

И.Н. Бушляков, В.В. Холоднов

РОЛЬ ФТОРА В ФОРМИРОВАНИИ БЕРИЛЛИЕВОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Гранитоиды Урала как и других регионов (Центрального Казахстана, Монголии, Забайкалья), специализированные на бериллиево оруденение, характеризуются высокими концентрациями фтора в породах и минералах [Бушляков, Григорьев, 1994]. При этом в таких гранитоидах часто присутствуют акцессорный флюорит, который является также важной составной частью большинства месторождений и рудопроявлений бериллия. Связано это с тем, что бериллий является типичным легколетучим фторофильным элементом. Выявлена также прямая пропорциональная зависимость между содержаниями фтора и бериллия в лейкогранитах Урала и Центрального Казахстана (рис. 1). Это обусловлено их совместным эманационным переносом и остаточным концентрированием с образованием собственных минералов (флюорита и берилла). В мусковите гранитов Шилово-Коневской группы массивов между этими элементами также установлена прямая зависимость. Эманационным выносом фтора и бериллия из кристаллизующегося остаточного расплава обусловлена грейзенизация гранитов Юго-Коневского и других массивов, вплоть до образования рудных флюорит-мусковит-бериллиевых грейзенов.

Повышенное содержание бериллия в гранитоидах (более 3–5 г/т) является одним из важнейших критериев для их геохимической и металлогенической специализации на бериллие-

вое оруденение [Закономерности..., 1977]. Среди орогенно-коровых гранитоидов на Урале [Бушляков, Григорьев, 1994] наблюдается существенный рост средних содержаний бериллия – от раннеорогенных надсубдукционных тоналит-гранодиоритовых серий (2,6 г/т) к позднеколлизийным мигматит-гранитным (3,7 г/т) и гранитным (4,3 г/т) и постколлизийным гранит-лейкогранитным (5,1 г/т) сериям. Это коррелируется с ростом в породах и минералах содержания фтора [Бушляков, Холоднов, 1986], указывающее на близкое химическое сродство между этими элементами.

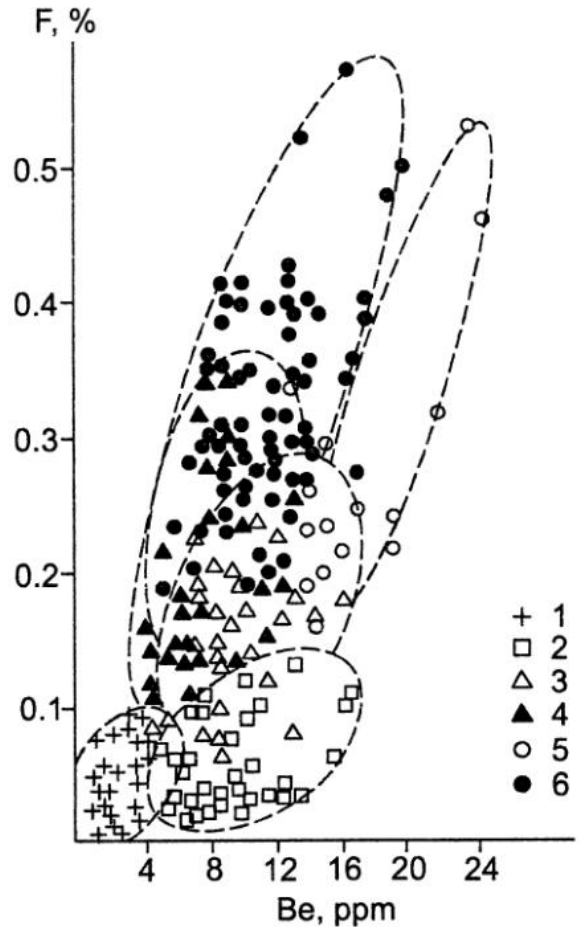


Рис. 1. Соотношение содержаний бериллия и фтора в гранитоидах .

1 – гранитоиды Урала, 2–6 – лейкократовые граниты Центрального Казахстана – массивы: 2 – Кызылтау, 3 – Куу, 4 – Коктенкол, 5 – Жанет, 6 – Акчатау и Каратау.

Важным критерием редкометальной специализации гранитоидов корового ряда является интенсивность накопления бериллия в конечных дифференциатах (лейкогранитах, аляскитах, аплитах, пегматитах). Конечные фазы рудоносных массивов обычно содержат более 5 г/т бериллия [Закономерности..., 1977]. Значительное накопление бериллия в конечных дифференциатах (до 6–9 г/т) характерно для массивов гранитной (Адуйский, Карасьевский, Суундукский, Адамовский и др.) и гранит-лейкогранитной (Малышевский, Зенковский и др.) формаций Урала. Здесь в поздних лейкогранитах, аплитах и пегматитах концентрации бериллия возрастают в два и более раза. В пегматитах Адуйского массива содержание бериллия увеличивается до 150 г/т и более, что сопровождается появлением его собственных минералов. Таким образом, формирование бериллиевого оруденения в пегматитах, грейзенах и других образованиях обусловлено накоплением бериллия в остаточном расплаве. Этому способствует и максимальная активность здесь фтора.

