

Л. Б. НАГАПЕТЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТОИДНЫХ РАСПЛАВОВ

Ко времени начала работы вопросы, связанные с кристаллизацией гранитоидных расплавов, рассматривались в основном исходя из данных, полученных на простых гранитных системах в условиях высокого давления водяного пара (Кеннеди, 1955; Подер, Стюарт и Смит, 1957; Таттл и Боуэн, 1959; Лутц, Джонс и Таттл, 1964).

Кристаллизация обсидианового расплава в условиях давления водяного пара 2000 бар изучалась Фон Платеном (1965, 1967).

В общем существующий экспериментальный материал не давал четкого представления о природе кристаллизации гранитоидных расплавов.

Многие вопросы, связанные с проблемой кристаллизации природных расплавов, были изучены слабо, экспериментально освещены недостаточно, была очевидна необходимость получения дополнительных данных, без знания которых многие вопросы генетического характера оставались нерешенными.

Только в последние годы появились результаты экспериментальных исследований, в которых в качестве исходного вещества были использованы природные составы горных пород (Пивинский, Вилли, 1968; Пивинский, 1968; Хитаров, Нагапетян, Лебедев, 1969а, 1969б).

В указанных работах, проведенных независимо друг от друга при различных методических решениях экспериментов, были получены одинаковые результаты относительно последовательности кристаллизации минералов и температурного интервала ликвидуса-солидуса в расплавах гранитоидного состава.

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.

Работа проводилась на установке высокого давления с внутренним нагревом и внутренним уравнивателем давления, конструкция которой была разработана Е. Б. Лебедевым (1964) и описана в работе Хитарова, Кадика, Лебедева (1967).

Тепловое поле рабочей камеры контролировалось четырьмя термодарами Pt—Pt(Rh 10%), что позволило обеспечить выполнение опытов в строго выдержанных тепловых условиях. Измерение 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. Пробирка помещалась 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/см^2 .

Создав нужное заданное давление, включали печь и температуру доводили до $1200\text{—}1250^\circ\text{C}$. 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 в качестве исходного материала использованы образцы изверженных пород, состав которых приведен в табл. 1. Ниже приводится описание этих пород.

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

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

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

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

4. Обсидиан (Атис, Армения). Структура микрофельзитовая, микролиты плагиоклаза 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 охлаж-

Таблица 1

Химические и нормативные минералогические составы исходных пород (вес в %)

Окислы	Дациит Центральный Кавказ	Гранит Каибский массив	Гранит Каджаранский	Обсидиан г. Атис
Химический состав				
SiO ₂	66.30	70.45	70.01	73.03
TiO ₂	0.66	0.28	0.32	0.19
Al ₂ O ₃	17.32	14.41	14.80	15.06
Fe ₂ O 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 ₂ O	4.83	3.81	4.38	4.50
K ₂ O	1.70	3.35	4.47	4.00
H ₂ O—	—	—	0.01	0.06
H ₂ O+	—	1.01	0.24	—
F	—	—	0.07	—
P ₂ O ₅	—	—	0.18	—
п.п.п.	0.25	—	—	0.26
Сумма	99.82	99.95	99.67	99.98

Нормативный состав

Ab	40	32.0	37	38
Or	10	20	26	24
Q	21	27	22	28
Ap	18	13.5	10	8
Темноцвет- ные мине- ралы	11	7.5	5	2

дения составляла 150—200 град/мин. Давление в процессе заделки поддерживалось постоянным и равным давлению во время опыта.

Конечные продукты изучались оптически и рентгенографически.

Результаты исследования

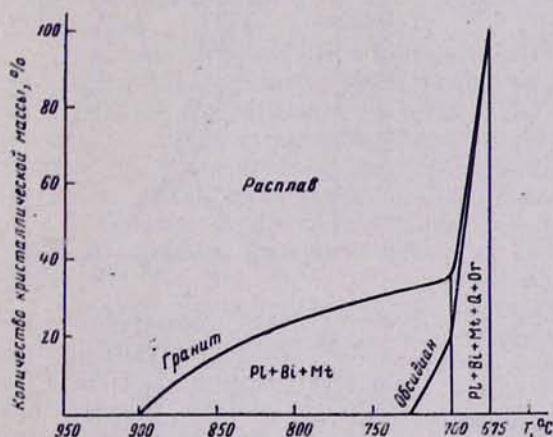
На основании проведения около 200 опытов в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см² было установлено, что последовательность кристаллизации гранитоидных расплавов в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см² почти постоянна (фиг. 1, 2).

