

Л. В. ТАУСОН

О ФОРМАХ НАХОЖДЕНИЯ НЕКОТОРЫХ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

(Представлено академиком А. П. Виноградовым 16 II 1954)

Изучению геохимии редких и рудных элементов в изверженных горных породах в последнее время уделяется большое внимание. Однако до последнего времени вопросы геохимии редких элементов в изверженных горных породах решались исключительно с позиций изоморфизма. При этом, пожалуй, единственным методом достаточно детального исследования геохимии редких элементов в породах являлось изучение их распределения по мономинеральным фракциям породы и выявление специфических минералов-концентраторов.

В настоящее время уместно поставить вопрос о том, что решение этой проблемы только с позиций изоморфизма недостаточно. Особенно это касается группы рудных элементов (Cu, Pb, Mo, W, Sn, Hg и др.), для которых ограниченность их изоморфных возможностей в породообразующих минералах определяется, видимо, тем, что они, в отличие от петрогенных элементов, не могут образовывать в силикатах соединений с ионным типом связи. Например, В. М. Гольдшmidt⁽²⁾ уже довольно давно высказывал предположение, что свинец в изверженных горных породах присутствует главным образом в виде галенита, подтверждающееся многими наблюдениями. Э. Б. Санделл и С. С. Голдич⁽⁶⁾ приходят к выводу, что медь в вулканических породах Мичиганского медного района находится главным образом в форме сульфидов. Х. Нейман⁽⁴⁾ в результате кристаллохимического анализа силикатных соединений цинка указывает на ограниченность изоморфных возможностей этого элемента в железомagneзиевых силикатах.

Для олова факт его нахождения в породах в виде касситерита (SnO_2) хорошо известен. Достаточно хорошо известны граниты с акцессорным молибденитом.

Таким образом, наблюдающиеся факты, а также анализ изоморфных возможностей редких и рудных элементов в породообразующих минералах изверженных горных пород показывают, что для ряда элементов, особенно рудных, силикатная форма их нахождения в породах в виде изоморфной примеси в породообразующих минералах не может считаться единственной.

Рассматривая вопрос о других формах нахождения редких элементов в изверженных горных породах, необходимо прежде всего обратиться к тем представлениям о рассеянии элементов, которые были сформулированы В. И. Вернадским еще в 1910 г. Развивая эти представления, В. И. Вернадский указывал: «За учитываемыми нами молекулами или пространственными решетками атомов (т. е. кристаллами) — вне их — находятся еще мириады свободных, движущихся атомов, которые в наших анализах оказываются ничтожными дробями весовых процен-

тов» (1). В качестве примера элементов рассеяния он приводил иод, бром, радиоактивные элементы и ряд других.

Сейчас уже можно говорить о том, что в изверженных горных породах атомы одного и того же химического элемента находятся в двух отличных друг от друга состояниях или формах нахождения. Одна часть атомов элемента, часто наибольшая, связана в решетках породообразующих минералов либо в виде основного компонента, либо в виде изоморфной примеси. Эта часть атомов элемента прочно связана в кристаллических постройках силикатов, малоподвижна и обретает способность к миграции только после разрушения или полного метаморфизма силикатной решетки и может быть названа силикатной формой нахождения элемента. Другая же часть атомов данного элемента не входит в решетки породообразующих минералов ни в качестве главного компонента, ни как изоморфная примесь. Эта часть атомов образует соединения простейшего состава (окислы, сульфиды и др.) и по положению в породе резко отличается от силикатной формы. Внесиликатная форма нахождения элементов часто характеризуется большей подвижностью и высокой миграционной способностью. Минералогически эта форма нахождения охватывает ряд образований, начиная от специфических акцессорных минералов (касситерит, магнетит, рутил, пирит, галенит и т. д.), образуя субмикроскопические выделения этих или аналогичных им минералов простейшего состава и доходя до состояния молекулярного и атомного рассеяния, о котором говорил В. И. Вернадский.

Отличие этих двух форм нахождения атомов химических элементов в изверженных горных породах может быть продемонстрировано на примере даже такого распространенного элемента, как железо.

Хорошо известно, что часть атомов этого элемента входит в качестве одного из главных компонентов в решетку породообразующих минералов — силикатов (биотит, роговая обманка и др.). В этом случае железо прочно связано, и его освобождение возможно только после разрушения решетки соответствующих силикатов. Это отвечает тому понятию, которое вкладывается в представление о силикатной форме нахождения элемента.

С другой стороны, во многих изверженных породах железо встречается, с одной стороны, в виде магнетита (Fe_3O_4) и пирита (FeS_2), а с другой — в виде тонко распыленного гематита (Fe_2O_3) в полевых шпатах. В последнем случае, как было показано С. М. Курбатовым и Л. Л. Солюдовниковой (3), железо может быть легко извлечено (выщелочено) из полевых шпатов слабым раствором соляной кислоты без нарушения целостности кристаллической решетки этих минералов. Совершенно ясно, что атомы железа, находящиеся в породе вне решеток силикатов в таком относительно свободном состоянии, достаточно подвижны, и для их удаления из породы не требуется разрушения решеток силикатов. Это отвечает тому понятию, которое вкладывается в представление о внесиликатной форме нахождения элемента.

То же может быть продемонстрировано и для других, более редких элементов.

