

Член-корреспондент АН СССР Л. В. ТАУСОН

## О МЕХАНИЗМЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГИПАБИССАЛЬНЫХ ИНТРУЗИЙ

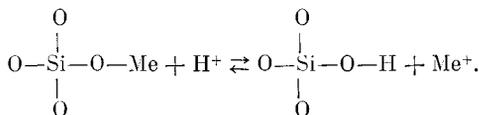
Геохимическая история редких элементов в магматическом процессе определяется двумя основными тенденциями. Большая часть атомов редких элементов рассеивается в решетках породообразующих и акцессорных минералов при их кристаллизации и, таким образом, захороняется в образующихся изверженных горных породах (кристаллизационное рассеяние).

Меньшая часть атомов этих элементов, образуя устойчивые соединения с летучими компонентами, мигрирует вместе с ними при дифференциации и кристаллизации магм, в результате чего может происходить концентрирование летучих и связанных с ними редких элементов в определенных частях интрузий (эманационное концентрирование).

При анализе явления эманационной миграции вещества в магматических процессах геохимия летучих ( $H_2O$ ,  $Cl$ ,  $F$ ,  $CO_2$ ,  $S$ ,  $B$ ) рассматривается преимущественно с точки зрения их роли как транспортных агентов для петрогенных, рудных и редких элементов. Это значение летучих компонентов бесспорно. Однако не менее важна роль некоторых из них ( $H_2O$  и  $F$ ) как модификаторов силикатных расплавов.

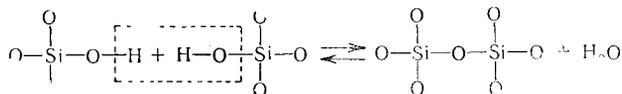
Как известно, экспериментальные исследования Р. В. Горансона, Н. И. Хитарова, К. В. Бернема и др. показали значительную растворимость воды в силикатных расплавах, достигающую при высоких температурах и давлениях 14%.

Растворение воды в силикатных расплавах, по-видимому, осуществляется разными путями. Одной из причин растворения воды может являться реакция протонно-катионного обмена, протекающая по схеме:



Однако протонно-катионный обмен может осуществляться преимущественно на концевых связях кремнекислородной сетки расплава и поэтому не будет существенно влиять на его структуру. Между тем известно, что при растворении воды структура силикатных расплавов меняется, о чем можно судить по изменению их вязкости. Если вязкость «сухого» гранитного расплава при  $1200^\circ$  составляет  $n \cdot 10^8$  пуаз, то при 3 вес. %  $H_2O$  она составляет  $n \cdot 10^{4,5}$  пуаз, а при 10 вес. % — всего  $10^{2,8}$  пуаз<sup>(3)</sup>.

Эта модифицирующая роль воды, при ее растворении в силикатных расплавах, может осуществляться при реконденсации сложных кремнекислородных цепей в силу обратимости реакций поликонденсации:



При течении этой реакции в левую сторону (процесс растворения воды)

происходит разрыв связей в кремнекислородных цепях по мостиковому кислороду, что и ведет к их реконденсации.

Изучение растворимости в силикатных расплавах F показало, что этот элемент, по-видимому, также способен играть роль активного модификатора. Однако он, вероятно, не может внедряться на место мостикового кислорода и скорее замещает концевые кислороды кремнекислородных групп, чем затрудняет развитие процесса поликонденсации.

Модифицирующая роль  $H_2O$  и F в отношении структуры силикатных расплавов имеет большое петрогеническое значение. Оно проявляется не только в резком уменьшении вязкости расплавов, но и в значительном понижении температуры их кристаллизации (на  $200-250^\circ$ ). Поэтому в местах скопления этих летучих компонентов можно ожидать формирования «низкотемпературных» расплавов, весьма подвижных в силу их малой вязкости и кристаллизующихся при более низких температурах.

Масштабы и интенсивность процессов эманационного концентрирования, ведущего к формированию областей «низкотемпературных» расплавов в теле интрузий, определяется их составом, размерами, формой, глубиной становления и проницаемостью кровли.

С этой точки зрения все интрузии можно подразделить на три большие группы: абиссальные батолиты, мезоабиссальные батолиты и гипабиссальные интрузии. С максимальной интенсивностью процессы эманационного концентрирования протекают в гипабиссальных интрузиях, ибо в них достигается наибольшая величина градиента давления летучих фаз.

При рассмотрении геохимической истории летучих и связанных с ними редких элементов в гипабиссальных интрузиях необходимо выделять и раздельно рассматривать закономерности поведения этих элементов на этапах их становления и кристаллизации.