В этих условиях, которые соответствуют глубине от 2 до 11 км из гранитоидного расплава, первыми кристаллизуются плагиоклазы и темноцветные минералы. Кварц и калиевый полевой шпат кристаллизуются последними. Кварц почти всегда кристаллизуется раньше калиевого полевого шпата. Только у расплава обсидиана, который по составу соответствует кислому липариту в условиях давления 500 кг/см², последним кристаллизуется кварц. Этот факт связан с тем, что при

понижении давления H_2O ко-
тктическая линия между квар-
цем и полевым шпатом в трой-
ной ($Ab-Og-Q$) системе рис.
3 перемещается в сторону
кварца, а при давлении 500
 $кг/см^2$ состав остаточного расп-
лава после кристаллизации
плагноклаза остается в поле
полевого шпата. Плагноклаз
кристаллизуется в виде удли-
ненных зерен, когда скорость
кристаллизации меньше 10—
12°/час, он появляется в виде
двойников (часто по альбито-
вому закону).

Состав плагноклаза в зави-
симости от состава расплава
колеблется в широком интервале. Так, у расплавов дацита, гранита и
обсидиана кристаллизуется плагноклаз с основностью 50, 40 и 18 соот-
ветственно.

Водосодержащие минералы представлены биотитом и амфиболом
и кристаллизуются также первыми из расплава. У расплавов гранита и
обсидиана кристаллизуется только биотит, а у расплава дацита биотит
и амфибол. Часто также амфибол представлен двойниками в виде ром-
бических кристаллов с характерными спайностями.

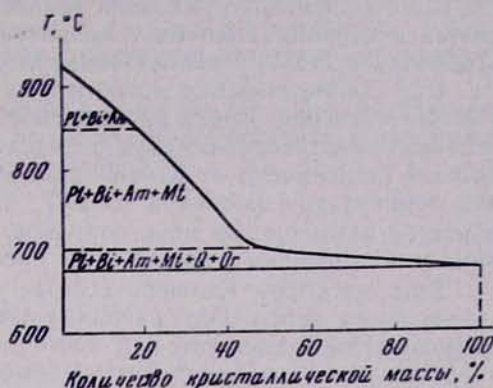


Фиг. 2. Порядок кристаллизации расплавов из
природного гранита и обсидиана в условиях дав-
ления водяного пара 2000 $кг/см^2$.

согласно Югестеру и Вонесу (1962), парциальное давление водорода
при увеличении давления водяного пара от 1 до 2000 бар увеличивается
примерно на три порядка.

Давление последнего ускоряет рост кристаллов водосодержащих
минералов, и они кристаллизуются первыми из расплава при
 $P_{H_2O} > 1000 \text{ } кг/см^2$.

В изобарных условиях, когда давление водяного пара низкое
(500 $кг/см^2$ и меньше), не может кристаллизоваться минерал биотит,



Фиг. 1. Порядок кристаллизации дацито-
вого расплава в условиях давления водя-
ного пара 2000 $кг/см^2$.

В условиях давления водя-
ного пара 2000 и больше
атмосфер водосодержащие
минералы кристаллизуются
в количестве, соответствую-
щем нормативному составу
исходных образцов.

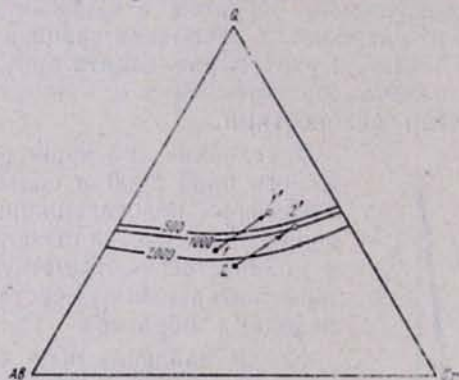
Когда давление водяного
пара ниже 2000 $кг/см^2$, ко-
личество выкристаллизовы-
вающихся биотита и амфи-
бола резко сокращается, а
при давлении 500 $кг/см^2$ они
фактически не кристаллизу-
ются.

