

УДК 552.11+552.3

## СИЛИКАТНЫЕ СИСТЕМЫ, ПРИБЛИЖЕННО МОДЕЛИРУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ МАГМАТИЧЕСКОГО ПЕТРОГЕНЕЗИСА

В.В.ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Существенной стороной физико-химической теории процессов магматического петрогенезиса является сопоставление данных по вещественному составу горных пород – членов природных ассоциаций – и экспериментальных данных по составу продуктов эволюции и кристаллизации расплавов в модельных силикатных системах. Один из методов такого сопоставления, предложенный А.Н.Заварицким [2], заключается в том, что для рассматриваемой модельной системы составы эволюционирующих в ходе кристаллизации расплавов пересчитываются на числовые характеристики и пути кристаллизации отсражаются на диаграмме – проекции тетраэдра – так же, как химические составы магматических пород.

Самым А.Н.Заварицким такой пересчет был выполнен для нескольких силикатных систем, экспериментально изученных к концу 30-х годов. Уже эти первые результаты позволили ему провести важные аналогии путей кристаллизации в системах и эволюционных рядов в естественных ассоциациях вулканических пород. За прошедшее со времени публикации работы А.Н.Заварицкого время экспериментально изучен значительный ряд силикатных систем, имеющих значение для магматической петрологии, и приложение к ним указанной методики позволит нагляднее выявить закономерности, определяющие возможные пути дифференциации и эволюции магматических расплавов.

Системы, моделирующие процессы петрогенезиса магматических пород, отличаются значительной сложностью и большим числом компонентов. Даже если полностью отбросить все малые компоненты, для достаточно полного моделирования процессов магматической кристаллизации следовало бы обратиться к девятикомпонентной системе  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ .

Ввиду сложности указанной системы приходится прибегать к упрощению и уменьшению числа компонентов в модельных системах, что может быть достигнуто следующими способами:

1. Ограничением числа компонентов петрогенными. Исключение  $H_2O$  вносит довольно существенные изменения в ход кристаллизации, особенно для магматических систем, соответствующих породам среднего и кислого составов; для составов, соответствующих основным и ультраосновным породам, влияние менее значительно (в частности, обычные для этих пород оливины и пироксены не содержат в своем составе летучих компонентов и кристаллизуются из сухих расплавов).

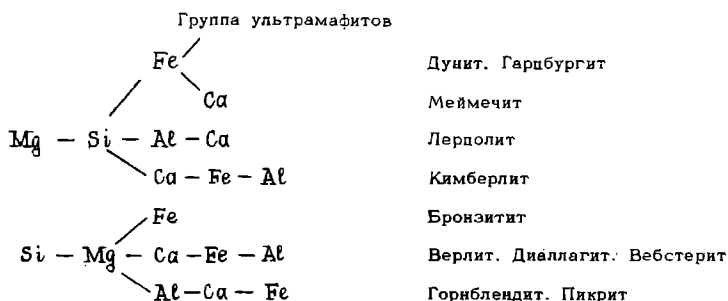
2. Ограничением окислительно-восстановительных условий (исключением одной из степеней окисления железа). Для систем, в которых отсутствуют щелочи, самостоятельной фазой, содержащей  $Fe_2O_3$ , является в основном магнетит. В случае присутствия щелочей самостоятельное значение  $Fe_2O_3$  возрастает (появление эгирина и других сложных по составу фаз) и системы с компонентом  $Fe_2O_3$  приобретают особое значение при рассмотрении процессов в щелочных магмах.

3. Исключением изоморфных компонентов. Учитывая совершенный изоморфизм  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  в магматических системах, при рассмотрении субсолидных соотношений и стхастии равновесий с участием расплава можно, с известными оговорками, рассматривать чисто магниезиальные системы. Изоморфные отношения ярко проявлены в ряду плагиоклазов. Если  $Na_2O$  входит только в состав плагиоклаза, этот компонент можно исключить, условно заменяя плагиоклаз анортитом.

