

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ
им. В.И. ВЕРНАДСКОГО

На правах рукописи

Л.Б. НАГАПЕТЯН

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ГРАНИТОИДНЫХ РАСПЛАВОВ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ВОДНОГО ПАРА^я

(121, геохимия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

МОСКВА - 1969

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ
им. В.И. ВЕРНАДСКОГО

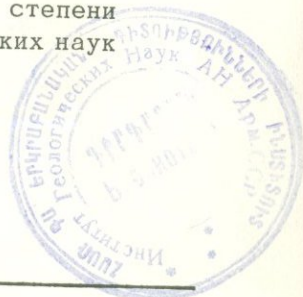
На правах рукописи

Л.Б. НАГАПЕТЯН

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ГРАНИТОИДНЫХ РАСПЛАВОВ
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ВОДНОГО ПАРА

(121, геохимия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук



МОСКВА - 1969

Работа выполнена в Ордена Ленина Институте геохимии
и аналитической химии им.В.И.Вернадского АН СССР.

Научный руководитель- член-корр.АН СССР Н.И.ХИТАРОВ

Официальные оппоненты :

доктор геолого-минералогических наук,

профессор В.В.ЩЕРБИНА

кандидат геолого- минералогических наук,

старший научный сотрудник Р.Д.ГАВРИЛИН

Ведущая научная организация :

Кафедра петрографии геологического факультета

Московского Государственного Университета .

Автореферат разослан " 26 " декабрь 1969 г.

Защита диссертации состоится " _____ " феврале 1970г.

на заседании Ученого Совета по геохимии ГЕОХИ

АН СССР по адресу: г.Москва, В-334, Воробьевское
шоссе, д. 47-в.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института .

Ученый секретарь
Совета

Одинец

(Н.И.Одинец)

Многие вопросы генетического характера тесно связаны с пониманием условий и особенностей кристаллизации магматических расплавов различного состава, содержащих летучие компоненты. В дополнение к огромному геологическому материалу не хватает многих данных, восполнение которых возможно экспериментальным путем. Кристаллизация магматических расплавов экспериментально изучена явно недостаточно. Экспериментальные исследования в этом направлении в основном проводились на простых силикатных системах, не отображающих полного состава силикатной части гранитного или другого по составу расплава. Ко времени начала наших работ по кристаллизации гранитоидных расплавов в условиях давления водяного пара в литературе имелись весьма ограниченные данные с применением в опытах природных составов.

Настоящая работа состоит из трех частей.

В первой части, посвященной рассмотрению состояния вопроса по проблеме, проводится анализ опубликованных в литературе экспериментальных данных по кристаллизации гранитных систем и природных составов в условиях высокого давления водяного пара.

Также рассматривается роль воды и других летучих компонентов в ходе плавления и кристаллизации гранитоидных пород.

Вторая часть посвящена методу и технике экспериментального исследования, использованного в настоящей работе.

В третьей части представлены результаты экспериментальных исследований, их обсуждение и геохимическая интерпретация.

Исследование проводилось в лаборатории магматогенных процессов института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского АН СССР под непосредственным руководством член-корреспондента АН СССР Н.И. Хитарова, за что автор выражает ему свою глубокую благодарность.

Автор благодарен также Е.Б. Лебедеву за постоянную помощь и содействие в выполнении экспериментальной части, а также А.Б. Слуцкому, С.Д. Малинину, А.А. Кадику, советами и консультациями которых в процессе работы он пользовался, и Э.Е. Коровушкиной за оказанную помощь при определении воды в образцах после опытов.

I. Основные предпосылки

Ко времени начала нашей работы вопросы, связанные с кристаллизацией гранитоидных пород, рассматривались в основном исходя из данных, полученных на простых гранитных системах в условиях высокого давления водяного пара (Таттл и Боуэн, 1958; Лутц, Джонс и Таттл, 1964; Кеннеди, 1962; Гиджари, 1949; Йондер, Стварт и Смит, 1957 и др.). Только в нескольких работах изучалась кристаллизация природных составов. (Фон Платен, 1965, 1966. Кристаллизация обсидианового расплава в условиях давления водяного пара 2000 бар).

Существующий экспериментальный материал не дает четкого представления о природе кристаллизации гранитоидных расплавов. Многие вопросы, связанные с проблемой кристаллизации природных расплавов слабо изучены, экспериментально освещены недостаточно и нуждаются в дополнительных данных.

Так, например, если температура солидуса гранитоидных расплавов определена довольно точно при различных давлениях водяного пара, то температура ликвидуса почти не определена, если не считать системы $Ab-Ot-Q-H_2O$.

Следовательно, не определена также величина интервала ликвидуса - солидуса гранитоидных расплавов и ее зависимость от давления водяного пара и состава расплава. Отсутствуют четкие представления о порядке кристаллизации гранитоидных расплавов.

Хотя хорошо исследовано поведение воды в гранитном расплаве до кристаллизации, а также ее влияние на начало плавления гранитоидных пород, однако поведение воды в ходе кристаллизации, ее влияние на образование водосодержащих минералов и порядок величины ее сброса во время кристаллизации почти не изучено.