Установлено [Бушляков, Холоднов, 1986], что содержание фтора в биотитах из гранитоидов, специализированных на крупное бериллиевое оруденение (редкометалльные пегматиты и грейзены), обычно превышает 2% и может достигать 4–5%. Для таких массивов часто характерна тесная связь бериллиевой минерализации с комплексом других фторофильных редких элементов (Ta, Nb, Sn, W, Li, Rb, Cs). На тесную связь с W указывает бериллиевая минерализация в составе кварцево-жильных вольфрамовых месторождений Шилово-Коневской группы.

Накопление бериллия на завершающем этапе формирования гранитоидов возможно только при прочих благоприятных физико-химических условиях. Как показывает сопоставление геохимии бериллия в коровом гранитном и монцонитоидном типе серий особое значение имеет режим кислорода. Бериллиевое оруденение формируется в условиях относительно более восстановительного режима, характерного для корового гранитоидного магматизма. Это отражается в низких содержаниях магнетита в таких гранитоидах. Высокая железистость и глиноземистость биотита – это другой важнейший индикаторный признак металлогенической специализации на бериллий, а также тантал, вольфрам и олово. В таких условиях бериллий наиболее интенсивно концентрируется в остаточных расплавах и поздних фтороносных

флюидах. При этом установлено, что на раннем этапе позднеколлизийного гранитоидного магматизма состав биотита отражает процесс преимущественного обезвоживания субстрата. В связи с этим в биотитах гранитизированных толщ наблюдается рост содержаний фтора (от 0,1 до 0,5% и более) и синхронный рост его железистости (от 30 до 70 мол.%) и глиноземистости (21–23%). Этим параметрам наиболее полно соответствуют массивы раннего мигматит-гранитного комплекса (варламовский, южакровский и др.). С ростом железистости и содержаний фтора в биотитах коррелируется рост количества бериллия в породах. Высокая железистость биотитов сохраняется и на завершающем этапе формирования гранитоидов корового ряда. В биотитах кабанского, аятского, адуйского и других поздних комплексов железистость биотитов составляет 55–65 мол.% (в монцонитоидном типе серий она значительно ниже).

В процессе формирования поздних гранит-лейкогранитных серий происходит дальнейшее значительное падение общего и водного давления, растет кислотность флюида, что отражается в появлении в породах альмандин-спессартинового граната, мусковита, ильменита, монацита, ксенотима. Вблизи массивов этого типа известны проявления редкометальной минерализации преимущественно грейзенового и кварц-жильного типа. В гранитоидах латитового ряда рост содержаний фтора в магнезиальных биотитах не сопровождается накоплением бериллия в породах. Здесь в условиях высокой активности кислорода и при наличии относительно повышенных содержаний хлора, складывается другая геохимическая и металлогеническая специализация (Mo, W, Au, Nb, полиметаллы).

Расчет минеральных балансов бериллия в гранитоидах показал [Бушляков, Григорьев, 1994], что бериллий обычно рассеян в породообразующих минералах, причем основная доля его (от 60 до 90%) приходится на плагиоклаз.

Для позднеколлизийных коровых гранитных формаций характерен рост содержаний бериллия от ранних серий к поздним, синхронно с ростом их щелочности и кремнекислотности, а также содержаний фтора. При этом растет концентрация бериллия и в минералах: плагиоклазах и слюдах. При этом установлено, что для рудоносных позднеколлизийных массивов гранитной формации (Адуйский, Суундукский, Средне-Ушкатынский, Катансийский и др.), со-

проводящихся пегматитами с редкометальной (Be и др.) минерализацией характерны максимальные концентрации бериллия в плагиоклазе (10–15 г/т) при пониженном содержании бериллия в биотите и мусковите (2–8 г/т), с коэффициентом распределения бериллия между плагиоклазом и слюдами около 3, а между биотитом и мусковитом – близком к 1 (рис. 2). При этом рост содержаний бериллия в плагиоклазах связан функциональной зависимостью с количеством бериллия в самих породах. Для поздне- и постколлизийных рудоносных массивов гранитной и гранит-лейкогранитной формаций, сопровождающихся ростом грейзеновой и гидротермальной минерализаций, характерен иной тип распределения бериллия между плагиоклазом, биотитом и мусковитом (рис. 2). Здесь наблюдается рост содержаний бериллия в биотитах (до 8–12 г/т) и, особенно, в мусковитах (до 15–20 г/т) при существенном снижении содержаний в плагиоклазе (от 10–15 до 4–8 г/т) и уменьшении коэффициента распределения бериллия между плагиоклазом и слюдами до 0,5.