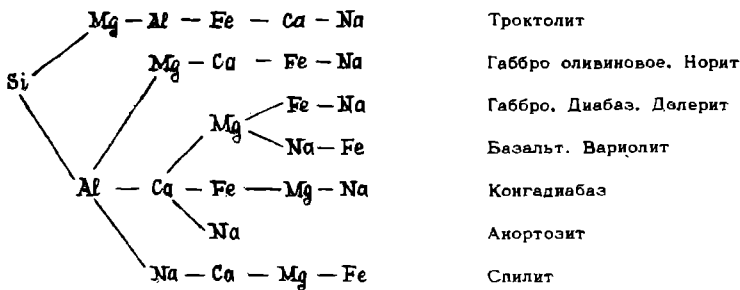
4. Ограничением составов лишь определенными химическими группами, соответствующими типичным породам выбранных магматических формаций. Такое ограничение может существенно упростить рассматриваемые системы и уменьшить число компонентов, сказывающих влияние на ход кристаллизации и образование главных минералов. Для иллюстрации этого ограничимся тремя петрохимическими группами магматических пород: ультраосновными породами, основными породами нормального ряда и основными породами щелочного ряда.

Особенности химизма горных пород для наших целей удобно представить с помощью ранговых формул, предложенных Т.Г.Петровым [4]. Мы будем использовать ранговые формулы несколько упрощенного вида, включая в них лишь те элементы, атомная доля которых в породе превышает 1%. За исходные данные взяты средние составы горных пород СССР по С.П.Солсвьеву [6]. Практически для получения сокращенной ранговой формулы целесообразно использовать петрохимические формулы горных пород, рассчитанные по А.А.Маракушеву на 50 атомов кислорода; коэффициенты в этих формулах достаточно близки к значениям атомных долей, выраженных в процентах [5].

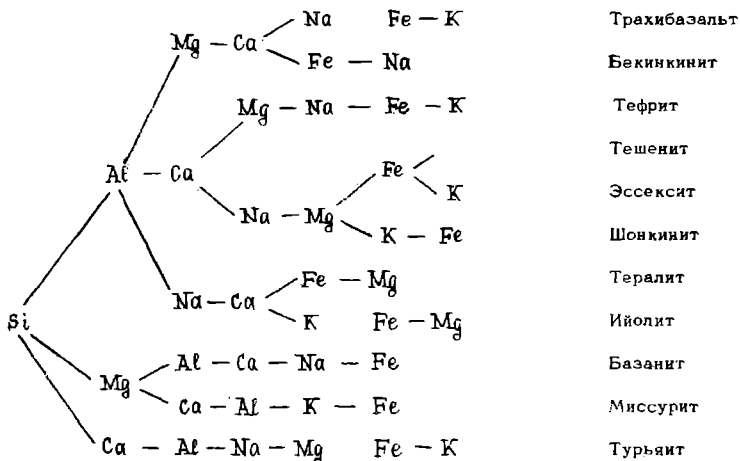
Для качественного сравнения составов горных пород определенной группы оказывается удобным не выписывать отдельно ранговые формулы каждой породы, а объединять общие члены этих формул с образованием ранговых графов - деревьев, как это показано ниже для трех групп, где каждая ветвь соответствует одной или нескольким породам:



Группа габбро - базальта



Группа щелочных габброидов и базальтоидов



Дерево группы ультраосновных пород показывает, что их составы могут быть отображены в рамках шестикомпонентной системы  $CaO - MgO - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ . Учитывая сказанное выше о возможных путях уменьшения числа компонентов в модельных системах, для этой группы скажутся существенными пятикомпонентные системы:  $CaO - MgO - FeO - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $CaO - MgO - FeO - Fe_2O_3 - SiO_2$ ,  $CaO - MgO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ , и четырехкомпонентные системы:  $CaO - MgO - FeO - SiO_2$ ,  $MgO - FeO - Fe_2O_3 - SiO_2$ ,  $CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

Для группы габбро - базальта полной моделью служит семикомпонентная система  $Na_2O - CaO - MgO - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ , из которой при аналогичных упрощениях можно прийти к пятикомпонентной  $Na_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$  и четырехкомпонентным:  $CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $Na_2O - CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $Na_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