Также количественно не рассмотрено значение скорости кристаллизации и охлаждения гранитоидных расплавов, которые могут играть не последнюю роль при кристаллизационной дифференциации.

Определение условий возможного проявления кристаллизационной дифференциации может помочь расшифровать генезис изверженных пород андезито-дацитового и дацито-липаритового составов, которые в природе очень широко распространены и генетически связаны между собой.

Кристаллизация гранитоидных расплавов в земной коре происходит в основном до глубины 10-12 км. Следовательно более близко могут моделировать природные процессы те опыты, которые проводятся в условиях давления водяного пара до 3000 кг/см². Поэтому, с учетом части нуждающихся в экспериментальном освещении вопросов, поставленная нами задача по изучению кристаллизации гранитоидных расплавов в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см² включала:

1. Определение температурного интервала кристаллизации и последовательность кристаллизации расплавов различных гранитоидных составов.

2. Изучение изменения интервала ликвидуса-солидуса в зависимости от давления водяного пара.

3. Исследование поведения воды в ходе кристаллизации и ее влияние на образование водосодержащих минералов.

4. Определение скорости кристаллизации и охлаждения гранитоидных расплавов и возможности проявления кристаллизационной дифференциации.

5. Установление возможного механизма возникновения комплексов изверженных пород андезито-дацитового и дацито-липаритового составов.

II. Аппаратура и метод

Работа проводилась на установке высокого давления с внутренним нагревом и внутренним уравнителем давления, конструкция которой была разработана Е.Б.Лебедевым (1965).

Тепловое поле рабочей камеры контролировалось четырьмя термopарами $P_t - P_t (R_h 10\%)$, что позволило обеспечить выполнение опытов в строго выдержанных тепловых условиях. Изме-

рение давления производилось с точностью $\pm 1\%$, а измерение температуры - в пределах $\pm 5^\circ$.

Навеска исходного материала в виде тонко истертого порошка весом от 0,4 до 1,0 г помещалась в алундовую пробирку высотой соответственно навескам от 14 до 35 мм и внутренним диаметром 6 мм, уплотнялась и смачивалась водой. Затем пробирка закрывалась плотно пригнанной пробкой из алунда. Пробирку помещали в платиновый реактор, предварительно заполненный водой, с таким расчетом, чтобы она оказалась в зоне с постоянной температурой.

Остальное пространство реактора заполнялось пригнанными заглушками из алундовых стержней. После присоединения сильфонного пережимного устройства реактор помещался в сосуд высокого давления.

Равномерное тепловое поле в реакционной зоне получалось при помощи трехсекционного нагревателя с тремя самостоятельными нагревательными элементами, мощность которых можно было регулировать в процессе опыта независимо друг от друга.

Сжатие газа до 3000 кг/см^2 производилось двухступенчато. Лабораторный газовый компрессор сжимал газ до 1000 атм. Дальнейшее повышение давления производилось мультипликатором до 3000 кг/м^2 .

Создав нужное заданное давление, включали печь и температуру доводили до $1200-1250^\circ\text{C}$. Все опыты проходили с выдержкой при этой температуре в течение часа для обеспечения полного расплавления образца. После выдержки в течение часа температура понижалась до заданной за 5-10 мин.

В экспериментах были использованы в качестве исходного материала образцы изверженных пород, состав которых приведен в таблице I. Ниже приводится описание этих пород.

1. Дацит (Центральный Кавказ). Структура порфировидная. Порфиновые вкрапленники представлены тридимитом и плагиоклазом. Темноцветные минералы присутствуют в виде мелких чешуек.

2. Гранит (Камбский массив, Казахстан). Среднезернистый, состоит из 35% калиевого полевого шпата, 35% плагиоклаза (An 35), около 25% кварца и около 5% биотита.

Химический и нормативный минералогический
составы исходных пород (вес.%)

Таблица № I

Окислы	Дацит	Гранит Кайбский массив	Гранит Каджаран- ский	Обсидиан
Химический состав				
SiO_2	66,30	70,45	70,00	73,03
TiO_2	0,66	0,28	0,32	0,19
Al_2O_3	17,32	14,41	14,90	15,06
Fe_2O_3	1,12	0,96	0,62	0,33
FeO	2,25	1,70	1,36	0,72
MnO	-	-	0,10	0,10
MgO	1,69	1,25	1,00	0,13
CaO	3,70	2,73	2,02	1,60
Na_2O	4,83	3,81	4,38	4,50
K_2O	1,70	3,35	4,47	4,00
H_2O^-	-	-	0,01	0,06
H_2O^+	-	1,01	0,24	-
F	-	-	0,07	-
P_2O_5	-	-	0,18	-
п.п.п	0,25	-	-	0,26
Сумма	99,82	99,95	99,67	99,98
Нормативный состав				
Ав	40	32,0	37	38
Or	10	20	26	24
Q	21	27	22	28
Ап	18	13,5	10	8
Темноцветные минералы	II	7,5	5	2

Из аксессуарных минералов присутствуют сфен, циркон, апатит и магнетит.

