

Дисциплина Б1.Б.2.02 ПЕТРОЛОГИЯ

Лекции 5-6

Специальность

21.05.02 Прикладная геология

Специализация № 4

**Прикладная геохимия, минералогия,
петрология**

КЛАССИФИКАЦИИ МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

КЛАССИФИКАЦИЯ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ базируется на содержаниях оксидов петрогенных (т.е. составляющих основу большинства горных пород) химических элементов - Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P.

Поскольку кремнезем, как правило, является главным структурообразующим компонентом магматических расплавов, именно его содержание положено в основу классификации магматических пород. По содержанию SiO_2 породы подразделяются на 4 группы:

- *ультраосновные* (SiO_2 менее 45%),
- *основные* (SiO_2 45–52%),
- *средние* (SiO_2 52–63%),
- *кислые* (SiO_2 более 63%).

В экзотических случаях встречаются низкокремнеземистые расплавы с содержанием SiO_2 менее 30 мас.%, а также *ультракислые* – содержащие свыше 78% SiO_2 .

Следующим по значимости химическим параметром магматических пород является суммарное содержание оксидов щелочных металлов ($K_2O + Na_2O$). Вариации щелочности способны существенно изменить минеральный состав породы (как количественный, так и качественный) даже при сохранении постоянного содержания SiO_2 .

По уровню общей щелочности магматические породы принято делить на три **ряда**: *нормальнощелочных*, *умереннощелочных* (или *субщелочных*) и *щелочных* пород.

Принадлежность магматических пород к щелочному ряду обычно определяется присутствием реальных (модальных) фельдшпатоидов (фоидов), либо щелочных пироксенов и амфиболов.

Для классификации магматических пород используют двумерную классификационную диаграмму, в которой по одной оси отложены содержания SiO_2 , а по другой – сумма K_2O и Na_2O . Эту диаграмму обычно именуют TAS (от англ. Total Alkali – Silica).