Наконец, для щелочных габброидов и базальтоидов полная модель охватывается восьмикомпонентной системой  $K_2O - Na_2O - CaO - MgO - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ . Следует еще учесть, что ореди пород этой группы выделяются

достаточно четко два ряда - калиевый и натриевый. При этом, как указал А.Н.Заварицкий, породам калиевого ряда свойственна в общем повышенная магнезиальность. С учетом сказанного, для калиевого ряда приходим к пятикомпонентной системе  $K_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$  и четырехкомпонентным системам:  $K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $K_2O - CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $K_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2$ . Для натриевого ряда существенны пятикомпонентные системы:  $Na_2O - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $Na_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ , и четырехкомпонентные:  $Na_2O - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ ,  $Na_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2$ . Наконец, калиево-натриевые составы (без оксидов железа) описываются модельной системой из шести компонентов:  $K_2O - Na_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

Необходимо подчеркнуть, что все перечисленные выше системы далеко не в полном объеме одинаково существенны для моделирования магматических процессов. В каждой системе можно выделить определенную область, как правило, ограниченную составами породообразующих минералов, за пределы которой составы, моделирующие магматические процессы, обычно не выходят. Например, в системе  $CaO - MgO - SiO_2$  важной для моделирования магматических процессов частью является треугольник форстерит - диопсид - кремнезем. Такие ограничения естественны и обусловлены спецификой состава исходного материала - мантийного вещества. Дополнительные ограничения накладываются на системы, содержащие щелочи  $Na_2O$  и  $K_2O$ . Установленная Д.С.Коржинским подвижность щелочей, в магматических процессах приводит к фактическому снижению числа виртуальных компонентов, так что, например, в системе  $Na_2O - K_2O - Al_2O_3 - SiO_2$  достаточным оказывается рассмотрение сечения, отвечающего «остаточной» системе нефелин - кальсилит - кремнезем. С учетом указанных ограничений рассмотрим некоторые из перечисленных систем.

В тексте и на диаграммах использованы следующие сокращения: Аб - альбит, Ан - анортит, Гед - геденбергит, Гем - гематит, Ди - диопсид, Кв - кристаллические фазы кремнезема, Ко - корунд, Кп - клинопироксены, Ле - лейцит, Ме - мелилит, Не - нефелин, Нс - дисиликат натрия, Оп - ортопироксены, Ор - калиевый полевой шпат, Пи - пижонит, Пл - плагисклазы, Фа - фаялит, Фб - ферробустамит, Фо - форстерит, Шп - шпинель, Эг - эгирин, Эн - энстатит, Ж - две жидких фазы. Диаграммы систем приведены с некоторыми упрощениями.

Система  $Na_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ . Эта пятикомпонентная система имеет очень большое значение для понимания процессов магматического петрогенезиса для пород как нормального, так и щелочного ряда. Прежде всего к этой системе принадлежит «базальтовый тетраэдр» Аб-Ан-Ди-Фо [3], в первом приближении моделирующий процессы кристаллизации базальтоидных расплавов. Проекция  $abs$  и  $cbs$  основного элемента этого тетраэдра - котектической линии Пл+Ди+Фо приведены на рис. I в схематическом виде (в линейном приближении) вместе с проекциями краевых систем Ан-Ди-Фо и Аб-Ди-Фо. Проекция котектики  $\ell_1 - \ell_2$  в общем близка к построенным А.Н.Заварицким проекциям котектики системы Аб-Ан-Ди; общее направление изменения состава такое же и оно соответствует обычному направлению

