

УДК 552.111

© Д. чл. УАГН О.К.Иванов

## **ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ БАЗАЛЬТОИДНЫХ МАГМ В РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИЯХ**

*Уральский институт минерального сырья, г.Екатеринбург*

© Ivanov O.K.

### **THE EXTREME DIFFERENTIATION OF THE BASALT MAGMA IN LAYERED INTRUSIONS**

Автореферат

Рассмотрены закономерности экстремальной предельной дифференциации базальтоидных магм. Основная тенденция – образование мономинеральных пород (дуниты, хромититы, анортозиты, титаномагнетиты, а также полиминеральные гранитоиды).

Внутри мономинеральных пород дифференциация идет в направлении обогащения минералов пород наиболее мелкими катионами-модификаторами – оливины – форстеритом, хромититы – магнием и хромом, анортозиты – кальцием, титаномагнетиты – ванадием и железом. Количественный расчет экстремальных дифференциатов дает для оливиновых базальтов (в объемных %): дунит – 11, анортозит – 58, титаномагнетит – 9, апатит – 0,6, гранитоиды – 21,6.

Базальтоидные интрузии обладают характерным свойством испытывать магматическую дифференциацию под воздействием гравитационного поля Земли, особенно хорошо заметную в крупных и мощных телах. Такие **дифференцированные** или **расслоенные интрузии** имеют большое практическое и научное значение, а их образование является одной из основных проблем петрологии и учения о минеральных месторождениях. В этой связи представляется интересным до каких пределов возможна дифференциация, каков состав предельных (экстремальных) дифференциатов и каково их количество.

Понятие о предельной дифференциации было сформулировано, по-видимому, Ф.Ю.Левинсон-Лессингом (1906), который

выделил «чистые магмы»... «не способные к дальнейшему расщеплению». Такowymi он считал полевошпатовую, фельдшпатоидную, пироксенитовую, перидотитовую, грейзеновую, аляскитовую и магнетитовую магмы. Далее он пишет: «Мною было высказано мнение, что дифференциация всякой смешанной магмы стремится к распадению на эти производные и неспособные к дальнейшему расщеплению магмы и что если бы эта дифференциация могла беспрепятственно идти до конца, она стремилась бы к расщеплению магмы на эти производные чистые магмы».

Позже термин «**экстремальная фракционная кристаллизация**» («extreme fraction crystallization») был использован Х.Х. Хессом (Hess, 1939) для пород расслоенной интрузии Стиллиутер, хотя описанные им дифференциаты, в частности, плагиоклазовые гарцбургиты, по нашему мнению, не являются ни фракционными, ни экстремальными. Под ортомагматической **дифференциацией** мы понимаем процесс, приводящий к образованию расплавов или горных пород в условиях земной коры. Под **экстремальной** или **предельной дифференциацией** мы понимаем тот идеальный процесс, при котором образуются **предельные или экстремальные дифференциаты**, состав которых остается постоянным при любой дальнейшей дифференциации. Такими породами, являются, например, дуниты.

Решение проблемы установления состава предельных дифференциатов возможно тремя путями или их сочетанием, а именно: геологическим изучением совокупности аутигенных дифференцированных интрузий и установлением тенденции дифференциации, теоретическими расчетами, при условии существования соответствующей теории, и экспериментальным моделированием процесса дифференциации. Однако, для каждого из них имеются существенные ограничения.

Теоретический или умозрительный подход был одним из наиболее ранних и нашел отражение в работах петрологов конца XIX столетия. В частности, после высказывания Иддингса, что дифференциация происходит путем перемещения в магме окислов, Бреггер и Ф.Ю. Левинсон-Лессинг (1906) установили, что при этом происходит «перемещение групп окислов, соответствующих будущим силикатам изверженной породы». В результате Ф.Ю. Левинсон-Лессинг (1906) пришел к выводу о су-

существовании предельных мономинеральных магм, а затем, вслед за Фогтом, пришел к заключению, что и образование мономинеральных магм вызывается и регулируется эвтектикой. Близка к ней гипотеза Спурра об образовании рудных магм. На основании своих экспериментов Н.Л. Боуэном (1934) была разработана теория кристаллизационной дифференциации базальтовых магм с образованием в результате реакционного взаимодействия кристаллов и расплава моно- и субминеральных оливиновых, пироксеновых, хромшпинелидовых, плагиоклазовых, лейцитовых и титаномагнетитовых пород. В целом же, теоретический метод в чистом виде невозможен, так как для него требуется предварительная геологическая или экспериментальная основа (идея).