Соответственно в рудоносных массивах этого типа в минеральных балансах бериллия резко понижена роль плагиоклаза (менее 70%) и повышена – биотита и мусковита (до 30%). Наиболее высокими содержаниями бериллия в слюдах (более 5 г/т) выделяются Юго-Коневский, Сосновский, Ипатовский, Зенковский массивы [Бушляков, Григорьев, 1994].

Термодинамические расчеты, экспериментальные данные [Когарко, Рябчиков, 1978, Когарко, Кригман, 1981], как и геологические наблюдения, свидетельствуют о том, что по мере увеличения кислотности расплава возрастает количество отделяющегося от него фтора и связанных с ним фторофильных элементов (Be и др.), фиксируемых явлениями мусковитизации и грейзенизации пород. На этапе окончательной кристаллизации остаточного расплава значительная масса фтора и бериллия переходит во флюид, который, отделяясь от расплава и перемещаясь по ослабленным зонам, взаимодействует с гранитами и вмещающими породами, отлагая в благоприятных условиях минералы фто-



Рис. 2. Распределение бериллия между плагиоклазом и биотитом (а), и между плагиоклазом и мусковитом (б) из фтороносных гранитоидов Урала.

1 – позднеколлизийные массивы гранитной формации, 2 – Адуйский рудоносный массив, 3 – постколлизийные массивы гранит-лейкогранитной формации. Дополнительно выделены массивы: 4 – Средне-Ушкатинский, 5 – Карасьевский, 6 – Варламовский, 7 – Суундукский, 8 – Малышевский, 9 – Зенковский, 10 – Сосновский, 11 – Ипатовский, 12 – Юго-Коневский. Заштрихованы поля: 13 – надсубдукционных гранитоидов тоналит-гранодиоритовой формации, 14 – гранитоиды латитового ряда.

ра и бериллия. Расчеты показывают [Бушляков, 2000], что содержание фтора в остаточных лейкократовых гранитных расплавах, специализированных на бериллиевое оруденение, достигает 0,5% и более. В гранитных расплавах и надкритических флюидах [Беус, Диков, 1967] фтор образует устойчивые фторкомплексные соединения типа BeF_4^{2-} , BeF_3^- , BeF_2^0 и др.

Для постколлизионных массивов гранит-лейкогранитной формации более характерна бериллиевая минерализация грейзенового и кварц-жильного типа. Наличие здесь секущих первичных геохимических ореолов [Бушляков, Григорьев, 1994] указывает на их связь с притоком в поверхностную часть более глубинных бериллий-фторсодержащих флюидов. С ними здесь связаны все основные процессы площадной и околожильной мусковитизации и грейзенизации. Малые интрузии выступают в этом случае как флюидопроводники глубинных эманий фтора и бериллия.

Все массивы гранитоидов на Урале, с которыми генетически или парагенетически связаны рудопроявления и месторождения бериллия (пегматиты, грейзены, гидротермальные жилы), отмечены повышенными содержаниями фтора в расплаве в момент их кристаллизации. На это указывают высокие концентрации фтора в биотитах. Фтор, таким образом, может быть использован в качестве индикатора при оценке потенциальной рудоносности гранитов, а фторометрия – в качестве геохимического метода поисков бериллиевой и другой редкометальной минерализации. В то же время, необходимо отметить, что специализация гранитоидных массивов на фтор еще не определяет их безусловной специализации на бериллиевое и другое редкометальное оруденение. Важное значение здесь имеет первичная геохимическая специализация массивов на сам бериллий [Закономерности..., 1977] и другие редкие металлы. Главную роль в этом случае играет формационная принадлежность или генетический тип массивов богатых фтором, тесно связанных с геотектоническим режимом их формирования.