3. Гранит (Каджаран, Армения). Порода с крупнозернистой основной массой с вкрапленниками розового полевого шпата (анортотлаз) в количестве 35%, плагиотлаза (Ап 28-42) - около 32%, кварца 28% и темноцветных минералов (роговой обманки, биотита) - около 5%.

4. Обсидиан (Атис, Армения). Структура микрофельзитовая, микролиты плагиотлаза с единичными мелкими зернами кварца.

Эксперименты были выполнены в трех вариантах:

1. Кристаллизация в условиях постоянной заданной температуры в течение определенного промежутка времени, а затем закалка.

2. Кристаллизация в условиях медленного охлаждения в заданном интервале температуры и закалка.

3. Кристаллизация в условиях наличия температурного градиента.

Закалка проводилась путем выключения нагрева, и скорость охлаждения составляла 150-200 град/мин. Давление в процессе закалики поддерживалось постоянным и равным давлению во время опыта. Продолжительность опытов составляла от 5 до 165 часов.

Конечные продукты изучались оптически и рентгенографически.

III. Результаты исследования

§ I. Кристаллизация расплава дацитового состава в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см²

Эксперименты были выполнены в двух вариантах:

1) Кристаллизация в условиях постоянной заданной температуры в течение определенного промежутка времени, а затем закалка.

2) Кристаллизация в условиях медленного охлаждения в заданном интервале температуры и закалка.

По результатам экспериментов намечается следующая последовательность кристаллизации минералов из дацитового расплава.

При давлении водяного пара от 500 до 3000 кг/см² первым кристаллизуется плагиоклаз, после плагиоклаза при давлении от 1000 до 3000 кг/см² начинают кристаллизоваться биотит и амфибол.

Ниже 1000 кг/см² образование их резко снижается и при давлении 500 кг/см² они практически не возникают. Одновременно с плагиоклазом и биотитом при $P = 3000$ кг/см² начинает кристаллизоваться магнетит. При $P_{H_2O} = 2000$ кг/см² и ниже он кристаллизуется позднее. Температурный интервал кристаллизации этой группы минералов из дацитового расплава равен 225° при $P_{H_2O} = 2000$ кг/см² (от 925°С до 700°С). Остальная часть расплава, преобладающая по объему, кристаллизуется в аналогичных условиях в виде кварца и калиевого полевого шпата в весьма узком интервале температур, равным всего 25° (рис.1).

Плагиоклаз, состав которого соответствует $Ap(Ap+Av) = 50$ кристаллизуется в виде таблитчатых кристаллов. Когда скорость охлаждения составляет меньше 10°/час, он оформляется в виде двойников, часто по альбитовому закону. Размеры кристаллов достигают 0,2-1,5 мм. В тех образцах, в которых кристаллическая масса составляет 40-50% (объемных), количество плагиоклаза достигает 35%. Количество кристаллов биотита и роговой обманки при давлении в 2000 и 3000 кг/см² составляет около 10%.

Во всех опытах биотит преобладает над амфиболом. При давлении 1000 кг/см² количество обоих минералов уменьшается до 1-1,5% (рис.2).

Биотит присутствует в виде удлиненных кристаллов с характерным для него плеохроизмом. Размеры кристаллов достигают 0,1-1,5 мм. Роговая обманка присутствует в виде отдельных ромбических зерен с характерными спайностями и плеохроизмом, последние хорошо наблюдаются в шлифе.

Часто кристаллы роговой обманки представлены двойниками. Размеры последних достигают 0,4-2,0 мм.

В эффузивных образованиях дацитового состава наличие фенокристаллов биотита и амфибола свидетельствует о том, что наименьшее значение давления водяного пара в исходном расплаве

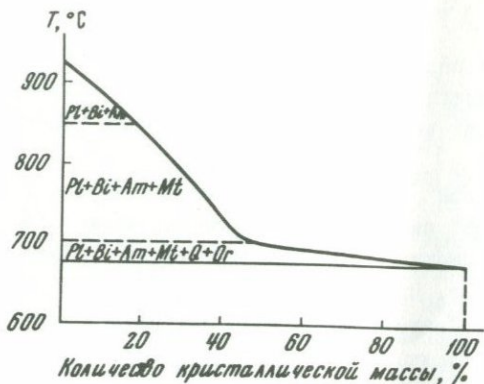


Рис.1. Порядок кристаллизации дацитового расплава в условиях давления водяного пара 2000 кг/см^2 .

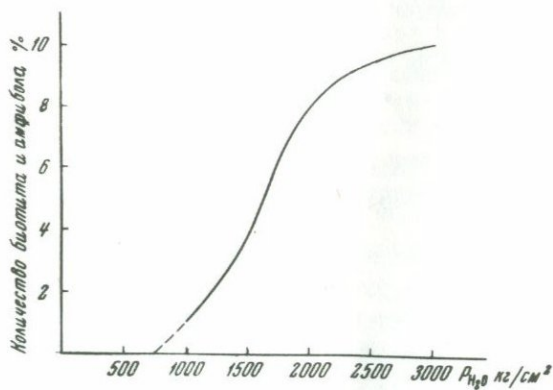


Рис.2. Влияние давления водяного пара на кристаллизацию биотита и амфибола из дацитового расплава.