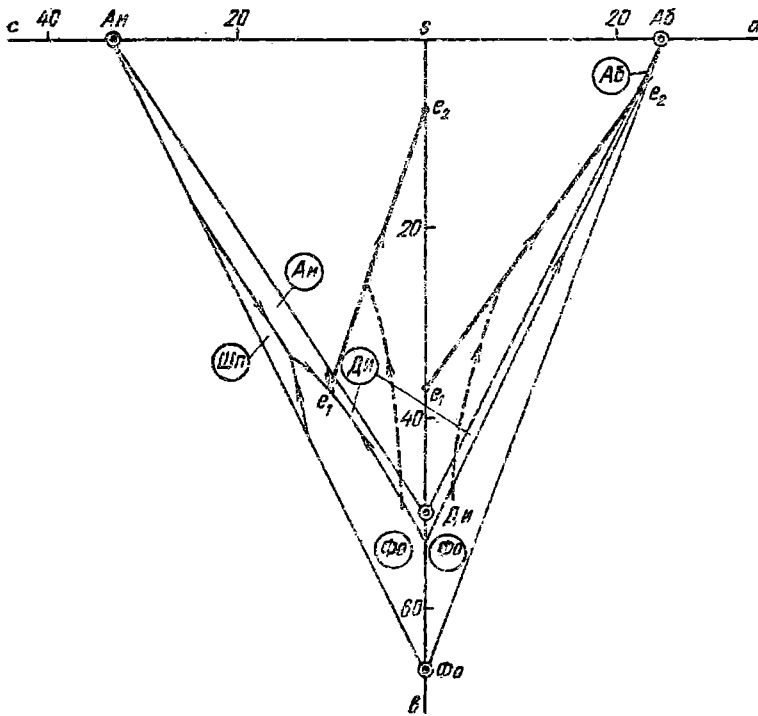


Рис.1. Система альбит - ортозит - диопсид - форстерит

дифференциации расплавов в базальтовых формациях. Конечно, пути кристаллизации расплавов соответствуют этой котектической линии лишь на заключительных стадиях; начальные стадии кристаллизации могут отображаться линиями, занимающими различное положение в зависимости от вариаций исходного состава, а также степени фракционирования. Одна из возможных линий изобрежеза на рис.1 пунктиром.

К процессам кристаллизации щелочных расплавов в первую очередь имеет отношение та часть системы  $Na_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ , которая обогащена  $Na_2O$  и составляет фазовый тетраэдр Не-Фс-Ди-Кв. В целом этот тетраэдр недостаточно изучен, но имеются данные по его крайним тройным системам, из которых рассмотрим системы Не-Ди-Кв [14] и Не-Фс-Кв [15]. Проекция на плоскость  $abz$  важнейших элементов системы Не-Ди-Кв показана на рис.2 пунктирными линиями. Особенности данной системы - появление форстерита как первично выделяющейся фазы для ряда составов, приближающихся к стороне Не-Ди, а также особая форма поверхности кристаллизации альбита, сказывающаяся и на граничных кривых Аб-Не и Аб-Кв. Из двух инвариантных точек Аб+Не+Ди и Аб+Кв+Ди только первой соответствует минимум температуры, вторая же точка является реакционной благодаря проявлению в этой системе «плагноклазового эффекта» Боуэна. В целом же направление кризис

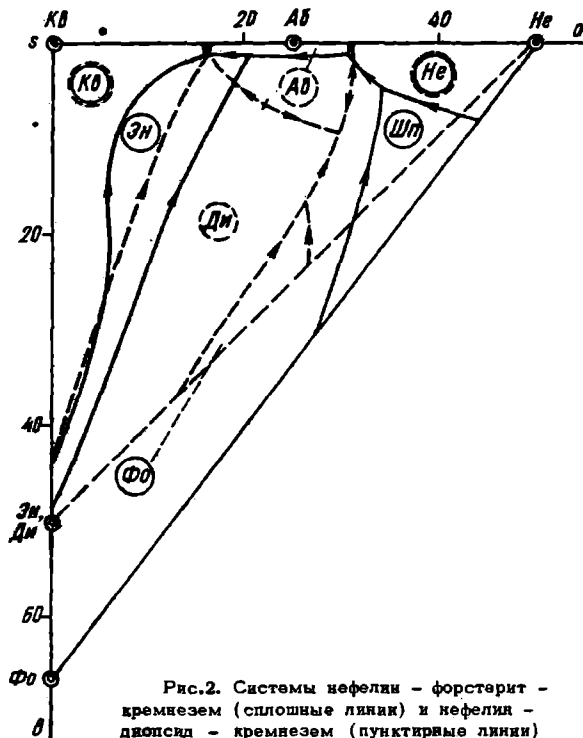


Рис.2. Системы нефелин - форстерит - кремнезем (сплошные линии) и нефелин - диопсид - кремнезем (пунктирные линии)