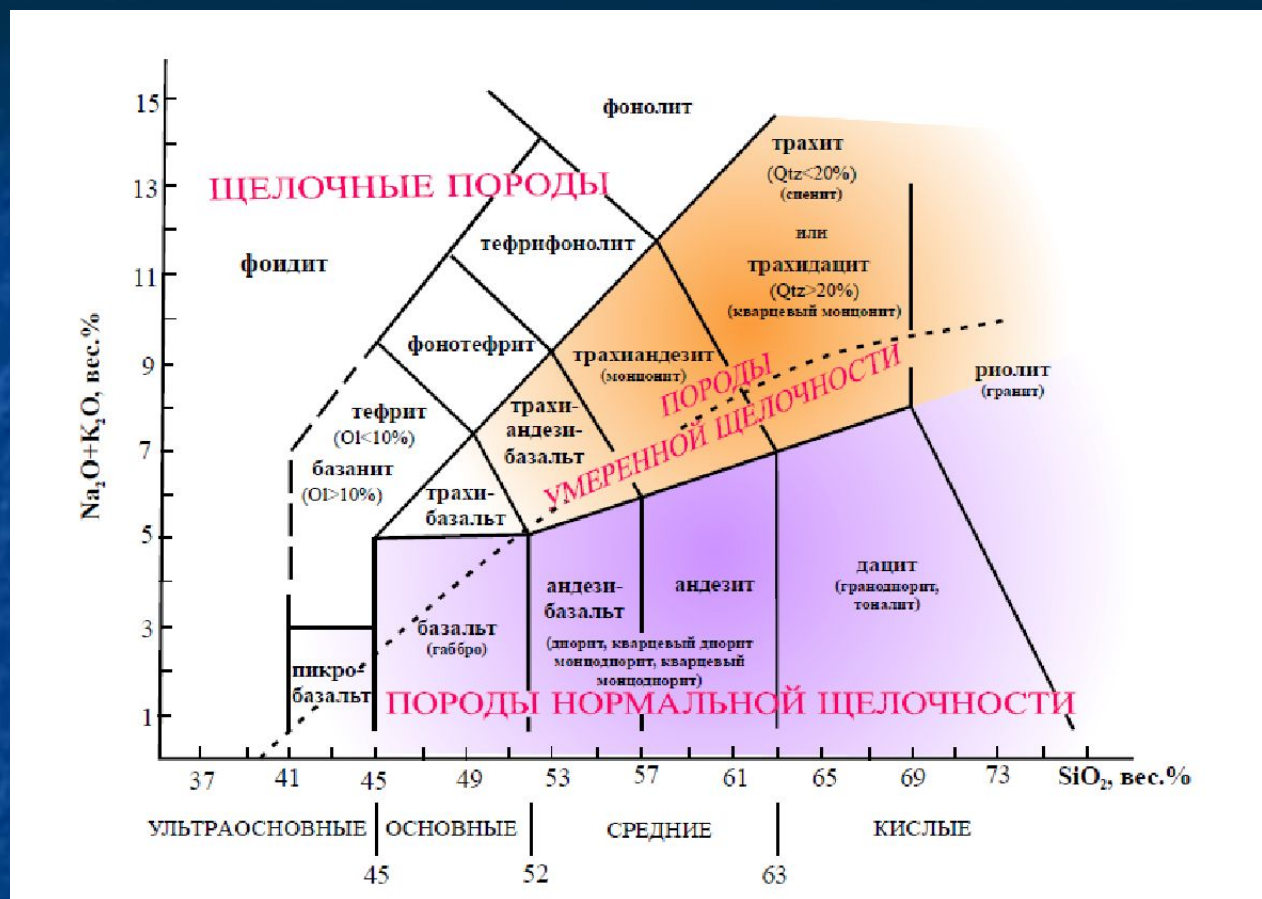


Диаграмма сумма щелочей – кремнезем (TAS) для вулканических пород (A Classification of Igneous Rocks..., 1989, с добавлениями). В скобках приводятся названия плутонических аналогов вулканических горных пород. Пунктирной линией показана граница между щелочными (выше линии) и субщелочными породами при двухуровневом разделении пород по щелочности, принятом в западной литературе.

- В диапазоне содержаний SiO_2 от 41% до 69% границы вышеуказанных рядов щелочности имеют положительный наклон на TAS–диаграмме, т.е. с ростом кремнекислотности переход от нормальнощелочных пород к умереннощелочным и щелочным осуществляется при более высоких значениях $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.
- При всей своей информативности, TAS–диаграмма не учитывает ряд важных геохимических параметров, например, тип щелочности (количественное соотношение содержаний K_2O и Na_2O), уровень глиноземистости (который обычно выражается коэффициентом $\text{Al}/(\text{K} + \text{Na} + 2\text{Ca})$, рассчитанным в атомных количествах), магнезиальность ($\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, также в атомных количествах) и т.д.

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД ПО МОДАЛЬНОМУ МИНЕРАЛЬНОМУ СОСТАВУ

Минеральный состав пород напрямую зависит от их химического состава. Поэтому для классификации можно использовать количественные соотношения модальных (т.е. реально присутствующих в породе) минеральных фаз.

Перед построением диаграмм рассчитываются объемные пропорции следующих минералов и минеральных групп:

Q = кварц;

Kfs = щелочные полевые шпаты (альбит+калишпат);

Pl = плагиоклаз;

F = фельдшпатоиды (нефелин, лейцит, мелилит, кальсит и др.).

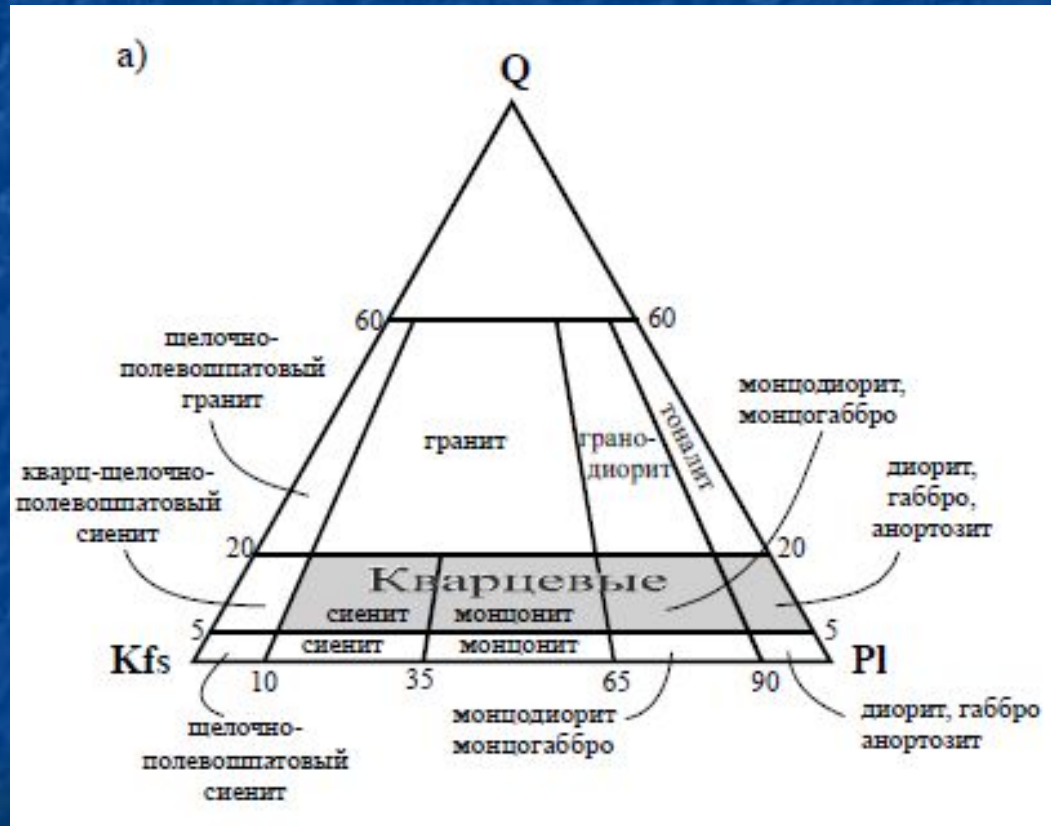
M = мафические минералы (темные слюды, амфиболы, пироксены, оливин и др.)

