиты мигматизированы и по сланцеватости пересекаются или вмещаются мелкозернистыми плагиоклазовыми и кварц-плагиоклазовыми агрегатами. Вблизи рудных зон эти породы также биотитизированы, местами до слюдитов. Метаморфическая толща интродуцирована габбродиоритами (495–443 млн лет), небольшими телами гранитов огнитского комплекса (449–438 млн лет) и рибекитовых гранитов.

В пределах блока выделены три зоны с бериллиевым и две с тантал-ниобиевым оруденением, которые пространственно разобщены. Тантал-ниобиевые зоны находятся на восточ-

ном фланге месторождения и гипсометрически расположены ниже бериллиевых. Минерализованные зоны дробления, содержащие бериллиевое оруденение, имеют протяжённость первые сотни метров, мощность первые десятки метров. Состав обломков весьма разнообразен – амфиболиты, биотитовые слюдиты, мелко-, среднезернистые лейкократовые плагиограниты. Цемент брекчии преимущественно мелкозернистый, лейкократового кварц-альбитового и кварц-олигоклазового состава с незначительным содержанием биотита. Главные промышленные минералы – фенакит, берилл, а также флюорит (от единиц до 25–30%). Им сопутствуют биотит, полевые шпаты (микроклин, реже олигоклаз, альбит), кальцит, в переменном количестве кварц; присутствуют сульфиды. Распределение оруденения в рудных телах гнездово-вкрапленное и штокверково-прожилковое до фрагментов массивных руд с колебанием содержания BeO от 0,0п до п%.

Формированию месторождения с исключительно богатыми рудами способствовала его локализация в блоке пород с мощным фундаментом, в узле пересечения глубинных разломов, который служил проницаемым каналом для рудоносных флюидов. А мощная зона брекчирования, возникшая на участке интенсивных тектонических подвижек, была эффективной структурно-литологической ловушкой, тем более, что состав орто- и параамфиболитов с повышенным содержанием кальция благоприятствовал активному разложению бериллиевых фторкомплексов. По генетическим особенностям бериллиевое оруденение ближе всего к месторождениям слюдисто-флюорит-берилловой формации, но отличается от них наличием в рудах фенакита в равных количествах с бериллом. Это объясняется присутствием в рудном поле щелочных рибекитовых гранитов и влиянием вмещающих пород, повышенная основность которых обусловила увеличение активности щелочей в процессах рудообразования.

Малышевское месторождение – самый крупный объект района Изумрудные Копи, который приурочен к восточному экзоконтакту Адуйского гранитного плутона (Средний Урал). Плутон относится к анатектической адамеллит-гранитной серии континентально-коллизийного типа.

Месторождения рудного района представлены двумя различными промышленными типами: $Be-Nb-Ta$ -альбит-микроклиновыми пегматитами (Квартальное, Липовый Лог) и Be -изумрудными объектами нестандартного генетического типа [17]. Их неповторимое своеобразие обусловлено двумя главными факторами: ультраосновным составом вмещающих пород и расположением в мощной тектонической зоне регионального Сусанско-Асбестовского разлома. Рудные тела локализованы в зоне серпентинитового меланжа, уходящей на глубину >600 м. Тектонический меланж приблизительно в равных объёмах состоит из жёстких макробудин диоритовых порфиритов, серпентинитов, разделяющих их тектонических зон, в которых серпентиниты изменены до тальковых сланцев. Механическая неоднородность вмещающей толщи определила возникновение рудных тел двух морфологических типов [17, рис. 4.6]. В жёстких блоках, где существовали длительно приоткрывавшиеся трещины отрыва, локализовались пологие кварц-плагиоклазовые жилы субширотного простирания, включающие основную массу берилла. Между ними в тектонических зонах, представленных сколовыми трещинами среди пластичных тальковых сланцев, которые не могли долго сохранять открытые трещины, развивались прожилково-метасоматические слюдитовые рудные зоны с крутым падением и субмеридиональным простиранием, являющиеся главными носителями изумрудов. Отметим, что изначальная морфология рудных тел этого типа существенно изменена интенсивным пострудным дроблением и развальцеванием.