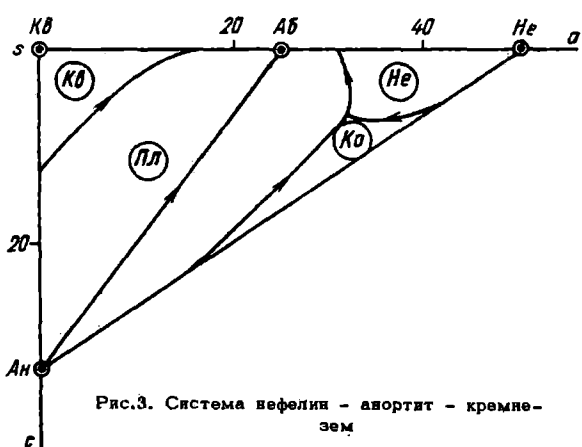


Рис.3. Система нефелин - аортит - кремнезем

на проекции иллюстрирует основную закономерность нормального хода кристаллизационной дифференциации: уменьшение в ходе кристаллизации параметра  $b$  и увеличение параметров  $a$  и  $s$ . Еще резче эта закономерность проявлена в системе  $He-Ф_0-Kb$  (рис.2, сплошные линии). Наиболее низкотемпературная область, включающая эвтектики  $He+Ab+Ф_0$  и  $Ab+Kb+Эн$  и реакционную точку  $Ab+Ф_0+Эн$ , тесно прилегает к оси  $sa$  диаграммы.

В системе  $Na_2O - CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ , не содержащей  $MgO$ , наибольший интерес представляет разрез  $He-Ан-Кв$  [13]. Поскольку в составах, соответствующих этому разрезу,  $CaO$  и  $Na_2O$  целиком связаны в алмосиликатах, для них  $b = 0$ , но зато появляется параметр  $c$ . Проекция системы  $He-Ан-Кв$  на плоскость  $acs$  показана на рис.3. Диаграмма иллюстрирует типичные изменения параметров числовой характеристики в ходе кристаллизации: уменьшение параметра  $c$  и возрастание параметра  $a$  (последнее в щелочных расплавах происходит до определенного момента, приблизительно

соответствующего началу совместной кристаллизации нефелина и плагиоклаза).

Система  $CaO - MgO - Fe - SiO_2$ . Ряд частных разрезов этой системы был рассмотрен и пересчитан на числовые характеристики еще А.Н.Заварицким. В четырехкомпонентной системе большой интерес представляет «ди-