Минералы групп Q, Kfs, Pl и F относятся к лейкократовым (светлоцветным, салическим), а минералы группы M – меланократовым (темноцветным, цветным, фемическим).

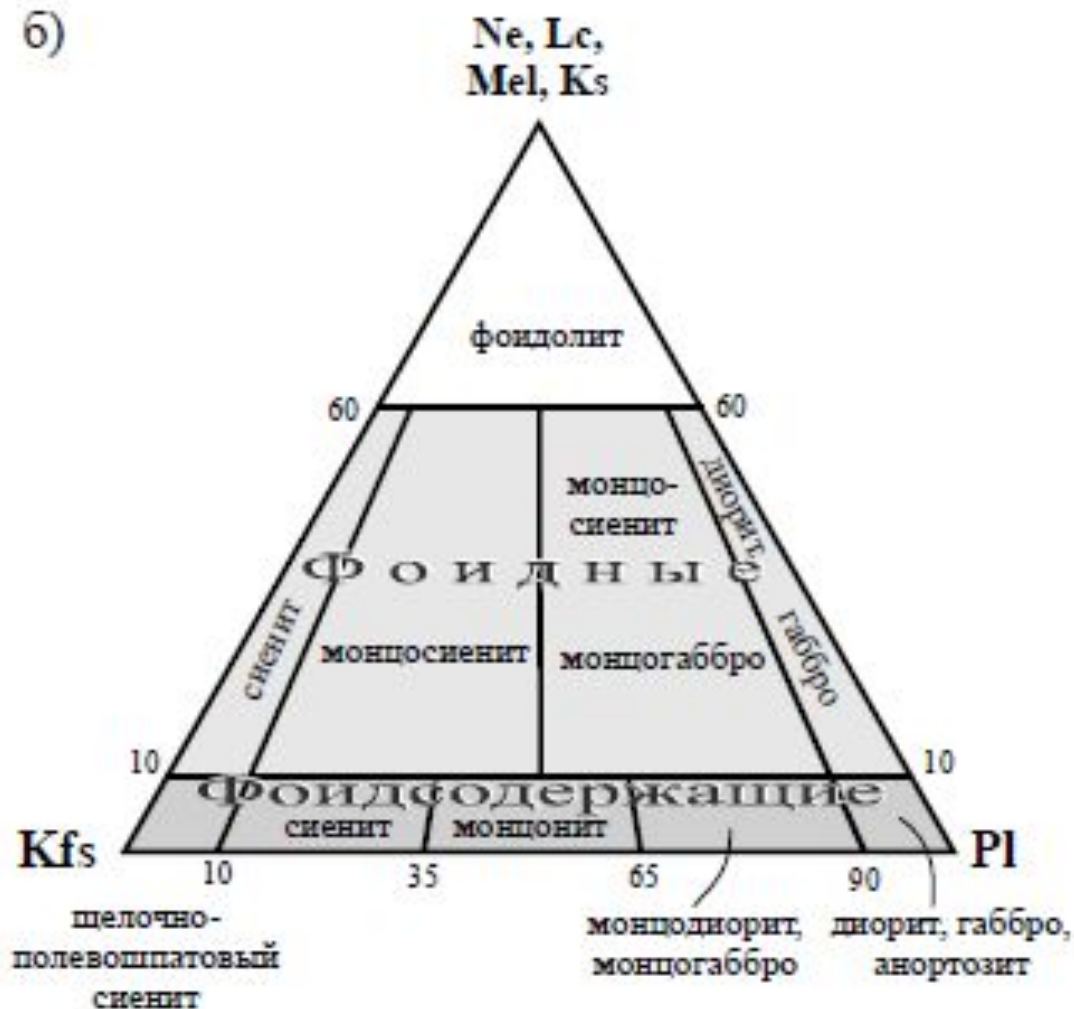
Значение M – содержание меланократовых (цветных) минералов в породе – обычно называют *цветовым (или цветным) индексом (числом)*.