было больше 1000 кг/см^2 . Так как при содержании воды в расплаве ниже 3%, что отвечает порядку величины растворимости воды при $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/см}^2$ и температуры $800-900^\circ\text{C}$, водосодержащие минералы не кристаллизуются из расплава.

Между давлением водяного пара и давлением водорода существует прямая связь и при повышении $P_{\text{H}_2\text{O}}$ повышается давление водорода. Давление последнего ускоряет² рост кристаллов водосодержащих минералов и они кристаллизуются первыми из расплава при $P_{\text{H}_2\text{O}} > 1000 \text{ кг/см}^2$. Наличие фенокристаллов магнетита в эффузивных породах дацитового состава может говорить о том, что давление водяного пара в исходном расплаве было выше, чем 2000 кг/см^2 .

Таким образом, плагиоклаз и темноцветные минералы кристаллизуются первыми из дацитового расплава. При давлении водяного пара, равным 2000 кг/см^2 температурный интервал кристаллизации этих минералов равен 225° .

Общее количество их достигает 45%. В ходе охлаждения расплава должны быть благоприятные условия для кристаллизационной дифференциации, так как при $T = 800^\circ\text{C}$ и выше вязкость расплава при наличии нескольких процентов растворенной воды достаточно низка. Это обстоятельство должно благоприятствовать отделению кристаллов плагиоклаза и темноцветных минералов. В таблице 2 показана возможная эволюция состава дацитового расплава в ходе кристаллизации его с отделением части минералов.

Материал исследования показывает, что серия эффузивных пород андезит-дацитового, дацитового и липеритового составов, которые в природе широко распространены и имеют генетическую связь, возможно образовались из единого магматического расплава дацитового состава путём кристаллизационной дифференциации.

§ 2. Кристаллизация гранитных расплавов в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см^2

В опытах были использованы образцы изверженных пород

Таблица № 2

Эволюция состава дацитового расплава

Окислы	Исходный состав дацитового расплава, вес %	После удаления части минералов ^{x/} , вес %	После добавления к исходному расплаву ^{xx/} , вес %
SiO ₂	66,30	74,46	62,68
TiO ₂	0,66	0,36	0,68
Al ₂ O ₃	17,32	14,35	18,92
Fe ₂ O ₃	1,12	0,47	1,46
FeO	2,25	1,11	2,86
MgO	1,69	1,18	1,96
CaO	3,70	1,14	5,05
Na ₂ O	4,83	4,66	4,95
K ₂ O	1,70	2,27	1,44
Нормативные составы:			
Ав	40	39	40
Or	10	15	8
Q	21	35	13
Ап	18	5,5	25
Темноцветные минералы	11	5,5	14

x/ После удаления из дацитового расплава 25% плагиоклаза (Ап 50) и 8% темноцветных минералов состав остаточного расплава соответствует липариту.

xx/ После присоединения этой части минералов к исходному дацитовому расплаву, состав нового расплава соответствует андезито-дациту.

гранитного и обсидианового состава.

Эксперименты были выполнены в трех вариантах:

1) Кристаллизация в условиях постоянной заданной температуры в течение определенного промежутка времени, а затем закалка.

2) Кристаллизация в условиях медленного охлаждения в заданном интервале температуры и закалка.

3) Кристаллизация в условиях наличия температурного градиента.

Последовательность кристаллизации минералов из гранитного расплава такова:

Первыми кристаллизуются из гранитного расплава минералы: плагиоклаз и биотит. Максимальные количества этих минералов до начала кристаллизации кварца и калиевого полевого шпата составляют 35%.

Рудный минерал, который представлен магнетитом, кристаллизуется при давлении водяного пара 3000 кг/см^2 вместе с плагиоклазом и биотитом. При давлении водяного пара 2000 кг/см^2 магнетит начинает кристаллизоваться немного позже при температуре $760-870^\circ\text{C}$.

Температурный интервал ликвидуса-солидуса у гранитного расплава составляет 225° при давлении водяного пара 2000 кг/см^2 (от 900°C до 675°C). Кварц и калиевый полевой шпат кристаллизуются в температурном интервале всего 25° в конце кристаллизации, при температурах на 200° ниже начала кристаллизации.

Плагиоклаз кристаллизуется довольно выдержанно по составу с содержанием $\text{An } 38-40$. Двойники плагиоклаза (по альбитовому закону) появляются при скорости охлаждения меньше 12°град/час .

Серия экспериментов, выполненная в широком интервале T и P , позволяет представить общую картину хода кристаллизации гранитного расплава (рис.3).