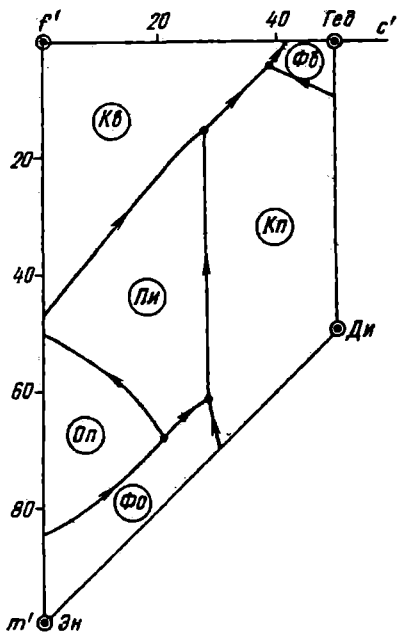


Рис.4. Система анстатит - ферросилит - диопсид - геденбергит

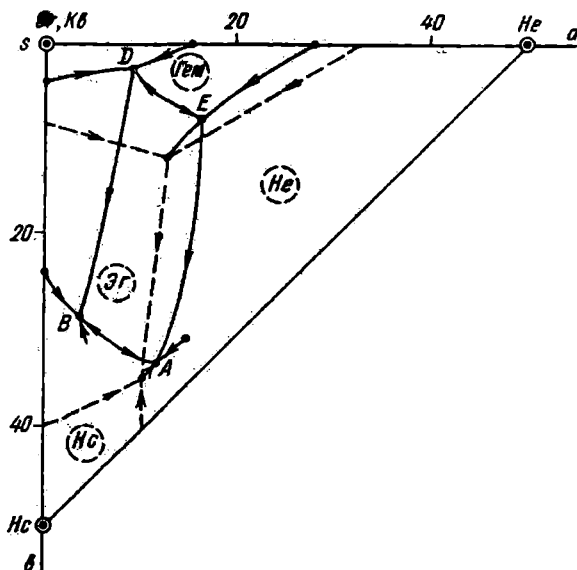


Рис.5. Система нефелин - эгирин - дисиликат натрия - кремнезем

роксеновый четырехугольник"  $MgSiO_3 - FeSiO_3 - CaMgSi_2O_6 - CaFeSi_2O_6$  [9]. Все составы системы  $CaO - MgO - FeO - SiO_2$  в тетраэдре Заварицкого располагаются на ребре  $bs$ , составы же «пироксенового четырехугольника» стягиваются в точку с  $z = 50, s = 50$ . Поэтому на первый план здесь выступают дополнительные характеристики  $f', m'$  и  $c'$ , позволяющие наглядно представить эволюцию пироксенов при их кристаллизации (рис.4). Направление линий на диаграмме указывает на общий ход эволюции, характеризующийся в целом уменьшением  $m'$  и увеличением  $c'$  и  $f'$ .

Система  $Na_2O - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - SiO_2$ . Эта система [7] по химизму и парагенезисам минеральных фаз занимает особое положение. Существенное петрологическое значение имеет в ней тетраэдр Эг-Не-Нс-Кв, который плоскостью Эг-Не-Аб делится на два частных тетраэдра - Эг-Не-Аб-Нс и Эг-Не-Аб-Кв. Пути кристаллизации расплавов, составы которых

попадают в указанные выше части системы, оканчиваются в эвтектических точках, в которых наряду с эгиринном, альбитом и нефелином (или кварцем) должен кристаллизироваться дисиликат натрия  $Na_2Si_2O_5$ . Отсутствие силикатов щелочей среди продуктов магматической кристаллизации щелочных пород можно объяснить, как указывалось ранее [1], подвижностью щелочей, потенциал которых не достигает значений, необходимых для формирования подобных минералов. Числовые характеристики составов данной системы отличаются появлением параметра  $\bar{c}$  вместо

а также тем, что параметр  $b$  целиком обусловлен избыточным натрием.

На рис.5 представлена с известной схематичностью пресеция  $abs$  моновариантных линий и инвариантных точек тетраэдра  $He-Eg-Hc-Kv$ . Видна обратная направленность важнейших моновариантных линий, идущих от реакционных точек  $E$  и  $D$  (равновесия  $Ab+Эг+Гем+He$  и  $Ab+Эг+Гем+Kv$ ) к четырехкомпонентным эвтектическим  $A$  и  $B$  (равновесия  $Ab+Эг+He+Hc$  и  $Ab+Эг+Kv+Hc$ ). Обратная направленность (увеличение параметра  $b$  с понижением температуры) связана, конечно, с особым характером параметра  $b$  в данной системе и отвечает росту избыточного  $Na_2O$  в ходе кристаллизации; вместе с тем можно сопоставить эту обратную направленность с нередкой обратной последовательностью идиоморфизма минералов («агпаитовая структура») в щелочных породах, пересыщенных  $Na_2O$ . Такая же обратная направленность линий видна и в частном сечении  $He-Eg-Hc$ , показанном на рис.5 пунктиром.

Система  $Na_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$ . В этой шестикомпонентной системе изучен разрез  $He-Eg-Dи$  [16]. Проекция системы на