По количеству лития в слюдах и высокой концентрации Ge -центров в кварце Малышевское месторождение ближе к $Na-Li$ пегматитам (воджинит-танталит-петалитовым – Вишняковского месторождения и танталит-сподуменовым – Калбы), чем к альбит-микроклиновым пегматитам Квартального месторождения. Избыток Eu в Ca -содержащих минералах (флюорите, апатите, плагиоклазе) говорит о повышенной глубинности формирования Малышевского месторождения.

Таким образом, выявляется промежуточная природа жил Малышевского месторождения между пегматитами и кварцевыми жилами грей-

зенового типа. Кварц-плагиоклазовые жилы формировались в условиях десиликации под влиянием ультраосновных вмещающих пород на значительной глубине (5–6 км), предельной для грейзенового генетического типа, при участии расплавов, что доказано наличием расплавных включений с $T_{\text{гом}} > 620^\circ\text{C}$ и флюидным давлением > 4 Кбар [16]. Различие металлогенического профиля пегматитов и грейзенов объясняется условиями миграции Ta и Nb преимущественно в закрытых расплавных системах. При формировании Малышевского месторождения флюидная составляющая преобладала над расплавной, так как очаг пегматитовых Ta-Nb-Be-Li расплавов был вскрыт проницаемой тектонической зоной и развитие флюидно-магматической системы сдвинулось в сторону грейзенового генетического типа.

Боёвское флюорит-берилловое месторождение находится на периферии Боёвско-Биктимировского Be-вольфрамоносного рудного района в пределах сиалического Конёвско-Карасьевского срединного массива в юго-восточной части Восточно-Уральского микроконтинента, который характеризуется пониженным уровнем силы тяжести. Месторождение удалено на 5–6 км от выходов слабо эродированного Конёвско-Карасьевского гранитного плутона континентально-коллизийного типа [19]. Рудное поле сложено вулканогенно-осадочными породами с чередованием алюмосиликатных и карбонатных, что обуславливает анизотропию структурно-литологических свойств. Рудные зоны локализованы в пределах сбросо-сдвиговых тектонических зон и по морфологии относятся к согласным прожилково-метасоматическим залежам [17, рис. 4.29]. Неоднородные состав и механические свойства вмещающих пород способствовали образованию пяти типов руд, различающихся по структурно-текстурным особенностям, количественному соотношению породообразующих и бериллиевых минералов и, соответственно, по качеству.

В Южной Америке известно крупное *месторождение бериллия Боа-Виста*, расположенное в Восточно-Бразильском поясе позднедокембрийских редкометалльных пегматитов в шт. Минас-Жерайс на юго-восточном склоне гряды Серрадуз-Айморес. Общие запасы BeO 40 тыс. т

при среднем содержании в рудах 0,25%. Обнаружено в 1959 г., разрабатывалось с 1961 г. открытым способом. Находится в субмеридиональной рудной зоне (площадь ~ 4000 км²), приуроченной к восточной границе Западно-Бразильского щита с протерозойской складчатой системой и содержащей ряд редкометалльных пегматитовых месторождений. Локализовано в лейкократовых гранитах, прорывающих толщи филлитов. Геолого-промышленный тип месторождения – грейзеновый в слюдяных метасоматитах. Рудные залежи представлены минерализованными зонами сложной формы (длина 100–300 м, ширина до 200 м, мощность 1–6 м), реже жилами. Руды гнездово-вкрапленные берилл-берtrandит-мусковитового состава. Главные рудные минералы – берtrandит, берилл, эвклаз (в соотношении 1:1:1). Попутные компоненты – молибден, вольфрам, серебро, флюорит.