Экспериментальный метод был заложен классическими экспериментами Н.Л.Боуэна (1934), показавшим тенденции к образованию существенно мономинеральных оливиновых и плагиоклазовых пород при кристаллизации базальтового расплава. Позже он показал, что система  $\text{SiO}_2\text{-NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$  представляет окончание фракционной кристаллизации, к которому стремятся все магмы. А.А.Маракушев и др. (1978), а также Н.И. Безмен и Н.И. Сук (1983) в своих экспериментах также показали тенденцию базальтового расплава к обогащению нижних частей оливином, но связали это с ликвацией. Экспериментальный метод ограничивается своими техническими возможностями – очень малым временем эксперимента по сравнению с геологическим временем становления расслоенных интрузий и чрезвычайно высокой вязкостью силикатных расплавов.

Нам представляется, что наиболее эффективен геологический метод. Метод основан на анализе геологически и петрографически изученных аутигенных расслоенных или дифференцированных интрузий, определении состава первичных материнских магм, определении спектра и состава дифференциатов и установлении тенденции процесса дифференциации для материнских магм одинакового или близкого состава.

### Спектр экстремальных дифференциатов

Геологическими наблюдениями давно установлено, что при дифференциации базальтовых интрузий образуется три груп-

пы дифференциатов – ультраосновные, основные и кислые (Уэйджер, Дир, 1970) (Рис.1).

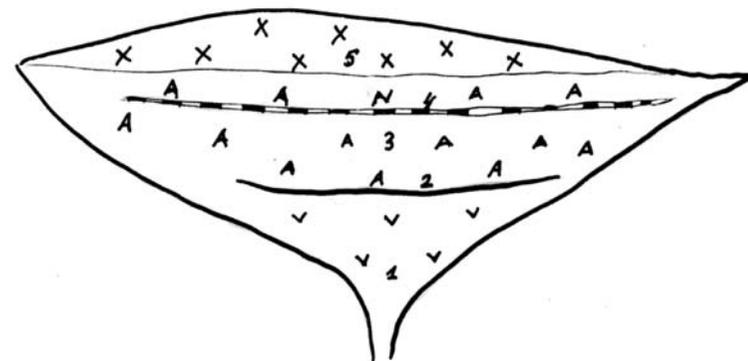


Рис.1. Идеализированная схема строения полнодифференцированной расслоенной интрузии. Условные обозначения: 1 – дунит, 2 – хромитит, 3 – анортзит, 4 – магнетит, 5 – гранитоиды.

Ультраосновные дифференциаты представлены в интрузиях разной степени дифференцированности оливиновыми габбро, троктолитами, плагиоклазовыми гарцбургитами, гарцбургитами, верлитами, бронзититами, клинопироксенитами, плагиоклазовыми и нормальными дунитами. В наиболее дифференцированных интрузиях появляются слои хромититов.

Основные дифференциаты располагаются в средней части интрузии, слагают ее большую часть и представлены габбро-диабазами, габбро, габбро-норитами, пироксеновыми и мономинеральными анортозитами. В наиболее сильно дифференцированных интрузиях появляются слои титаномагнетитов.

Кислые дифференциаты в аутигенных интрузиях представлены гранофировым диабазом, гранофировыми гранитоидами и гранитоидами.

Для некоторых массивов характерно обогащение отдельных пород апатитом и сульфидами, хотя мономинеральных их слоев в расслоенных интрузиях базальтоидного ряда не установлено.

Таким образом, рассматривая всю совокупность расслоенных интрузий мы видим, что с увеличением мощности интрузий и степени их дифференцированности, вначале происходит образование широкого спектра пород от ультраосновных к кислым и обособлением слоев хромититов и титаномагнетитов. За-

тем, с увеличением степени дифференцированности спектр пород снова сужается. Рассматривая его в крайнем выражении, мы видим, что его пределом является образование всё более мономинеральных дифференциатов ограниченных дунитами, хромититами, анортозитами, титаномагнетитами, а также полиминеральными гранитоидами.