Между давлением водя-
ного пара и водорода суще-
ствует прямая связь и при
повышении P_{H_2O} повышается
давление водорода. Так,

так как с понижением давления водяного пара кривая солидуса направляется в сторону высоких температур, а линия устойчивости биотита наоборот—в сторону низких температур (фиг. 4).

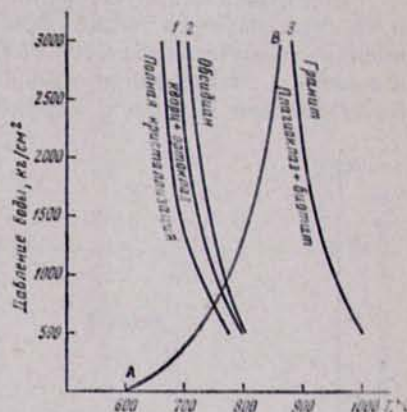
При кристаллизации магнетита из гранитоидного расплава определяющее значение имеет парциальное давление кислорода, которое в гранитоидном расплаве, если определяется буферной реакцией, находится в зависимости от изменения температуры расплава. При колебании температуры расплава на 200° парциальное давление кислорода меняется примерно на пять порядков. Давление кислорода увеличивается с повышением температуры расплава.

Как полагают Кеннеди (1955) и Осборн (1962), обогащение кремнеземом остаточного расплава известково-щелочной магмы является 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. А с другой стороны, это показывает, что если в кислых эффузивных породах присутствуют фенокристаллы магнетита, то давление водяного пара в исходном расплаве было выше, чем 2000 кг/см^2 .



Фиг. 3. Система $\text{Ab}-\text{Q}-\text{Or}-\text{H}_2\text{O}$. Изменения состава расплава в ходе кристаллизации до начала кристаллизации кварца и ортоклаза.

1. Исходный состав расплава гранита.
 2. Исходный состав расплава обсидиана.
 - 1'. Состав остаточного гранитного расплава после кристаллизации плагиоклаза.
 - 2'. Состав остаточного обсидианового расплава после кристаллизации плагиоклаза.
- Котектическая линия между кварцем и полевым шпатом (по Боуэну и Таттлу) (1958).



Фиг. 4. Схема кристаллизации расплавов обсидиана и гранита. Начало кристаллизации: 1—кварц и ортоклаз, 2—обсидиан, 3—гранит. Кривая (АВ)—распад магматического биотита (устойчиво влево от АВ) по Доджу и др. (1969).

Температурный интервал кристаллизации гранитоидных расплавов в зависимости от состава расплава колеблется от 30 до 250° (фиг. 4). Интервал ликвидуса и солидуса у гранитного и дацитового расплава составляет соответственно $225-250^\circ$. У расплава обсидиана в условиях водяного пара 2000 кг/см^2 он составляет 50° , а в условиях давления водяного пара 500 и 3000 кг/см^2 —соответственно 30 и 40° .

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 (фиг. 5).

Плагноклаз и темные минералы кристаллизуются в широком температурном интервале. Так, у дацитового расплава в интервале 225°, а у гранитного расплава в интервале 200°.

У дацитового расплава в ходе кристаллизации 45% кристаллической массы возникает в температурном интервале 225°. У гранитного расплава 30—35% кристаллической массы возникает в температурном интервале 200°.

Кварц и калиевый полевой шпат кристаллизуются в конце кристаллизации в узком температурном интервале (25°).

Таким образом, в ходе кристаллизации гранитоидных расплавов состав остаточного расплава стремится в сторону обогащения кремнеземом и щелочами.

Плагноклаз и биотит в широком интервале температур в результате кристаллизационной дифференциации могут отделиться из гранитного расплава и остаточный расплав будет стремиться к составу кислого липарита. Однако следует отметить, что для кристаллизационной дифференциации необходимо, чтобы скорость осаждения кристаллов в расплаве превышала скорость охлаждения расплава.

В природе скорость охлаждения и кристаллизации гранитоидного расплава зависит от многих факторов и, прежде всего, от особенностей теплового режима.

Важны теплоемкость, теплопроводность, теплота кристаллизации и температура вмещающих пород. Кроме того, на охлаждение и кристаллизацию гранитного расплава влияют летучие компоненты, которые находятся в расплаве.