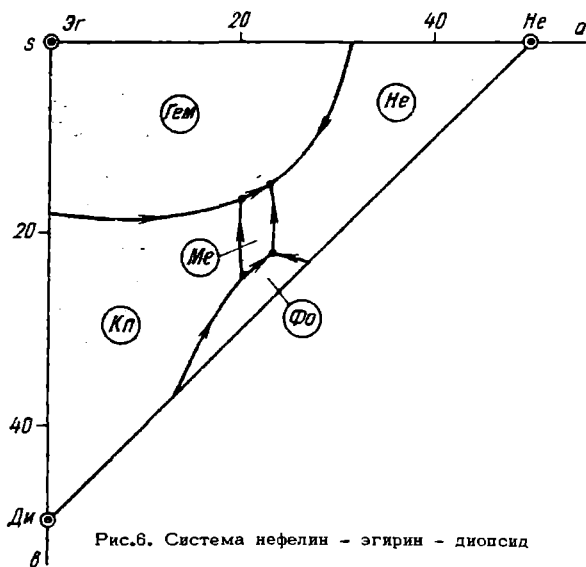


Рис.6. Система нефелин - эгирин - диопсид

плоскость  $abs$  показана на рис.6. Пути кристаллизации расплавов направлены к низкотемпературной области - окрестностям поля первичной кристаллизации меллиита. Точка минимума температуры, соответствующая равновесию  $He+Me+Гем$ , отвечает расплаву с параметрами  $a = 23$ ,  $\bar{c} = 8$ ,  $b = 15$ ,  $s = 54$ .

Система  $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ .

Ряд разрезов этой системы изучен Дж.Шерером [12].

Наибольший интерес для наших целей представляет разрез  $Le-Фс-Kв$ . На проекции на плоскость  $abs$  (рис.7, сплошные линии) видно, что низкотемпературная область системы, включающая реакционные точки  $Фс+Эн+Le$  и  $Le+Эн+Op$  и эвтектическую точку  $Эн+Op+Kв$ , тесно примыкает к оси  $sa$ . Общая тенденция - быстрое уменьшение параметра  $b$  в ходе кристаллизации, псевдение же параметра  $a$  более сложно и различно для насыщенных и ненасыщенных кремнеземом расплавов. В целом особенности поведения расплавов в этой системе сходны с поведением расплавов в более простых системах -  $Le-An-Kв$  и  $Le-Dи-Kв$ , которые были рассмотрены с этих позиций еще А.Н.Заварицким.

Система  $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ . Сечение  $Le-Фс-Kв$  этой системы впервые изучено Е.Реддером [11]. Проекция  $abs$  этого сечения показана



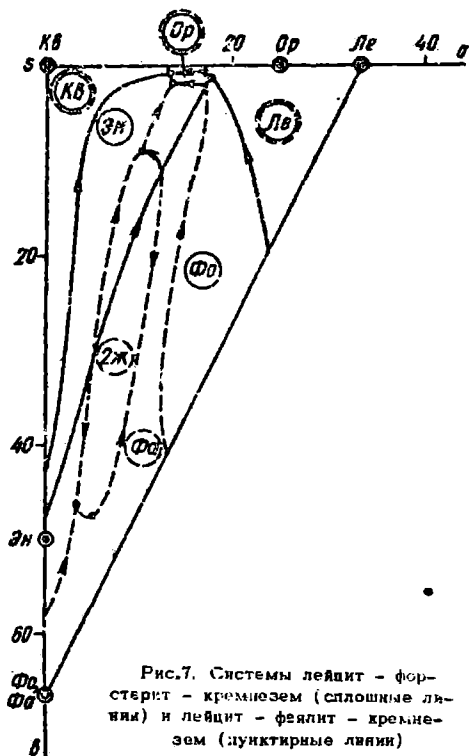


Рис.7. Системы лейцит - форстерит - кремнезем (сплошные линии) и лейцит - фаялит - кремнезем (пунктирные линии)

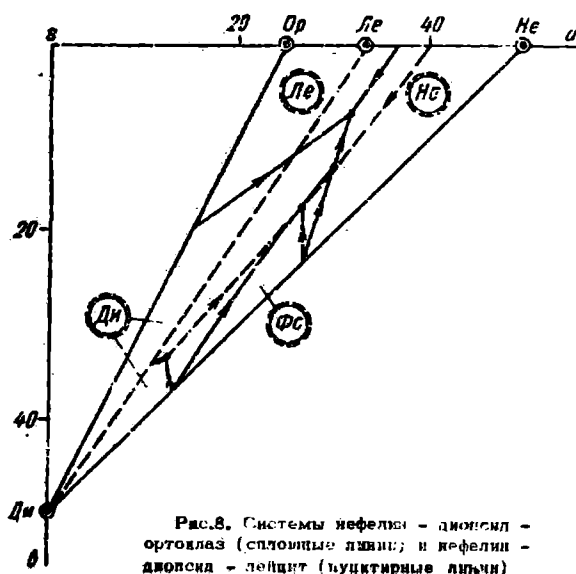


Рис.8. Системы нефелин - диопсид - ортоклаз (сплошные линии) и нефелин - диопсид - лейцит (пунктирные линии)