Установлено, что наиболее специализированы на бериллий коровые поздние и постколлизионные массивы гранитов и лейкогранитов и особенно те из них, которые тяготеют к блокам с древней континентальной корой. Рифейские рифтогенные магматические, метаморфические и другие образования западного склона Урала отчетливо специализированы на бериллий и

другие редкие металлы (Nb, Ta, La, Ce, Zr) и фтор. Это определяет наличие акцессорных тантало-ниобатов в рифейских гранитоидах. Содержание бериллия в щелочно-базит-гранитоидных ассоциациях рифея (Бердяушский, Рябиновский и др. массивы) достигает 4,8 г/т. На восточном склоне Урала позднеколлизионные гранитоидные массивы, специализированные на фтор и редкие металлы (Be, Ta, W, Li, Rb и др.), также преимущественно тяготеют к рифейским метаморфическим толщам. Это характерно для гранитоидов Ильменогорского комплекса, для Мурзинско-Адуйской и Шилово-Коневской группы рудоносных интрузий, находящихся в крайней восточной части Восточно-Уральского микроконтинента, т.е. там где датирован рифейский субстрат [8]. В связи с этим роль субстрата приобретает важное значение для формирования металлогенической специализации на бериллий и другие редкие элементы фтороносных коровых магм. Рифейские толщи – это, по-видимому, основной источник фтора и редких элементов. Вместе с тем, необходимо отметить, что на начальном этапе гиперколлизии литосферных плит в очаги магмообразования вовлекались не только древние блоки разного состава и происхождения, но и метаморфизованные нижнепалеозойские базитовые комплексы океанической и островодужной стадий. Доля последних существенно сокращалась при нарастании роли богатых фтором и редкими элементами (Be, Ta, Li и др.) более глубинных и древних метаморфических образований. При этом происходило селективное выплавление все более кислых и богатых калием анатектических гранитных магм, с нарастающим участием древнего субстрата.

Установлено [Ферштатер и др., 1994], что граниты на Среднем Урале, в составе северо-западного мегаблока, характеризуются коровым отношением $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, относительно высокотемпературными парагенезисами. Это, по-видимому, связано с выплавлением их из кристаллических сланцев доуральского (рифейского) платформенного фундамента. В то же время граниты на Южном Урале, в составе юго-восточного мегаблока, имеют более низкотемпературные парагенезисы, обусловленные водным палингенезом слабее метаморфизованных и богатых водой толщ, которые в своей основе образованы в ходе развития Уральского подвижного пояса. В связи с такими особенностями в составе субстрата, перспективы Среднего Урала (севе-

ро-западный мегаблок) на наличие редкометального оруденения, связанного с коровым гранитоидным магматизмом, будут более предпочтительными, чем Южного (юго-восточный мегаблок). Это подтверждается фактическим наличием более рудоносных массивов на Среднем Урале (Адуйский, Мурзинский, Шилово-Коневская группа и др.).

Таким образом, поведение бериллия в гранитном расплаве, также как поведение других редких металлов (Li, Rb, Nb, Ta и др.), в значительной степени совпадает с поведением фтора, определяющим возможность их совместно концентрирования в остаточном расплаве, богатом щелочами и кремнеземом. Последующий вынос фтора с эманациями из такого специализированного остаточного расплава происходит с преимущественным участием только самых легколетучих фторидных комплексов редких элементов, в первую очередь фторидных комплексов бериллия и редких щелочей.

В целом, необходимо отметить, что в связи с существенной долей молодого базитового субстрата в составе Урала, лейкограниты последнего, в сравнении с редкометальными лейкогранитами и аляскитами других регионов (Казахстана, Монголии, Забайкалья), характеризуются более слабой степенью специализации на фтор, бериллий, олово и другие редкие элементы. Это и проявляется в менее значительном

масштабе редкометального оруденения, в целом, на Урале.

Список литературы

- Беус А.А., Диков Ю.П.* Геохимия бериллия в процессе эндогенного минералообразования (на основе гидротермального эксперимента). М.: Недра, 1967. 160 с.
- Бушляков И.Н., Григорьев Н.А.* Бериллий в гранитоидах Урала. Екатеринбург, 1994. 230 с.
- Бушляков И.Н., Холоднов В.В.* Галогены в петрогенезисе и рудоносности гранитоидов. М.: Наука, 1986. 190 с.
- Бушляков И.Н.* К оценке содержаний галогенов в гранитоидных расплавах // Геохимия. 2000. № 4. С. 445–448.
- Закономерности формирования гидротермальных месторождений бериллия / Гинзбург А.И., Заболотная Н.П., Куприянова И.И. и др.* М.: Недра, 1977. 230 с.
- Когарко Л.Н., Рябчиков И.Д.* Летучие компоненты в магматических породах // Геохимия. 1978. № 9. С. 1293–1321.
- Когарко Л.Н., Кригман Л.Д.* Фтор в силикатных расплавах и магмах. М.: Наука, 1981. 125 с.
- Краснобаев А.А., Кузнецов Г.П., Давыдов В.А.* Возраст и происхождение гнейсов челябинского комплекса // Доклады РАН. 1998. Т. 360. № 3. С. 386–389.
- Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Рапопорт М.С. и др.* Орогенный гранитоидный магматизм Урала. Миасс: Объединенный институт «Ильменский завод» УрО РАН, 1994. 350 с.