Процесс становления таких интрузий неизбежно сопровождается подтоком летучих и связанных с ними редких элементов в апикальные части этих магматических тел. Иногда это эманационное концентрирование редких элементов, протекающее на магматическом этапе, приводит к очень значительному обогащению апикальных частей интрузий некоторыми элементами. Например, по наблюдениям Н. С. Кравченко, в Верхнеурмийском гранитном массиве (Дальний Восток) содержание Sn в апикальной части составляет  $25 \mu\text{г/г}$ , а в глубинных частях (на 800 м ниже кровли интрузии) — всего  $5,8 \mu\text{г/г}$  (?). Кроме Sn, в апикальных частях интрузий наблюдается интенсивное концентрирование таких элементов как Li, Rb, Be, W, Nb, Ta и др.

Такое эманационное концентрирование ряда редких элементов в апикальных частях гипабиссальных интрузий приводит не только к многократному увеличению их содержаний, создавая иллюзии «металлогенической специализации» магм, но в еще большей степени (в  $10-15$  раз) увеличивает в этих частях интрузий дисперсию концентраций редких элементов.

Однако еще более важным является то, что при условиях резкого повышения в апикальных частях уровня содержания летучих, и прежде всего  $H_2O$  и F, здесь будет происходить интенсивная модификация расплавов, выражающаяся в реконденсации кремнекислородной сетки расплава и приводящая к понижению их вязкости и — самое главное — к понижению температуры их кристаллизации. Это понижение температуры, в случае высоких содержаний  $H_2O$  и F, по-видимому, может быть очень значительным.

Изучение жильных дериватов гипабиссальных интрузий с высоким уровнем летучих показало, что существование расплавов с такими высокими содержаниями F вполне возможно. В дайке кварцевых порфиров в Верхне-Ингодинской интрузии (Восточное Забайкалье) содержание F превышает 2%, а в дайках литий-фтористых кварцевых кератофиров (онгонитов), найденных в Восточной Монголии, содержание F достигает 2,6%.

Возможность образования в апикальных частях гипабиссальных интрузий, богатых летучими, «низкотемпературных» расплавов, кристаллизующихся при температурах на 200—250° более низких, чем обычные расплавы, определяет ряд особенностей механизма кристаллизации таких интрузий. Эти особенности проявляются в наибольшей степени для интрузий, характеризующихся высоким уровнем содержания летучих, и прежде всего H<sub>2</sub>O и F.

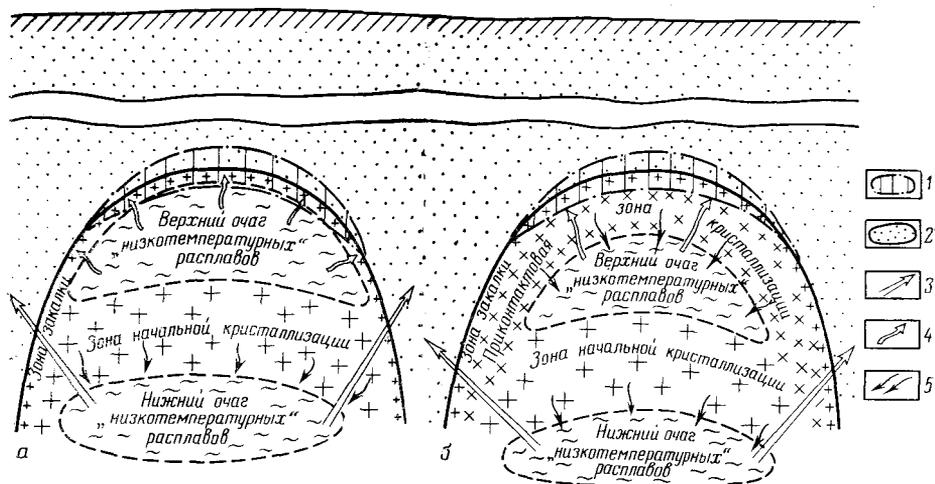


Рис. 1. Схема кристаллизации гипабиссальных интрузий с высоким (а) и средним (б) уровнем содержания летучих. 1 — зона высокотемпературных рудных концентраций, 2 — эманационный ореол во вмещающих породах, 3 — направление движения гидротерма, 4 — то же высокотемпературных рудных флюидов, 5 — то же летучих на этапе кристаллизации

Как видно на рис. 1, в этих интрузиях, после образования зоны закалки, в апикальной части возникает область «низкотемпературных» расплавов, в результате чего дальнейшая кристаллизация происходит на некоторой глубине (зона «начальной кристаллизации»). С этого момента — благодаря существованию такого кристаллического барьера — летучие, оставшиеся ниже его, в ходе дальнейшей кристаллизации начнут отжиматься в глубинные части интрузии, создавая там по крайней мере еще одну зону «низкотемпературных» расплавов. Таким образом, в процессе кристаллизации гипабиссальных интрузий с высоким уровнем летучих в магматической камере возникает по меньшей мере две области низкотемпературных расплавов: одна в апикальной части интрузии, другая — в глубинных ее частях.