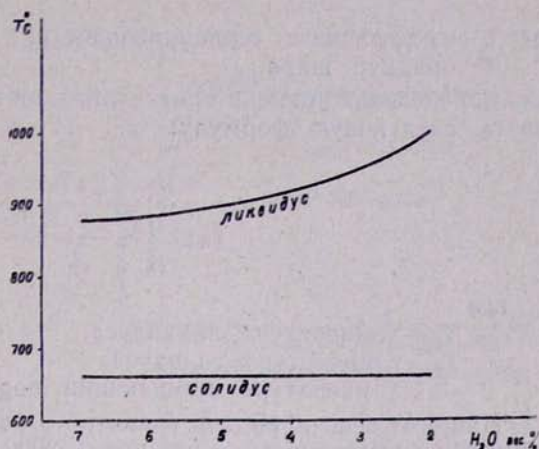
Теплоемкость и теплота кристаллизации гранитного расплава относительно постоянны.

В зависимости от температуры вмещающих пород меняется скорость охлаждения гранитного расплава. Параллельно с охлаждением теплоотдача в пространство стремится к постоянной величине. Количество теплоты, которое выделяется из расплава при охлаждении, можно подсчитать в грубом приближении следующим образом:

$$Q = m[q + C_p(T_1 - T_2)],$$

где m — масса расплава,

q — теплота кристаллизации или плавления,



Фиг. 5. Зависимость интервала ликвидуса-солидуса от начального содержания растворенной воды в расплаве при кристаллизации гранитного расплава на глубине 11 км.

C_p —теплоемкость расплава,
 T_1 —температура расплава,
 T_2 —температура, при которой заканчивается кристаллизация.
 Потеря количества тепла или тепловой поток шаровидного тела можно определить по следующей формуле:

$$Q = 4\pi R\lambda \left[\frac{(T_1 + T_2)}{2} - t \right],$$

где λ —коэффициент теплопроводности,
 R —радиус шара.

Для определения времени кристаллизации гранитных тел можно использовать следующую формулу:

$$\tau = \frac{m[q + C_p(T_d - T_c)]}{4\pi R\lambda \left[\frac{(T_d - T_c)}{2} - t \right]},$$

где

T_d —температура ликвидуса,
 T_c —температура солидуса,
 t —температура вмещающих пород.

Например, если радиус гранитного расплава составляет 3000 метров, то при давлении водяного пара—2000 кг/см²

$$\begin{aligned}
 T_d &= 900^\circ\text{C}, & t &= 300^\circ\text{C}, \\
 T_c &= 675^\circ\text{C},
 \end{aligned}$$

и, используя следующие константы для гранита:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= 2,0 \text{ ккал/град. м. час [Миснар, 1968],} \\
 C_p &= 0,19 \text{ ккал/г,} \\
 q &= 100 \text{ ккал/г [Тернер и Ферхуген, 1961],}
 \end{aligned}$$

мы можем подсчитать время кристаллизации

$$\tau = 130000 \text{ лет.}$$

Итак, необходимо около 130000 лет от начала кристаллизации, чтобы расплав гранитного состава отмеченного выше объема полностью закристаллизовался. Таким образом, можно также рассчитать, сколько потребуется времени для того, чтобы температура гранитного расплава в том же объеме понизилась на 100° от начала кристаллизации при давлении водяного пара 2000 кг/см².

Если учесть при этом количество кристаллической массы, которое появляется в этом температурном интервале, то необходимо всего 35400 лет.

Во многих образцах после опытов было определено количество растворенной воды. Установлено, что оно в расплавах гранитоидного состава в условиях давления водяного пара 2000 кг/см² колеблется от 5,0 до 7,0% (проценты весовые). В гранитном и дацитовом расплавах при температуре 900°C оно составляет 5—5,3%, а в расплаве обсидиана при температуре 725°C—около 7%. На увеличение растворимости воды в расплаве обсидиана влияет как состав, так и температура расплава.