**Таким образом, тенденцией экстремальной магматической дифференциации базальтоидных магм является образование широкого спектра пород. Спектр пород (дифференциатов) варьирует в наиболее дифференцированных аутигенных интрузиях от ультраосновного (дуниты, хромититы), основного (анортозиты, титаномагнетиты, возможно апатитовые породы и сульфиды) до кислого состава (гранитоидов).**

Спектр пород в целом идентичен составу петрогенных и акцессорных минералов раскристаллизованных базальтов.

Основная тенденция экстремальных дифференциатов – образование мономинеральных пород

Анализ содержания петрогенных минералов в тех или иных экстремальных дифференциатах расслоенных интрузий показывает, что для них характерно всё более высокое содержание этих минералов, стремящихся к 100%. Это характерно для дунитов, где содержание оливина достигает 99% (Иванов, 1970), для хромититов (до 100%), титаномагнетитовых слоев (до 100%), анортозитов (до 100%). Наиболее удобно это демонстрируется на примере дунитов (рис. 2).

Исключением из этого правила является присутствие дифференциатов гранитоидного состава. Присутствие гранитоидных пород в дифференцированных интрузиях очевидный факт, который интерпретируется как результат дифференциации, ассимиляции более кислых пород или взаимодействия базальтов с породами кровли. Факт увеличения количества кислых пород в зависимости от мощности интрузии также может объясняться этими явлениями. Поэтому для решения вопроса необходимы какие-то более точные доводы. Но вне зависимости от объяснений, гранитоидный состав кислых пород и отсутствие тенденции их дифференцированности может объясняться затруднен-

ной дифференциацией кислых пород в силу их аномально высокой вязкости подчеркиваемой и относительно сухим, бедным флюидами составом дифференцированных базальтоидных интрузий.

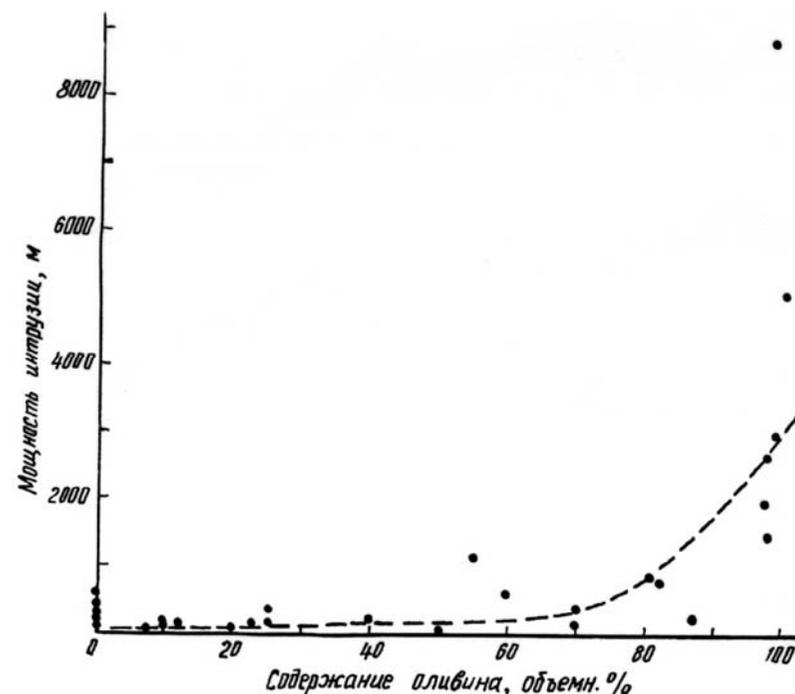


Рис.2. Зависимость содержания оливина в ультраосновных дифференциатах расслоенных интрузий от мощности интрузий. Цифры – номера интрузий из (Иванов, 1976).