В опытах, где для ускорения кристаллизации по длине столбика расплава 18 мм создавался температурный градиент в 80° , последовательность кристаллизации гранитного расплава не менялась и только в несколько раз увеличивалось количество кристаллической массы, возникавшей в единицу времени. Эта же серия экспериментов подтверждает также, что в интервале температур от 900 до 700° при $P_{\text{H}_2\text{O}} = 2000 \text{ кг/см}^2$ кристаллизуются только биотит и плагиоклаз в общем количестве 30%. При постепенном охлаждении до 700°C достаточно $16-20$ час. для наступления равновесия между кристаллами и остаточным расплавом. Оставшиеся $65-70\%$ расплава соответствуют нераскристаллизованному кварцу

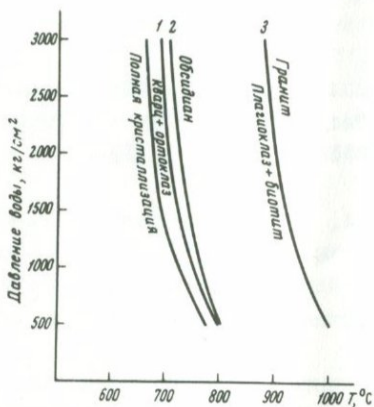


Рис.3. Схема кристаллизации расплавов гранита и обсидиана. Начало кристаллизации: 1 - кварца и ортоклаза; 2 - обсидиана; 3 - гранита.

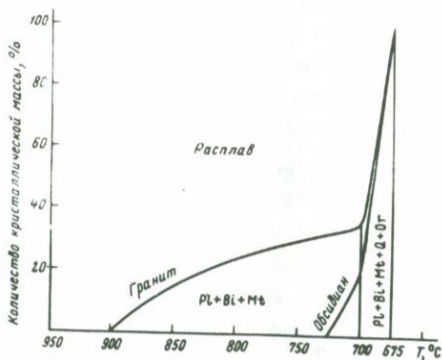


Рис.4. Порядок кристаллизации расплавов из природного гранита и обсидиана в условиях давления водяного пара 2000 кг/см^2 .

и калиевому полевому шпату. Порядок кристаллизации при $P_{H_2O} = 2000$ кг/см дается на рис.4.

Исходный образец обсидиана по сравнению с гранитом имеет более кислый и щелочной состав. Последовательность кристаллизации минералов из расплава такая же, как у гранита. В условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см² первые минералы, которые кристаллизуются, - плагиоклаз и биотит,

В условиях давления водяного пара от 3000 до 1000 кг/см² после плагиоклаза и биотита начинает кристаллизоваться кварц, а при давлении $P_{H_2O} = 500$ кг/см² после кристаллизации плагиоклаза начинает кристаллизоваться ортоклаз.

Изменения последовательности кристаллизации расплава обсидиана в зависимости от давления водяного пара объясняются тем, что при понижении давления H_2O котектическая линия в тройной ($A_s - O_r - Q$) системе (рис.5) перемещается в сторону кварца, а при давлении 500 кг/см² состав остаточного расплава после кристаллизации плагиоклаза остается в поле ортоклаза.

Температурный интервал кристаллизации обсидианового расплава меняется в зависимости от давления воды.

При давлении 500 кг/см² составляет 30°, а при давлении 2000 и 3000 кг/см² соответственно 50 и 40°. Плагиоклаз кристаллизованный из обсидианового расплава, имеет состав $Ap\ 18$.

При давлении 2000 кг/см² обсидиановый расплав начинает кристаллизоваться при 725°C.

В ходе кристаллизации гранитного расплава состав остаточного расплава меняется в сторону повышения содержания окислов SiO_2 и K_2O .

На диаграмме $A_s - O_r - Q - H_2O$ приведены точки эвтектики расплавов гранита и обсидиана по Платену, а также ход кристаллизации расплавов по приведенным нами экспериментальным данным. Эвтектический состав расплавов получается после кристаллизации у гранитного расплава - 30% плагиоклаза с основностью 40, а у расплава обсидиана - 25% плагиоклаза с основностью 18 (рис.6).

При сравнении результатов кристаллизации природного гра-

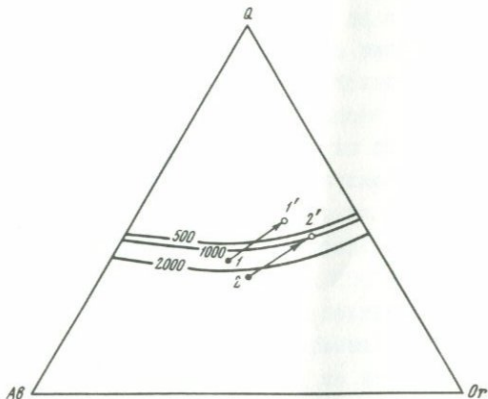


Рис.5. Система $Av - Og - Q - H_2O$

Изменения состава расплава в ходе кристаллизации до начала кристаллизации Q и Og с учетом только плагиоклаза.