В Северной Америке группа богатых *месторождений бериллиеносных грейзенов Редскин-Шток* расположена в шт. Колорадо в 16 км от Лейк-Джордж [14]. Район сложен метаморфическими породами докембрия – биотит-кварцевыми диоритовыми гнейсами и ортогнейсами (1730 млн лет), которые интродуцированы позднепериферийскими гранитами Пайкс-Пик и штока Редскин (995–1080 млн лет). Граниты штока обогащены характерными для рудоносных массивов элементами – Be, Li, Rb, Sn, F. Бериллиеносные грейзены развиты среди тонкозернистых аплитовидных или порфиоровидных гранитов штока и осложняющих его куполов Бумер и Чайна-Волл. Рудоносные мусковит-кварцевые грейзены включают берилл, эвклаз, берtrandит. Кроме того, в них отмечаются флюорит, топаз, галенит, халькопирит, арсенопирит, реже пирит, сфалерит, молибденит, вольфрамит. Широко распространены безрудные грейзены. Берилл встречается также в кварц-топаз-вольфрамитовых жилах. Главные рудные участки находятся в куполах Бумер, Чайна-Волл, Мери-Ли и ущелье Редскин. Наиболее рудоносны проявления купола Бумер. Рудные тела приурочены к контактам гранитов и гнейсов, имеют линзовидную или жильную форму. Средние содержания BeO колеблются в пределах 0,70–2,0%. Высокой рудоносности месторождения способствовало, помимо обогащения бериллием гра-

нитной магмы, влияние гнейсов основного состава.

Тип V – апокарбонатные (Be-Li-Rb-Cs)-флюоритовые грейзены – представлен крупнейшими Вознесенским и Пограничным месторождениями (Приморский край), сформировавшимися под воздействием мантийного горячего поля (плюма). Флюорит ранних генераций сохраняет изотопный состав, свидетельствующий об этом [8].

Комплексные (Be-W-Mo-Sn)-кварцево-жильно-грейзеновые месторождения типа VI вносят лишь небольшой вклад в МСБ бериллия (см. табл. 5).

Тип VII – бериллий-полиметалл-оловорудные скарны не обрабатываются ввиду технологической сложности руд.

Тип VIII – редкометалльные (Li-Ta-Nb-Be) пегматиты. Преобладание пегматитовых месторождений в сырьевой базе бериллия за рубежом и в России обусловлено тем, что объекты этой формации на протяжении всей геологической истории Земли преимущественно развивались в платформенных областях [6], которые на всех континентах занимают самые большие площади [18]. Наиболее известные и крупные пегматитовые месторождения берилла (Берник-Лейк и др.) – располагаются в Северной и Южной Америке, Африке, Азии (Аравия, Индостан), Австралии и, возможно, части Антарктиды (рис. 4). Современные палеогеодинамические реконструкции показали, что эти континенты являются фрагментами докембрийского суперконтинента Гондвана [22], представлявшей мощную докембрийскую платформу.

Бразилия расположена в пределах докембрийской Южно-Американской платформы, фундаментом которой образован мощным комплексом разнообразных по составу и степени метаморфизма пород, пронизанных гранитоидами. Докембрийские породы слагают ряд поднятий, крупнейшие из них – Гвианский и Западно-Бразильский щиты. Бериллиевые руды преимущественно сосредоточены в комплексных пегматитовых месторождениях, которые приурочены к Главному пегматитовому поясу Бразилии, в тектоническом отношении представляющем авлакоген. Крупнейшие месторождения – Парельяс, Сан-Томе, Серидозинью. В заключительную ста-

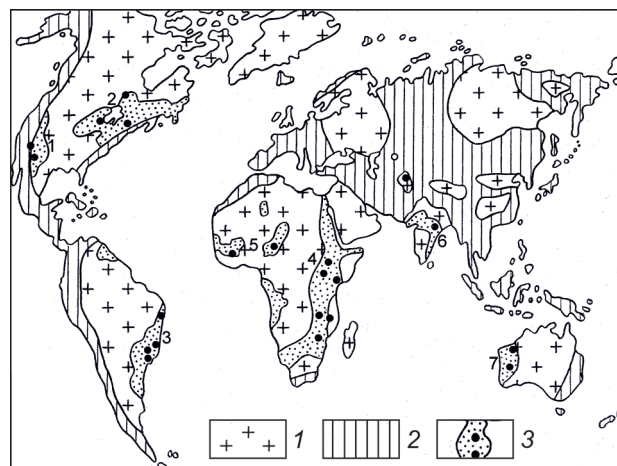


Рис. 4. Размещение зарубежных редкометалльных месторождений [1]:

1 – платформы; 2 – складчатые пояса; 3 – крупнейшие редкометалльные провинции и месторождения (1 – Кордильерский рифтовый пояс, 2 – Аппалачский пояс, 3 – Восточно-Бразильский пояс, 4 – Восточно-Африканский пояс, 5 – Центрально- и Западно-Африканские пегматитовые поля, 6 – Индийский пегматитовый пояс, 7 – Восточно-Австралийский пегматитовый пояс)

дию развития Восточно-Бразильской системы (конец докембрия – кембрий) по разломам широтного или северо-восточного простирания произошло внедрение гранитов и пегматитов с богатым редкометалльным (бериллий, тантал и др.) оруденением [20].

В качестве главных прогнозных критериев распространения крупных месторождений бериллия можно выделить ряд геологических, петрографических, литологических и минералого-геохимических особенностей рудных районов.

Гранитогенный характер промышленного бериллиевого оруденения определяет его локализацию в блоках с повышенной мощностью сиалической коры. Благоприятной предпосылкой формирования крупных бериллиевых месторождений служит интенсивное проявление предшествующего гранитного батолитообразования, придающего соответствующую специализацию провинции с повышенным кларком бериллия, наряду с другими литофильными элементами.

Кроме гранитонасыщенности фундамента, в ряде регионов благоприятную роль играет присутствие толщ повышенной основности. Так, в Западном Забайкалье и Восточных Саянах наиболее богатые месторождения (Ермаковское и Снежное) расположены в пределах островодужных террейнов, а месторождения того же формационного типа, но с бедными рудами (Ауник) находятся на территории турбидитовых террейнов.

В мобилизации бериллия из нижних частей сиалической коры важное значение имеют мантийные потоки тепла и флюидов (обогащённых фтором и щелочами) (плюмами), которые инициированы внедрением мантийных диапиров. Поэтому в размещении рудных районов определяющую роль играют узлы пересечения глубинных региональных разломов, в которых возникали длительно существовавшие пронцаемые каналы, корнями достигавшие верхнемантийных флюидно-магматических очагов, способствующих образованию и глубокой дифференциации гранитных магм. Известно, что уникальные месторождения часто находятся в пределах протяжённых тектонических зон, связанных с рифтогенезом [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельская В.В.* Закономерности размещения эндогенных редкометалльных месторождений. – М.: Недра, 1980.
2. *Бежанова М.П., Стругова Л.И.* Научно-информационный справочник «Ресурсы, запасы, добыча, потребление и цены важнейших полезных ископаемых мира». – М.: ОАО «ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ», 2015.
3. *Беус А.А.* Бериллий // *Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов.* М., 1964. Т. I. С. 94–132.
4. *Булгатов А.Н., Гордиенко И.В., Зайцев П.Ф., Турунхаев В.И.* Геодинамическая карта Байкальского региона и сопредельных территорий. М-б 1:2 000 000. – Улан-Удэ: ГИ СО РАН, 2004. CD ROM.
5. *Гинзбург А.И.* Основные черты геохимии бериллия // *Закономерности формирования гидротермальных месторождений бериллия.* М., 1977. С. 5–23.
6. *Гинзбург А.И.* Учение о пегматитах в свете современных знаний // *Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых.* М., 1983. С. 164–192.
7. *Говоров И.Н.* Геохимия рудных районов Приморья. Ч.1. – М.: Наука, 1977.
8. *Говоров И.Н., Благодарёва Н.С., Журавлёв Д.З.* Петрогенезис флюоритовых месторождений Вознесенского района (Приморье) по данным Rb-Sr-изотопии магматических и метасоматических пород // *Тихоокеанская геология.* 1997. Т. 16. № 5. С. 60–69.
9. *Гордиенко И.В.* Палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса. – М.: Наука, 1987.
10. *Журнист А.В.* Бериллий. В поисках сверхвещества // *Редкие земли.* 2013. № 1. С. 66–73.
11. *Изотопно-геохимические* параметры и источники бериллиеносных гранитоидов и других пород на примере Ермаковского месторождения (Западное Забайкалье, Россия) / *Д.А.Лыхин, В.И.Коваленко, В.В.Ярмолюк и др.* // *Геология рудных месторождений.* 2010. Т. 52. № 4. С. 321–336.
12. *Источники* магматизма и геодинамика формирования раннемезозойской Северо-Монгольской – Западно-Забайкальской рифтовой зоны / *А.А.Воронцов, В.В.Ярмолюк, Д.А.Лыхин и др.* // *Петрология.* 2007. Т. 15. № 1. С. 37–60.
13. *Коган Б.И.* Редкие металлы. Состояние и перспективы. – М.: Наука, 1979.
14. *Коган Б.И., Капустинская К.А., Топунова Г.А.* Бериллий. – М.: Наука, 1975.
15. *Куприянова И.И.* Особенности формирования бериллиевого оруденения, связанного с гранитами // *Закономерности формирования гидротермальных месторождений бериллия.* М., 1977. С. 99–160.
16. *Куприянова И.И., Соколов С.В.* Об условиях образования флогопит-маргарит-берилловой минерализации // *Геология рудных месторождений.* 1984. Т. XXVI. № 6. С. 32–44.
17. *Куприянова И.И., Шпанов Е.П.* Бериллиевые месторождения России. – М.: ГЕОС, 2011.
18. *Мишин Н.И., Степина З.А.* Платформенный панцирь Земли. – СПб.: Тема, 2000.
19. *Орогенный* гранитоидный магматизм Урала / *Г.Б.Ферштатер, Н.С.Бородина, М.С.Рапопорт и др.* – Миасс: ИГИГ УрО РАН, 1994.
20. *Путцер Г.* Вольфрамо-бериллиево-ниобиевая провинция плоскогорья Борборема (Северо-Восточная Бразилия). – М., 1959. Бр. 26176.