**Таким образом, экстремальная дифференциация стремится к образованию дифференциатов мономинерального состава – дунитов, хромититов, анортозитов, титаномагнетитов, а также полиминеральных гранитоидов.**

Следствием из сформулированного правила является возможность расчета количества тех или иных дифференциатов из магм разного состава, а также экстраполяции за пределы реально установленных явлений. Так, в экстремальном случае для

базальтоидных магм нормального не щелочного состава экстремальными дифференциатами должны быть не только указанные выше дифференциаты, но также мономинеральные апатитовые и сульфидные породы.

### Тенденции изменения состава минералов экстремальных дифференциатов

Образование мономинеральных дифференциатов очевидный факт. Но дифференциация только этим не ограничивается. Большинство мономинеральных пород сложено минералами переменного состава (оливин, хромшпинелиды, титаномагнетиты, плагиоклаз, нефелин и т.д.). В интрузиях разной степени дифференцированности устанавливается, что в рамках мономинеральных и субмономинеральных пластов и слоев, также как по всему разрезу интрузии, устанавливается т.н. скрытая слоистость – закономерное изменение состава минералов вверх по разрезу (Уэйджер, Браун, 1970). Как показано, эта тенденция отражает накопление в минералах нижней части пластов катионов-модификаторов с наименьшей ионной плотностью, для верхней с наибольшей ионной плотностью (Иванов, 1976). Тенденция изменения состава минералов переменного состава при экстремальной дифференциации идет в том же направлении.

Для оливина из дунитов установлено, что в наиболее полно дифференцированных интрузиях состав оливина в нижних частях слоя дунитов становится всё более магнезиальным, достигая состава  $Fa_5$  (Иванов, 1976) (Рис.3). Рассматривая тренд изменения состава оливинов из дунитов, можно экстраполировать, что при экстремальной дифференциации его состав будет стремиться к  $Fa_0$ . При этом, однако, надо учитывать фактор т.н. скрытой расслоенности, когда в нижней части мономинеральных дифференциатов состав оливина наименее железистый, тогда как в верхней части он имеет повышенную железистость.

Для плагиоклазов из средних габброидных или анортозитовых частей дифференцированных интрузий устанавливается тенденция обогащения их кальцием и алюминием и стремление для плагиоклазов нижних частей расслоенной серии к идеальному составу анортита, тогда как в верхних частях растет содержание натрия.

Для хромшпинелидов из хромититовых пластов дифференцированных интрузий устанавливается тенденция изменения их состава к разностям обогащенным хромом и магнием, а состав хромшпинелида имеет тенденцию к идеальному составу магнохромита (Иванов, 1977) (Рис.4). При этом для верхних частей хромитовых пластов, также как и для всей серии хромитовых пластов характерно обогащение титаном и железом.

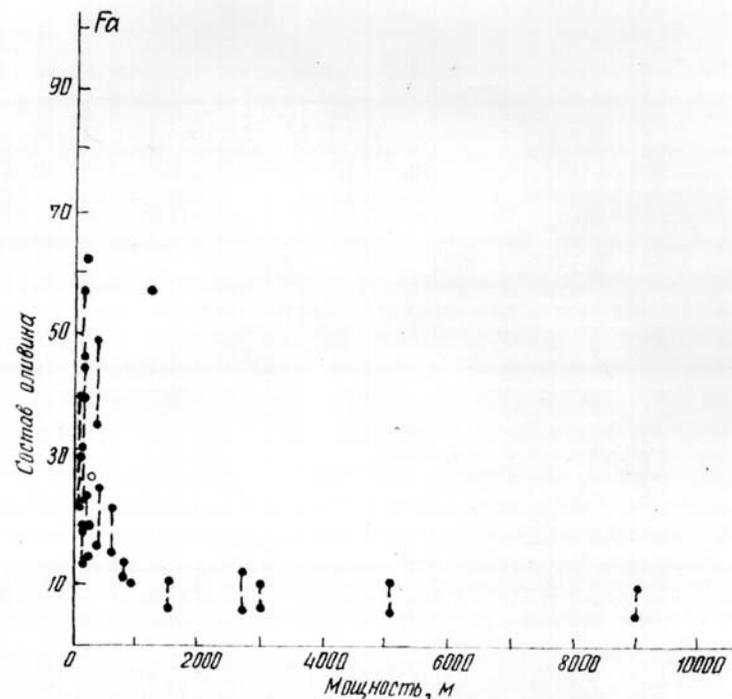


Рис.3 Тенденция к уменьшению железистости оливина с увеличением мощности интрузий и степени их дифференцированности (Иванов, 1976).