Плутонические породы

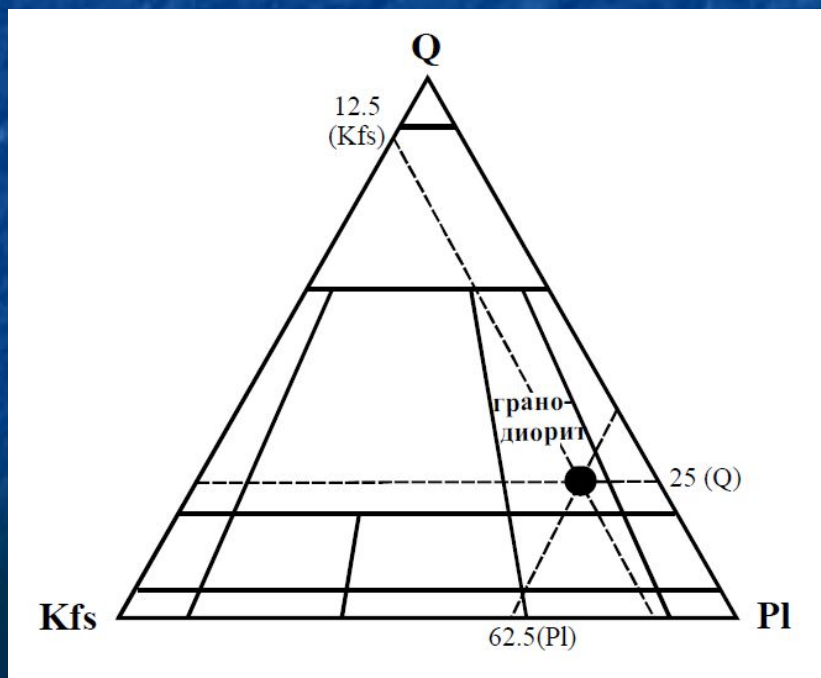
- Полнокристаллические породы, не относящиеся к ультрамафитам, удобно классифицировать с помощью треугольных диаграмм Q–Kfs–Pl и F–Kfs–Pl



6)



- **Пример:** порода содержит 20% кварца, 10% щелочного полевого шпата, 50% плагиоклаза и 20% темноцветных минералов. Для нанесения точки состава данной породы на диаграмму Q–Fsp–Pl исключаем из расчетов величину M, а оставшиеся значения приводим к 100%:
- $A' = A \cdot 100\% / (A+B+C)$ или $A' = A \cdot 100\% / (100 - M)$
- $Q = 20 \cdot 100\% / (20+10+50) = 25\%$
- $Kfs = 10 \cdot 100\% / (20+10+50) = 12.5\%$
- $Pl \cdot 100\% = 50 / (20+10+50) = 62.5\%$



Остаются неучтенными прочие важные минералого-геохимические параметры, например, общая щелочность, качественный состав и содержание темноцветных минералов, состав плагиоклаза и др.