на рис.7 пунктирными линиями. От аналогичных диаграмм магнеталевых систем эта диаграмма отличается значительной по размерам областью ликвиды, разрывающей контакты фаялит - кремнезем. В области, относительно бедной  $FeO$ , направление линий сходно с таковыми в магнеталевых системах.

Система  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ . Эта весьма сложная система исследована лишь в пределах немногих сечений, из которых здесь поместим сечения Не-Ди-Ор [10] и Не-Ди-Ле [6]. Эти сечения не являются тройными, и имеющиеся на пресечениях на плоскость (рис.8) точки четырехфазных равновесий все являются проходными. В сечении Не-Ди-Ор (рис.8, сплошные линии) минимальная температура отвечает точке Не+Ди+Ле, для которой  $a = 32$ ,  $b = 7$ ,  $s = 61$ .

В сечении Не-Ди-Ле (пунктирные линии) точка минимума температуры Не+Фс+Ле имеет параметры  $a = 27$ ,  $b = 17$ ,  $s = 56$ . В неанатексных кремнеземом расплавах, принадлежащих этой системе, конечные точки путей кристаллизации, таким образом, не отстоят близко к оси  $as$ , как в системах, содержащих  $SiO_2$  в качестве самостоятельного компонента, и кристаллизация богатых щелочами расплавов может сопровождаться возрастанием параметра  $b$ .

Таким образом, если в системах, остатки которых соответствует породам нор-

мального ряда, направленность изменения параметров числовой характеристики в общем согласуется с нормальным ходом их эволюции, показанным А.Н. Заварицким, то в системах, переосвоенных щелочами, ход кристаллизации и дифференциации может быть существенно иным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Доливо-Добровольский В.В. Система  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  и подвижность щелочей при магматических явлениях. - В кн.: Очерки физико-химической петрологии. М., Наука, 1969, т. 1, с. 45-53.
2. Заварицкий А.Н. Введение в петрохимию изверженных горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1950. 400 с.
3. Йодер Г.С., Тилли К.Э. Происхождение базальтовых магм. М., Мир, 1965. 248 с.
4. Петров Т.Г. Обоснование варианта общей классификации геохимических систем. Вестник ЛГУ, 1971, № 18, с. 30-38.
5. Петрография. М., Изд-во МГУ, 1981. Ч. 2. 328 с.
6. Соловьев С.П. Химизм магматических горных пород и некоторые вопросы петрохимии. Л., Наука, 1970. 312 с.
7. Bailey D., Schairer J. Journ. of Petrol., 1960, vol. 7, N 1, p. 114-170.
8. Gupta A., Lidiak E. - Contrib. Miner. and Petrol., 1973, vol. 41, N 3, p. 231-239.
9. Huebner J., Turnock A. - Amer. Miner., 1980, vol. 65, N 3-4, p. 225-271.
10. Platt R., Edgar A. - Journ. of Geol., 1972, vol. 80, N 2, p. 224-236.
11. Roedder E. - Amer. Miner., 1951, vol. 36, N 3-4, p. 282-286.
12. Schairer J. - Journ. of Amer. Ceram. Soc., 1954, vol. 37, N 11, p. 501-533.
13. Schairer J. - Journ. of Amer. Ceram. Soc., 1957, vol. 40, N 5, p. 215-235.
14. Schairer J., Yoder H. - Amer. Journ. of Sci., Bradley vol., 1960, vol. 258A, p. 273-283.
15. Schairer J., Yoder H. - Carnegie Inst. Washington Yearbook, 1961, vol. 60, p. 141-144.
16. Yagi K. - Carnegie Inst. Washington Yearbook, 1963, vol. 62, p. 89-97.