Часть олова, безусловно, находится в гранитоидах в виде силикатной формы — изоморфной примеси в железо-магнелевых силикатах (биотит). При этом чем больше в гранитоиде магния (биотита), тем больше олова связано в решетках силикатов и тем меньшее его количество остается в виде внесиликатной, главным образом окисной, формы. Минералогическим выражением внесиликатной формы является и видимый касситерит, хотя он, вероятно, составляет только часть этой формы нахождения олова. Последнее косвенно подтверждается данными И. Оттемана (5). Значительная доля внесиликатного олова будет, видимо, представлена субмикроскопическими выделениями касситерита. К внесиликатной форме нахождения должны быть отнесены и выделения сульфидов свинца, меди и других рудных элементов, встречающихся иногда в породах и, вероят-

но, в своей основной части пока невидимые. Таким образом, анализ явлений изоморфизма⁽⁸⁾ и ряд известных уже фактов дают возможность предполагать, что в изверженных горных породах и прежде всего в гранитоидах некоторые редкие и особенно рудные элементы, находятся в виде двух основных форм: силикатной и внесиликатной.

Состав выделений последней зависит прежде всего от особенностей строения атомов элементов. Внесиликатная форма нахождения элементов, обладающих большим сродством к кислороду, должна быть представлена в основном простейшими кислородными соединениями (в частности, окислы Fe, Sn и др.). Для элементов, обладающих большим сродством к сере, эта форма должна быть представлена сульфидами (Pb, Zn и т. д.). Наконец, внесиликатная форма нахождения ряда элементов, характеризующихся слабой химической активностью, должна быть представлена самородными выделениями (золото, платина). Наиболее существенной особенностью внесиликатной формы нахождения элементов является ее подвижность и возможность извлечения и удаления ее из породы специфическими растворителями (природными и искусственными) без разрушения решеток порообразующих минералов.

Извлечение из породы внесиликатной формы того или иного элемента специфическими растворителями дает в руки геохимиков новый метод исследования. Проведение подобных опытов показало, что в ряде случаев возможно внесиликатную форму элемента извлекать из породы почти нацело, не разрушая решеток порообразующих минералов. В частности, предварительные данные по выщелачиванию свинца показали, что этот элемент в некоторых гранитоидах на 70—80% находится в виде внесиликатной (видимо, сульфидной) формы. Однако высказанные предположения пока подкреплены только предварительными опытами и требуют детальной экспериментальной проверки.

С другой стороны, представление о внесиликатной форме нахождения элементов требует более внимательного изучения явлений изоморфизма. Представляется, что в круг понятий изоморфизма должно быть введено представление об изоморфной емкости минералов, ибо уже сам факт существования внесиликатной формы свидетельствует о том, что изоморфная емкость минералов — концентраторов данного элемента является ограниченной. Последнее может быть с успехом продемонстрировано на примере олова. Несмотря на то, что олово в гранитах обычно содержится в очень малых количествах (10^{-3} — $10^{-4}\%$), только часть его входит изоморфно в решетку биотита. После достижения предела изоморфного насыщения олово в биотит больше входить не может, и избыток его сбрасывается в виде выделений внесиликатной формы (в частности, касситерита).

Естественно возникает вопрос — почему же все олово не могло войти в решетку биотита? Представляется, что и в данном случае биотит, обладая определенной изоморфной емкостью в отношении олова, после достижения предела изоморфного насыщения не мог принять в свою решетку дополнительное количество атомов этого элемента.

Изучение изоморфной емкости минералов — концентраторов редких элементов в зависимости от разных условий среды, химического состава и хода дифференциации магматического очага даст возможность подойти ближе к выявлению законов распределения редких элементов при процессах кристаллизации магматического очага.

В целом имеющийся материал позволяет сделать следующие выводы.

1. Атомы большинства химических элементов в изверженных горных породах находятся в двух формах нахождения: силикатной и внесиликатной. К атомам данного элемента, имеющим силикатную форму нахождения, относится та их часть, которая входит в состав решетки силикатов как основной компонент или изоморфная примесь. Остальная часть атомов данного элемента, не вошедшая в решетки силикатов и образо-

вавшая макроскопические, микроскопические и субмикроскопические выделения простейших соединений (главным образом окислы и сульфиды), должна быть отнесена к внесиликатной форме нахождения.

2. Понятие о двух формах нахождения атомов химических элементов в изверженных горных породах может помочь решению вопросов о роли рудного вещества вмещающих пород в гидротермальном процессе, потенциальной рудности интрузий и т. д.

3. Существование двух форм нахождения атомов химических элементов требует более глубокого изучения явлений изоморфизма в минералах изверженных горных пород с точки зрения их изоморфной емкости, которая может помочь выявлению геохимических особенностей процессов кристаллизации пород.

Институт геохимии и аналитической химии
им. В. И. Вернадского
Академии наук СССР

Поступило
16 II 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. И. Вернадский, Отчет о деятельности Академии наук за 1926 г., 1927, стр. 1—15. ² V. M. Goldschmidt, *Nature*, 4 (1937). ³ С. М. Курбатов, Л. Л. Солодовникова, Тр. Гос. исслед. керамич. инст., в. II (1928). ⁴ H. Neumann, *Min. Mag.*, 28, 205 (1949). ⁵ I. Otteman, *Zs. f. angew. Mineralog.*, 3, H. 2, 142 (1940). ⁶ Э. Б. Санделл, С. С. Голдич, Сборн. Редкие элементы в изверженных горных породах и минералах, ИЛ, 1952, стр. 183—227. ⁷ А. А. Сауков, Тр. ИГН АН СССР, в. 78 (1946). ⁸ Л. В. Таусон, Сборн. Вопросы петрографии и минералогии, 1, Изд. АН СССР, 1953, стр. 53—65.