21. Стунжас А.А., Говоров И.Н. Комплексные карбонатные, фторкарбонатные соединения бериллия и их роль при миграции бериллия в природных водах // Геохимия. 1981. № 4. С. 517–524.
22. Хаин В.Е., Божко Н.А. Гондвана – исчезнувший суперконтинент // Природа. 1989. № 6. С. 36–45.
23. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Рифтогенный магматизм активных континентальных окраин и его рудоносность. – М.: Наука, 1991.
24. Barton M., Young S. Non-pegmatitic deposits of beryllium: mineralogy, geology, phase equilibria and origin // Beryllium: mineralogy, petrology and geochemistry. 2002. Vol. 50. P. 591–691.
25. Grew E.S. Mineralogy, petrology and geochemistry of beryllium: an introduction and list of beryllium minerals // Beryllium: mineralogy, petrology and geochemistry. 2002. Vol. 50. P. 1–76.
26. Varieties of granitic uranium deposits and favorable exploration areas in the Eastern-United States / J.W.Rogers, P.C.Ragland, R.K.Nishimori et al. // Econ. Geol. 1978. Vol. 73. N. 8. P. 1539–1555.

Куприянова Ирина Ивановна,
доктор геолого-минералогических наук
kuprijan@aha.ru

GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL GENESIS FACTORS OF Be DEPOSITS OF VARIOUS ECONOMIC TYPES

I.I.Kupriyanova

A new interpretation of history and development conditions of Be mineralization pertaining to various genetic and economic types is proposed on the basis of published and new data on geological and geochemical factors of Be deposit formation. Relative reserve ratio of various Russian and worldwide BeO deposits is compared, reasons for the defined ratios are analyzed with account of Be geochemical properties, geological and tectonic situation and crust/mantle interaction.

Key words: beryllium, deposit, reserves, genesis, tectonics, crust, mantle.

Подписка в почтовых отделениях
по каталогу «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать»
(индекс 47 218)

Подписка на электронную версию журнала
на сайте Научной Электронной Библиотеки elibrary.ru

Вышедшие номера журнала можно приобрести в редакции:
Адрес: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1
Контактный телефон: 8 (495) 315-28-47. Факс: 315-43-47
E-mail: rudandmet@tsnigri.ru, rudandmet@yandex.ru

Периодичность – 4 номера в год. Цена подписки на год 1200 рублей.