- .1 - Исходный состав расплава гранита;
 - .2 - Исходный состав расплава обсидиана;
 - o1' - Состав остаточного гранитного расплава после кристаллизации плагиоклаза;
 - o2' - Состав остаточного обсидианового расплава после кристаллизации плагиоклаза;
- котектические линии между кварцем и полевым шпатом (по Боуэну и Таттлу).

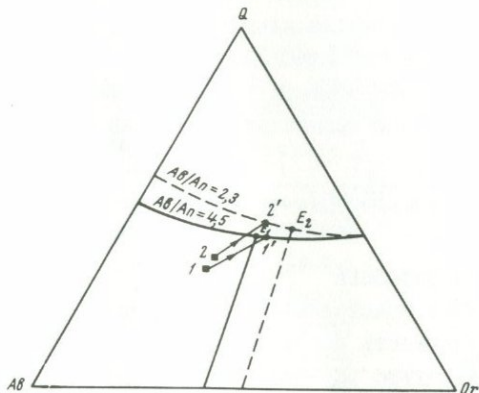


Рис.6. Система $Av - Or - Q - H_2O$ при давлении водяного пара 2000 кг/см^2 .

- E_1 - Точка эвтектики для расплава обсидианового состава (по Платену);
- E_2 - Точка эвтектики для расплава гранитного состава (по Платену);
- I - Состав расплава обсидиана;
- 2 - Состав расплава гранита;
- II - Состав расплава обсидиана после кристаллизации 25% плагиоклаза $Ap 18$; $2'$ - состав расплава гранита после кристаллизации 30% плагиоклаза $Ap 40$;
- Котектические линии (по Платену).



нита и природного обсидиана наблюдается следующая закономерность.

В гранитах температурный интервал кристаллизации удлиняется за счет плагиоклаза и биотита. В обсидианах, хотя и присутствует плагиоклаз, однако состав его соответствует кислому плагиоклазу, и поэтому он начинает кристаллизоваться в условиях относительно низких температур.

Для определения времени кристаллизации гранитных тел, нами была использована следующая формула:

$$\bar{C} = \frac{m [q + C_p (T_1 - T_2)]}{4\pi R \lambda \left[\frac{(T_1 + T_2)}{2} - t \right]}$$

где:

- m - масса расплава
- q - теплота кристаллизации или плавления
- C_p - теплоемкость расплава
- T_1 - температура расплава
- T_2 - температура, при которой заканчивается кристаллизация
- λ - коэффициент теплопроводности
- R - радиус шаровидного тела гранита
- t - температура вмещающих пород

В таблице 3 дана зависимость времени частичной или полной кристаллизации от объема гранитного расплава, а также, пользуясь данными Шоу по характеристике скорости осаждения кристаллов из гранитного расплава, время, необходимое для осаждения кристаллов.

Исходя из скорости кристаллизации и охлаждения гранитных расплавов, а также скорости осаждения кристаллов в этих расплавах, устанавливается, что плагиоклаз и биотит в результате кристаллизационной дифференциации в широком интервале температур могут отделяться, и остаточный расплав будет стремиться к составу обсидиана или липарита, а состав, полученный при присоединении высаженной части к расплаву исходного гранита, дол-

Таблица 3

Зависимость времени частичной или полной кристаллизации от объема гранитного расплава в условиях давления водяного пара 2000 кг/см² (считая от температуры ликвидуса)

Радиус магматической камеры в метрах	Температура вмещающих пород °С	Необходимое время (год)			
		Для полной кристаллизации расплава	Для кристаллизации плагиоклаза и биотита	Для понижения температуры расплава до 800°С	Для осаждения кристаллоплагиоклаза с разм. 2мм
5000	300	361000	180500	98400	33200
3000	300	130000	65000	35400	20000
1500	300	32500	16250	8800	10000
1000	300	14400	7200	3920	6660
500	300	3600	1800	980	3330
100	300	144	72	40	666

жен вести к появлению расплава дацитового состава (табл.4).

В работе приведены многочисленные примеры, подтверждающие наличие процессов кристаллизационной дифференциации в природе.

§ 3. Поведение воды в расплавах гранитного и обсидианового состава в ходе кристаллизации

В ряде образцов гранитного и обсидианового состава после опыта было определено содержание воды. Количество воды при давлении 2000 кг/см² в образцах гранитного состава = 5-5,3 вес%, а в образцах обсидианового состава 6,3-7,3 вес% /время для кристаллизации составляло от 4 до 20 час.).