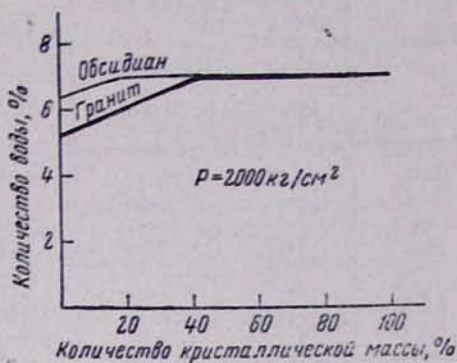
Эти факты, а также учет величины температурного интервала ликвидуса-солидуса и порядок кристаллизации минералов из гранитоидных расплавов свидетельствуют о том, что сброс воды из гранитоидного расплава происходит в конце кристаллизации в узком температурном интервале (около 25°), когда кристаллизуются кварц и калиевый полевошпат (независимо от водонасыщенности расплава), (фиг. 6). Время для сброса воды составляет около половины времени, которое необходимо для полной кристаллизации гранитного расплава от температуры ликвидуса (табл. 2).

Пользуясь данными Шоу (19, 20) по характеристике скорости осаждения кристаллов из гранитного расплава, можно видеть, что для процесса кристаллизационной дифференциации у гранитного расплава имеются благоприятные условия.

Например, для осаждения в гранитном расплаве кристаллов плагиоклаза с диаметром 2 мм на глубину в 6000 м в условиях давления водяного пара 2000 кг/см^2 и температуре 800°C необходимо всего 20 000 лет.

В табл. 2 дана зависимость времени частичной или полной кристаллизации от объема гранитного расплава, а также время, необходимое для осаждения кристаллов.

Исходя из скорости кристаллизации и охлаждения гранитных расплавов, а также скорости осаждения кристаллов в этих расплавах устанавливается, что в земной коре при кристаллизации гранитных расплавов существуют условия для кристаллизационной дифференциации.



Фиг. 6. Изменение содержания воды в остаточном расплаве в ходе кристаллизации расплавов гранита и обсидиана в условиях давления водяного пара.

Таблица 2

Зависимость времени частичной или полной кристаллизации и сброса воды от объема гранитного расплава в условиях давления водяного пара 2000 кг/см^2 (считая от температуры ликвидуса)

Время (в годах), необходимое для:						
Радиус магматической камеры в метрах	Температура вмещающих пород, $^{\circ}\text{C}$	полной кристаллизации расплава	кристаллизации плагиоклаза и биотита	понижения температуры расплава до 800°C	осаждения кристаллов плагиоклаза разм. 2 мм	сброса воды
5000	300	361,000	180,500	98,400	33,200	180,500
3000	300	130,000	65,000	35,400	20,000	65,000
1500	300	325,60	16,250	88,00	10,000	16,250
1000	300	14400	7,200	3,920	6660	7,200
500	300	3,600	1,800	980	3330	1,800
100	300	144	72	40	666	72

Особенно они благоприятны для тех расплавов, которые имеют большие размеры (радиус не меньше 500 м).

В табл. 3 сведены данные по эволюции гранитного и дацитового расплавов при кристаллизационной дифференциации.

Таблица 3
Эволюция гранитного и дацитового расплавов путем кристаллизационной дифференциации

Оксиды	Исходные составы расплавов, в вес. %		По пересчету			
			После удаления части минералов из расплавов		После добавления удаленных минералов к исходному расплаву	
	дацит	гранит	дацит ¹	гранит ²	дацит ³	гранит ⁴
SiO ₂	66,30	70,45	74,46	75,76	62,68	67,20
TiO ₂	0,66	0,28	0,36	0,14	0,68	0,33
Al ₂ O ₃	17,32	14,41	14,35	12,85	18,92	16,19
Fe ₂ O ₃	1,12	0,96	0,47	0,90	1,46	2,46
FeO	2,25	1,70	1,11	0,50	2,86	1,86
MgO	1,69	1,25	1,18	0,30	1,96	0,98
CaO	3,70	2,73	1,14	0,99	5,05	3,48
Na ₂ O	4,83	3,81	4,66	3,03	4,95	4,02
K ₂ O	1,70	3,35	2,27	4,12	1,44	2,95

1) после удаления из расплава 25% плагиоклаза (Ап 50) и 8% темноцветных минералов;

2) после удаления из расплава 20% плагиоклаза (Ап 40) и 5% темноцветных минералов;

3) после присоединения 25% плагиоклаза (Ап 50) и 8% темноцветных минералов к исходному дацитовому расплаву;

4) после присоединения 20% плагиоклаза (Ап 40) и 5% темноцветных минералов к исходному гранитному расплаву.