Для титаномагнетитов из дифференцированных интрузий устанавливается тенденция обогащения их состава в основании крупных пластов и всей серии титаномагнетитовых пластов Бушвельда к разностям близким к ванадистому (до 2,5%) малотитанистому магнетиту, тогда как титаномагнетиты из верхних титаномагнетитовых пластов обогащаются титаном (до 20%) (Уиллемз, 1973).

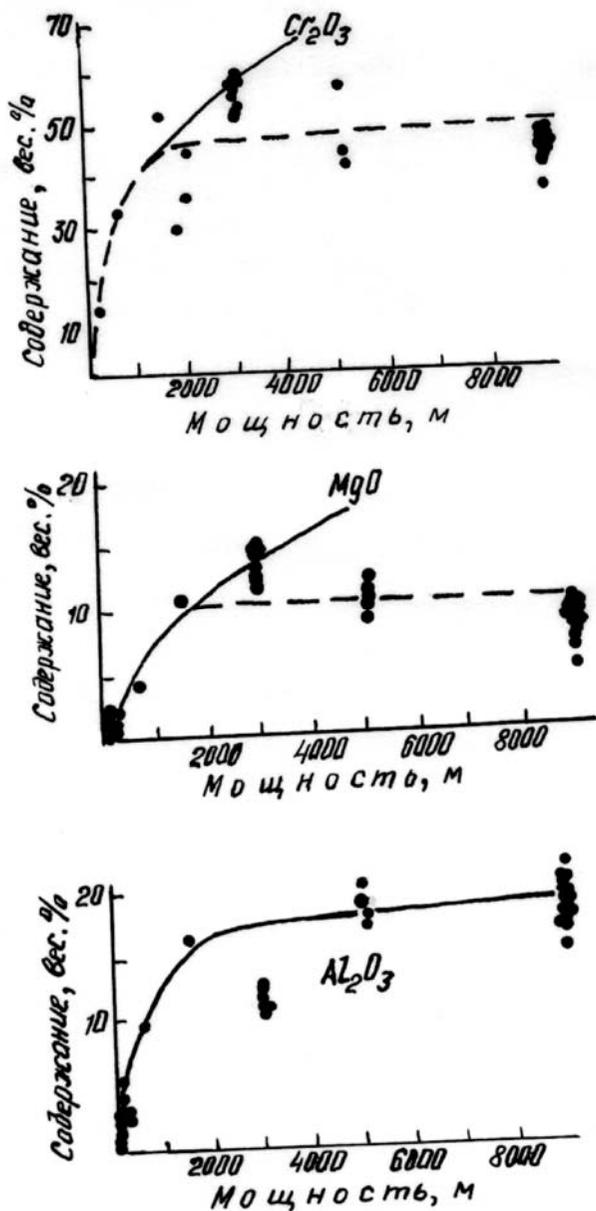


Рис.4. Вариации изменения состава хромшпинелидов хромитита в зависимости от мощности и степени дифференцированности расслоенных интрузий (Иванов, 1977).

Общими для всех рассмотренных минералов является одно – с увеличением степени дифференцированности минералы переменного состава обогащаются компонентами с малым ионным радиусом или меньшей ионной плотностью с учетом их структурного положения в минерале. Экстремальным, по нашему мнению, является образование крайних членов системы, состоящих только из элементов малого ионного радиуса – форстерита, магнохромита, анортита, ванадистого титаномагнетита (ильменита?).

Таким образом, основной тенденцией экстремальной дифференциации является образование мономинеральных пород, обогащенных катионами малого ионного радиуса (форстеритовых, магнохромитовых, анортитовых, ванадистомагнетитовых и т.д.).

Соотношение количества дифференциатов, образующихся при экстремальной дифференциации базальтов

Пользуясь становленными закономерностями, попробуем рассчитать количество тех или иных дифференциатов, образующихся при экстремальной дифференциации базальтов. В качестве примера возьмем средний состав континентального оливинового базальта (среднее из 23 анализов) из работы «Магматические горные породы», (1983), Т.1.Ч.2. стр. 190 (см.табл.).