Сравнивая растворимость воды при давлении водяного пара 2000 кг/см² в гранитном и обсидиановом расплавах, можно видеть,

Таблица № 4

Эволюция гранитного расплава путем кристаллизационной дифференциации

Окислы	Граниты Армении (средние)	Обсидианы Армении (средние)	Дациты Армении (средние)	Андезитодаци-ты Арме-нии (сред-ние)	По пересчету		
					Обсиди-ан	Дацит	Андезито-дацит
SiO ₂	70,43	74,98	66,47	64,46	75,76	67,20	63,40
TiO ₂	0,28	0,14	0,65	0,69	0,14	0,33	0,45
Al ₂ O ₃	14,94	13,66	16,26	16,60	12,85	16,19	17,25
Fe ₂ O ₃	1,88	0,77	2,28	2,98	0,90	2,46	3,30
FeO	1,34	0,98	1,45	1,58	0,50	1,86	2,43
MnO	0,07	0,08	0,11	0,07	-	0,11	0,15
MgO	0,73	0,45	1,44	1,53	0,30	0,98	1,20
CaO	2,69	1,12	3,35	3,24	0,99	3,48	4,64
Na ₂ O	3,65	3,78	4,19	4,11	3,03	4,02	4,03
K ₂ O	3,39	4,31	3,25	3,22	4,12	2,95	2,55
Коли- чество анали- зов	20	20	12	14	удалены из гра- нита: плагио- клас Ап 40 20%, темно- цвет. мине- ралы 5%	добавле- ны к ра- сплаву гранита: плагио- клас Ап 40 20%, тем- ноцвет- ные ми- нералы 5%	добавле- ны к рас- пла- вита: плагио- клас Ап 50 25%, темно- цветные минера- лы 10%

что в ходе охлаждения гранитного расплава до начала кристаллизации кварца и калиевого полевого шпата сброса воды из расплава не происходит (рис.7).

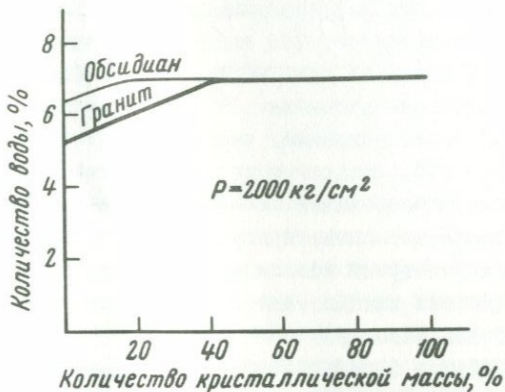


Рис.7. Изменение содержания воды в остаточном расплаве в ходе кристаллизации расплавов гранита и обсидиана в условиях давления водяного пара.

В природе гранитные расплавы могут быть до начала кристаллизации насыщены или не насыщены водой. Если расплав до начала кристаллизации даже насыщен водой, сброса воды во время кристаллизации биотита и плагиоклаза не происходит.

В ходе кристаллизации гранитного расплава на увеличение растворимости воды в остаточном расплаве положительно влияют понижение температуры и изменение химического состава остаточного расплава.

Поэтому сброс воды из гранитного расплава происходит только в узком температурном интервале, который составляет около 25° в конце процесса кристаллизации.

Увеличение растворимости воды в остаточном расплаве в хо-

де кристаллизации может частично компенсировать повышение вязкости при охлаждении. Понижение же вязкости может влиять на кристаллизационную дифференциацию только положительно.

Ж.Виаром установлено, что если в гранитном расплаве содержится вес 5% воды, то при 800°C вязкость его соответствует вязкости базальтового расплава.

Если принять во внимание, что состав летучих компонентов в гранитном расплаве сложный и кроме воды там могут присутствовать и другие газообразные компоненты, то весьма возможно, что многие редкие элементы, присутствующие в гранитном расплаве, растворены в летучем компоненте и в ходе кристаллизации гранитного расплава накапливаются вместе с летучими компонентами в остаточном расплаве.

Следовательно, в конце температурного интервала кристаллизации гранитного расплава появляются благоприятные условия для возникновения некоторых акцессорных минералов, которые захватывают большую часть накопленных в летучем компоненте элементов.

Для кристаллизации водосодержащих минералов (биотит, амфибол) определяющее значение имеет парциальное давление водорода и кислорода в расплаве. Величина парциального давления водорода зависит от величины давления водяного пара. Так, согласно Югестеру и Вонесу, парциальное давление водорода при увеличении давления водяного пара от I до 2000 бар увеличивается примерно на три порядка. При изменении температуры парциальное давление водорода изменяется мало, в пределах одного порядка. Парциальное давление кислорода в гранитном расплаве, если определяется буферной реакцией, то оно находится в зависимости от изменения температуры расплава. При колебании температуры расплава на 200°, парциальное давление кислорода меняется примерно на пять порядков. Давление кислорода увеличивается с повышением температуры расплава.

Как полагают Кеннеди и Осборн, обогащение кремнием остаточного расплава известково-щелочной магмы, явля -

ется результатом высокого или постоянного давления кислорода в ходе кристаллизации расплава. Полученные нами экспериментальные данные показывают, что для кристаллизации минерала магнетита из гранитоидного расплава необходимо, чтобы парциальное давление кислорода в расплаве имело определенную величину. Так, в наших экспериментах с гранитным расплавом магнетит кристаллизуется при температуре $870-875^{\circ}\text{C}$, независимо от величины давления водяного пара. Если биотит кристаллизуется первым из расплава, то он имеет более железистый состав, потому что железо не израсходовано на образование магнетита. Когда выделение биотита происходит в конце кристаллизации гранитного расплава, то это связано с тем, что в начале кристаллизации давление воды в расплаве было низкое. В этом случае кристаллизуется магнезиальный биотит. В изобарных условиях, когда давление водяного пара низкое, не могут кристаллизоваться минералы биотита, так как с понижением давления водяного пара кривая солидуса направляется в сторону высоких температур, а линия устойчивости биотита, наоборот, направляется в сторону низких температур.