Как видно из приведенных в таблице расчетов, при удалении из дацитового расплава 25% плагиоклаза (Ап 50) и 8% темноцветных минералов состав остаточного расплава соответствует липариту. После же добавления удаленных минералов к исходному расплаву состав нового расплава соответствует андезито-дациту.

После удаления из гранитного расплава 20% плагиоклаза (Ап 40) и 5% темноцветных минералов состав остаточного расплава соответствует обсидиану или липариту. После же добавления удаленных минералов к исходному расплаву состав нового расплава соответствует дациту.

Вышеизложенный фактический материал о возможной эволюции кислых гранитоидных расплавов путем кристаллизационной дифференциации подтверждается геологическими наблюдениями по Армении.

Так, например, по данным С. Г. Карапетяна (1968), активность новейших куполовидных вулканических массивов Атис, Гутансар и Гехасар началась извержением липаритовых лав, сменившихся во времени липарито-дацитами и дацитами.

ЛИТЕРАТУРА

- Карапетян С. Г. Особенности строения и состава новейших липаритовых куполовидных вулканов Армянской ССР. Автореферат, 1968.
Лебедев Е. Б. Разработка методов исследования водносиликатных расплавов и

- измерение электропроводности расплавов при высоких давлениях и температурах. Диссертация. Ин-т геохимии и аналит. химии АН СССР, М., 1964.
- Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. Изд-во «Мир». 1968.
- Платен Г. Фон. Экспериментальные исследования анатексиса и генезиса магматитов. «Природа метаморфизма», Изд-во «Мир», 1967.
- Тернер Ф., Ферхуген Дж. Петрология изверженных и метаморфических пород. ИЛ, 1961.
- Хитаров Н. И., Кадик А. А., Лебедев Е. Б. Растворимость воды в расплаве базальта. Геохимия, № 7, 1967.
- Хитаров Н. И., Нагапетян Л. Б., Лебедев Е. Б. Кристаллизация расплава дацитового состава в условиях давления водяного пара от 500 до 3000 кг/см². Геохимия № 1, 1969а.
- Хитаров Н. И., Нагапетян Л. Б., Лебедев Е. Б. Особенности кристаллизации кислых расплавов (экспериментальное исследование). Геохимия, 3, 1969б.
- Dodge F. C. W., Smith V. C., Mays R. E. Biotites from granitic rocks of the Central Sierra Nevada batholith, California. Journ. Petrolog., 10, 2, 1969.
- Eugster H. P., Wonwieser D. R. Stability relations of the ferruginous biotite, annite. Journ. Petrology, 3, № 2, 1962.
- Kennedy G. C. Some aspects of the role of water in rocks-melts Spec. Paper. Geol. Soc. Amer., 62, 489—503, 1955.
- Luth W. C., Jahns R. H., Tuttle O. F. The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars. Journ. of Geophys. res., 69, 4, 1964.
- Osborn E. F. Reaction series for subalkaline igneous rocks based on different oxygen pressure conditions. Amer. Miner. 47, 211—216, 1962.
- Piwocki A. I., Wyllie P. I. Experimental studies of igneous rocks series of a zoned pluton in the Walbwa batholith, Oregon. Journ. Geology, 76, 2, 1968.
- Piwocki A. I. Experimental studies of igneous rocks series Central Sierra Nevada batholith, California. Journ. Geol. 76, 5, 1968.
- Platen H. Kristallisation granitischer Schmelzen. Mineralogic und petrographic contrib., 11, 1965.
- Shaw H. R. Obsidian—H₂O viscosities at 1000 and 2000 bars in the temperature range 700° to 900°C. Journ. of geophys. res. 68, 23, 1963.
- Shaw H. R. Comments on viscosity crystal settling and convection in granitic magmas. Amer. J. Sci. v. 263, 1—2, 1965.
- Tuttle O. F., Bowen N. L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈—KAlSi₃O₈—SiO₂—H₂O. Geol. Soc. Amer. Mem., 74, 1958.
- Yoder H. S., Stewart D. B., Smith J. B. Ternary feldspars. Carnegie Inst. Washington. Year book, 56, 1956.
- Yoder H. S., Stewart D. B., Smith J. B. Ab—An—H₂O, An—Or—H₂O and Ab—Or—H₂O at 5000 bars. Bull. Geol. Soc. Amer. 68, 1957.