В качестве экстремальных дифференциатов принимаем форстерит, анортит, рудные минералы, апатит и гранитный остаток. Расчет строго по этим параметрам приводит к дефициту глинозема и образованию неестественного щелочно-кремнеземистого остатка. Очевидно, ошибка обусловлена тем, что при этом не учитывается скрытая минералогическая зональность анортита по разрезу. В этом случае необходимо брать не чистый анортит, а промежуточную разность. Нами для расчета взят An<sub>75</sub>. Расчет происходит в такой последовательности. Вначале вычитается по MgO количество форстеритового дунита, затем из остатка вычитается количество плагиоклаза, рудного компонента и апатита. Остающийся остаток – условное гранитоидное вещество.

Сравнение этих цифр с данными по реальным полно дифференцированным интрузиям показывает, что для дунитов эти 42

цифры достаточно близки, без учета состава. Дифференциаты основного состава в реальных расслоенных интрузиях составляют обычно большую величину, до 80% объема и более. Магнетитовых дифференциатов в большинстве расслоенных интрузий в таких объемах не наблюдается, что может быть обусловлено неполной дифференциацией вещества и расходом железа на фемические минералы. Наконец, слишком высоко содержание гранитоидов. Обычно оно составляет около 10%, хотя по расчетам Н.Л.Боуэна составляет для диабазов 15%. По Ф. Груту (1926) количество гранита, могущего образовываться при дифференциации базальта составляет от 5% и более без учета промежуточных пород среднего состава.

В этом случае результаты будут следующими:

Таблица 1

Расчет результатов экстремальной дифференциации оливинового базальта

Компоненты	Состав, мас.%,	Мол. кол-ва	Мол. кол-ва дунита	Мас. % оливина	Мол. кол-ва An <sub>75</sub>	Мас. % анортита	Гранитоидный остаток, мол. кол-ва	Гранитоидный остаток, мас.%
SiO <sub>2</sub>	48.1	8005	856	5.1	4892	29.4	2257	13.6
TiO <sub>2</sub>	2.1	-	-	-	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6	2668	-	-	2223	11.3	445	12.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5/6	-	-	-	-	-	-	-
FeO	7.5	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0.2	-	-	-	-	-	-	-
MgO	6.9	1711	1711	6.9	-	-	-	-
CaO	9.4	1676	-	-	1334	9.4	-	-
Na <sub>2</sub> O	2.4	774	-	-	-	-	441	7.6
K <sub>2</sub> O	1.1	234	-	-	-	-	234	5.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.3	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	97.2	-	-	12.0	-	51.1	-	18.4

Расчет весового и объемного содержания экстремальных дифференциатов оливинового базальта

Дифференциаты	Содержание, мас.%	Пересчет на 100 мас.;	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пересчет на объем и на 100%
Гранитоид	18.4	18.9	2.7	21.6
Апатит	0.7	0.7	3.2	0.6
Магнетит	15.4	15.8	5.2	9.0
Анортозит	51.1	52.4	2.7	58.3
Дунит	12.0	12.3	3.3	11.1
Итого	97.6	100.1		100.0

Таким образом, ориентировочные данные, полученные расчетным путем интересны, как показатель максимально возможной степени дифференцированности базальтового вещества, возможно недостижимой на планете Земля или в условиях ее коры.

### Выводы

Суммируя вышеизложенное мы можем сформулировать следующие выводы:

1. Экстремальная дифференциация базальтоидной магмы стремится к образованию мономинеральных пород.
2. Предельными дифференциатами являются мономинеральные породы – дуниты, хромититы, анортозиты, титаномагнетиты, а также полиминеральные гранитоиды.
3. Состав мономинеральных дифференциатов идет в сторону увеличения содержаний элементов с минимальной ионной плотностью и образованием форстеритовых дунитов, анортитовых анортозитов, магнохромитов и ванадистых титаномагнетитов.
4. Для оливиновых базальтов соотношение дифференциатов составляют (объем.%): дуниты – 11, анортозитов – 58, магнетитов – 9, апатитовых пород – 0.6, гранитоидов – 21.