В ходе дальнейшей кристаллизации летучие, находящиеся в апикальной части, будут стремиться покинуть ее и в ближнем экзо- и эндоконтакте интрузии будут способствовать образованию высокотемпературных рудных концентраций (скарны, грейзены и т. д.).

В глубинных частях интрузий, в условиях пересыщения «низкотемпературных» расплавов летучими, будут возникать не смешивающиеся с силикатным расплавом солевые и водные флюидные фазы, дающие начало гидротермальным растворам. Вскрытие этих очагов дизъюнктивными дислокациями приведет к выводу гидротермальных растворов в верхние, чаще дальние, экзоконтактные зоны интрузии.

Весьма убедительным примером существования двух продуктивных уровней является Хапчерангинская интрузия (Восточное Забайкалье), с верхней частью одного из куполов которой связано «Гранитное» грейзеновое оловянное месторождение, а с глубинной частью этого же купола —

известное Хапчерангинское месторождение сульфидно-касситеритовых руд. Глубина нахождения источника гидротермальных растворов, генерировавших эти руды, по предположению Ю. П. Трошина (<sup>4</sup>), составляет 1,5 км. Другим примером двухъярусного распределения очагов рудных растворов может являться всемирно известный Корнуолл. По данным В. В. Аристова и др. (<sup>1</sup>), наличие двух очагов рудоносных растворов, располагающихся на различных уровнях, можно предполагать для Шерловой Горы и ряда других месторождений Восточного Забайкалья.

Отмеченная особенность кристаллизации гипабиссальных интрузий наиболее ярко проявляется в случае кислых гранитоидных магм, в которых К преобладает над Na и содержание F достигает 0,3—0,4%.

При меньших уровнях содержания F (0,15—0,2%) образование верхнего очага «низкотемпературных» расплавов, по-видимому, происходит не сразу. В случае таких интрузий вслед за образованием зоны закалки происходит кристаллизация в приконтактной зоне, благодаря чему часть летучих, находившихся в кровле интрузии, отжимается в более глубокие горизонты ее апикальной части, создавая здесь верхний очаг «низкотемпературных» расплавов. После образования этого очага дальнейшая кристаллизация интрузии продолжается под ним, на некоторой глубине. Возникновение кристаллического барьера, как и в первом случае, ведет к отжиманию летучих в глубинные части интрузии и образованию очага «низкотемпературных» расплавов.

Таким образом, отличие такого типа интрузий будет заключаться, прежде всего, в более глубоком залегании очагов «низкотемпературных» расплавов, из которых могут генерироваться рудоносные растворы. Вместе с тем, более глубокое залегание верхнего очага «низкотемпературных» расплавов, вероятно, обуславливает развитие в связи с ним большего спектра типов рудных концентраций, и в частности образование мощных штокерков.

Концентрирование летучих в апикальных частях гипабиссальных интрузий приводит еще к одному важному явлению. На этапе становления таких интрузий в предкристаллизационный период их существования в породах, находящихся над кровлей интрузии, возникают довольно мощные эманационные ореолы ряда редких элементов и F. В случае интрузий, обогащенных F, в их эманационном ореоле, часто хорошо повторяющем контур подземной кровли интрузии, весьма характерны Sn, Li, Rb, Cs, F и в несколько меньшей степени W и Mo. В интрузиях же с более низким уровнем содержания F, но обогащенных Cl, в эманационном ореоле значительно усиливается роль Mo, Cu, Pb, Zn, Hg. В случае проникновения эманаций по трещиноватым зонам в надинтрузивных толщах могут образовываться области предрудного привноса рудного вещества. Однако возникающие таким образом аномальные концентрации рудных и редких элементов не могут являться показателями существования рудных концентраций и в этом отношении будут затруднять расшифровку первичных ореолов, связанных с рудными телами.

Поступило  
18 I 1972

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. В. Аристов и др., Комплексные геолого-геофизические исследования рудных районов, 1969. <sup>2</sup> И. Н. Г о в о р о в и др., Сборн. Геохимические критерии потенциальной рудоносности гранитоидов, 1970. <sup>3</sup> А. А. К а д и к, Н. И. Х и т а р о в, Геохимия, № 9 (1969). <sup>4</sup> Ю. П. Т р о ш и н, Ежегодник-1970 СибГЕОХИ, Иркутск, 1971.