В экспериментах температурный интервал кристаллизации гранитоидных расплавов определен для изобарных условий, где в ходе кристаллизации давление водяного пара не меняется.

Однако, если гранитоидный расплав не насыщен водой, то в ходе кристаллизации температура солидуса понижается до тех пор, пока остаточный расплав не будет насыщен водой. Таким образом, в этих условиях температурный интервал ликвидуса-солидуса удлиняется.

В ы в о д ы

Основные результаты диссертации сводятся к следующему:

I. Установлено, что последовательность кристаллизации кислых расплавов в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см^2 всегда постоянна.

В этих условиях, которые соответствуют глубине от 2 до

II км из гранитоидного расплава первыми кристаллизуются плагиоклаз и темноцветные минералы. Кварц и калиевый полевой шпат кристаллизуются последними.

2. Температурный интервал кристаллизации кварца и калиевого полевого шпата в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см^2 составляет 25° .

3. Температурный интервал ликвидуса-солидуса у гранитного и дацитового расплава удлиняется за счет темноцветных минералов и плагиоклаза. В условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см^2 у гранитного расплава, где кристаллизуется плагиоклаз с основностью 40, он составляет 225° . В аналогичных условиях у дацитового расплава, где кристаллизуется плагиоклаз с основностью 50, температурный интервал ликвидуса-солидуса составляет 250° .

Однако, если гранитоидный расплав не насыщен водой, то в ходе кристаллизации температура солидуса понижается до тех пор, пока остаточный расплав не будет насыщен водой. Таким образом, в этих условиях температурный интервал ликвидуса-солидуса удлиняется.

4. На величину температурного интервала ликвидуса-солидуса у обсидианового расплава, где кристаллизуется плагиоклаз с основностью 18-20, влияет давление водяного пара. В интервале давлений водяного пара от 1000 до 2000 кг/см^2 он составляет 50° , а при давлении 3000 кг/см^2 и 500 кг/см^2 температурный интервал ликвидуса-солидуса составляет соответственно 40° и 30° .

5. Сброс воды в изобарных условиях из гранитоидных расплавов происходит только в конце кристаллизации расплава в температурном интервале 25° , т.е. тогда, когда начинает кристаллизоваться кварц и калиевый полевой шпат.

6. Количество выкристаллизовавшихся из расплава водосодержащих минералов находится в зависимости от давления водяного пара. Если давление водяного пара ниже, чем 2000 кг/см^2 , т.е. когда количество растворенной воды в расплаве меньше 5%, то

водосодержащих минералов возникает меньше по сравнению с нормативным минералогическим составом.

Так, в гранитном расплаве при давлении воды 500 кг/см^2 биотита кристаллизуется всего 1-2%, а из дацитового расплава в аналогичных условиях биотит и амфибол практически не кристаллизуются.

7. Наличие в кислых эффузивных породах порфировых вкрапленников в виде водосодержащих минералов и магнетита говорит о том, что в магматической камере в начале кристаллизации магматический расплав был насыщен летучими компонентами, в первую очередь водой, а в противном случае присутствовали бы только вкрапленники плагиоклаза.

8. В ходе кристаллизации гранитоидного расплава состав остаточного расплава стремится к эвтектическому, через составы обсидиана или кислого липарита. Если удалить из расплава гранитоидного состава в ходе кристаллизации часть выкристаллизовавшихся кристаллов плагиоклаза и темноцветных минералов, состав остаточного материала будет соответствовать обсидиану или кислому липариту.

9. Исходя из скорости кристаллизации и охлаждения гранитных расплавов, а также скорости осаждения кристаллов в этих расплавах и на основе экспериментальных данных устанавливается, что в земной коре, при кристаллизации гранитоидных расплавов существуют условия для кристаллизационной дифференциации. Особенно они благоприятны для тех расплавов, которые имеют большие объемы (радиус магматической камеры не меньше 500 метров).

10. В результате кристаллизационной дифференциации от гранитного расплава могут возникать с одной стороны породы андезито-дацитового состава, а с другой стороны - породы обсидианового или кислого липаритового состава.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Хитаров Н.И., Нагапетян Л.Б., Лебедев Е.Б. - Кристаллизация расплава дацитового состава в условиях давления водного пара от 500 до 3000 кг/см². Геохимия, № 1, 1969.

2. Хитаров Н.И., Нагапетян Л.Б., Лебедев Е.Б. - Особенности кристаллизации кислых расплавов (экспериментальное исследование). Геохимия, № 3, 1969.

3. Нагапетян Л.Б. Аннотация доклада на экспериментальном совещании - кристаллизация расплавов дацитового, гранитного и абсидианового составов . (геохимия № 9, 1969 г.)

1117