## Следствия

В идеальном случае все минералы раскристаллизованных базальтов должны давать самостоятельные мономинеральные слои.

Установление экстремальных дифференциатов дает возможность сравнения с реально наблюдаемыми фактами как в аутигенных, так и полигенных многофазных интрузиях и косвенно определять состав исходных магм.

Существование мономинеральных дифференциатов не дает возможности объяснять образование расслоенных интрузий в результате фракционной кристаллизации и гравитационной дифференциации кристаллов, а лишь явлением докристаллизационной дифференциации.

## Литература

1. **Безмен Н.И., Н.И.Сук.** Базит-гипербазитовое раслоение (эксперимент)// Изв. ВУЗов. Серия геология и разведка. 1983. № 6. С.43-51.
2. **Боуэн Н.Л.** Эволюция изверженных пород. М. ОНТИ. 1934. 324с.
3. **Иванов О.К.** Простое количественное определение степени дифференцированности базальтоидных интрузий// Ежегодник-1971. ИГИГ УНЦ АН СССР. 1972. Свердловск. С.108-109.
4. **Иванов О.К.** Некоторые аспекты хромитонности дифференцированных базальтоидных интрузий// Хромиты Урала, Казахстана, Сибири и Дальнего Востока. М.: ВИМС. 1974. С.36-40.
5. **Иванов О.К.** Титаномагнетитовые концентрации в дифференцированных базальтоидных интрузиях // Минералогия и геохимия железорудных месторождений Урала. Свердловск. УНЦ АН СССР. 1974. С.81-84.
6. **Иванов О.К.** Влияние мощности базальтоидных интрузий на степень их дифференцированности// Ежегодник-1973. ИГИГ УНЦ АН СССР. Свердловск. 1974. С.80-82.
7. **Иванов О.К.** Вариации состава хромшпинелидов по разрезу Сарановского стратиформного хромитового месторождения// Акцессорные и рудные минералы Урала. Мин.сб. 12. Свердловск. УрО АН СССР. 1976. С.66-70.
8. **Иванов О.К., Л.Д.Булькин.** Эволюция состава дифференцированных базальтоидных интрузий // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1976. № 5. С.46-52.
9. **Иванов О.К.** Зависимость состава базальтоидных интрузий от их мощности и степени дифференцированности // Минералогия и геохимия гипербазитов Урала. УНЦ АН СССР. Свердловск. 1977. С.53-57.
10. **Иванов О.К.** Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екб. 1997. 487с.

11. **Иванов О.К.** Расслоенные интрузии – кристаллизационная или докристаллизационная дифференциация в гравитационном поле // Физические поля минералов. Тезис докладов годичного собрания МО РАН. 1998. С.29-30.

12. **Иванов О.К.** Критика некоторых оснований теории Боуэна // Петрография на рубеже XXI века. Итоги и перспективы. Сыктывкар. Т.1. 2000. С.94-96.

13. **Левинсон-Лессинг Ф.Ю.** Дифференциация, эвтектика и энтропия // Изв. Спб Политехнического ин-та. 1906. 6. Вып.1-2. С.279-283.

14. **Маракушев А.А., Н.И.Безмен, С.С.Бокина и др.** К проблеме генезиса мономинеральных магм // Очерки физико-химической петрологии. М.: 1978. Вып.7. С.83-91.

15. **Уиллемз Дж.** Ванадистые магнетитовые руды Бушвельдского комплекса // Магматические рудные месторождения. М.: Недра. 1973. С.129-150.

16. **Уэйджер Л., Г.Браун.** Расслоенные изверженные породы. М. Мир. 1970. 552с.

17. **Bowen N.L.** Results high-temperature research on silicates and its significance in igneous geology // Am. J. Sci. 1937. V.33. p.1-21.

18. **Hess H.H.** Exstreme fractional crystallization of a basaltic magma: the Stillwater igneous complex // Transactions Amer. Geoph. Union. Report a. Papers. Volcanology// 1939. P.430-432.

19. **Grout F.F.** The use of calculations in petrology: a study for students // J. Geol. 1926. 34. N.6.