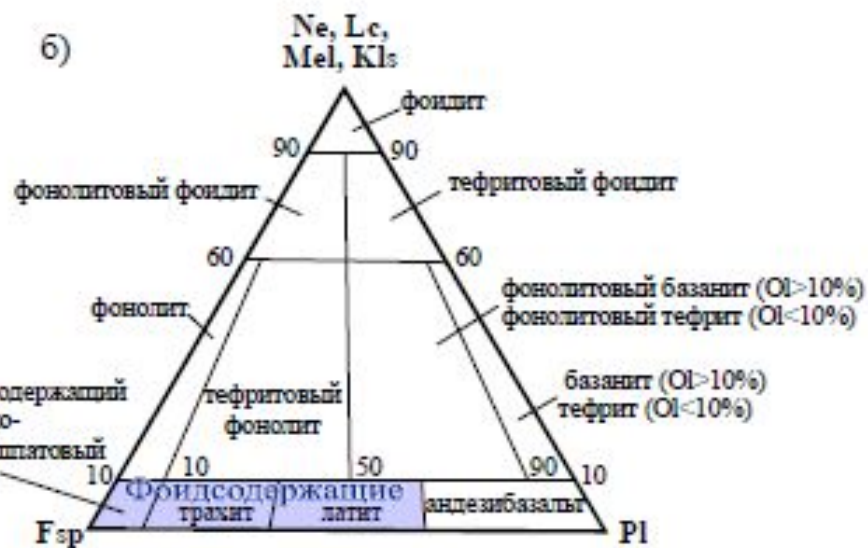
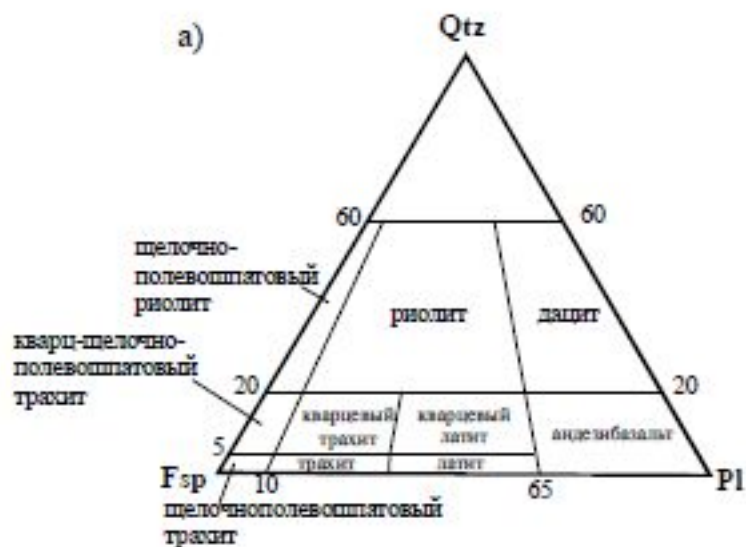
- Для пород, значительную часть которых составляют Fe–Mg силикаты, используются дополнительные диаграммы: для габброидов – Орх–Pl–Срх, Рх–Pl–Оl и Рх–Pl–Нbl, для ультрамафитов – Орх–Ol–Срх и Рх–Ol–Ам.







Вулканические породы



Пересчет химического состава горной породы на нормативный состав (метод CIPW)

- Метод предложен в 1903 году американскими исследователями В. Кроссом, Дж. Иддингсом, Л. Пирсоном и Г. Вашингтоном и назван по начальным буквам фамилий авторов.
- Сущность метода заключается в пересчете химических анализов горных пород, в результате которого содержания оксидов (мас. %) заменяются на содержания молекул (мас. %), отвечающих идеальным стехиометрическим формулам порообразующих и акцессорных минералов. Содержания этих молекул характеризуют нормативный (расчетный) минеральный состав горной породы, который отличается от модального (реального) минерального состава, поскольку при расчете делается много упрощений.

- Пересчитать химический анализ породы на сухой остаток (на безводный состав), приведенный к 100%.

Исходный состав:

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	ппп	Сумма
61,26	0,05	23,39	0,02	0,52	0,56	0,59	5,35	8,15	0,07	0,01	0,01	0,72	100,70

$$\text{SiO}_2' = \text{SiO}_2 * 100 / (\text{“Сумма”} - \text{ппп})$$

Безводный состав:

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	Сумма
61,28	0,05	23,40	0,02	0,52	0,56	0,59	5,35	8,15	0,07	0,01	0,01	100,00

- Перевести массовые проценты оксидов в молекулярные количества. Для этого величину массовых процентов делят на молекулярную массу соответствующего оксида (см. табл.).

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
1,020	0,001	0,230	0,000	0,003	0,008	0,015	0,096	0,131	0,001	0,000	0,000

**Относительные атомные массы петрогенных химических элементов и
молекулярные массы оксидов**

Элемент	Относительная атомная масса	Оксид	Молекулярная масса
H	1,0080	SiO ₂	60,0843
C	12,0110	TiO ₂	79,8788
O	15,9994	Al ₂ O ₃	101,9613
F	18,9984	Cr ₂ O ₃	151,9904
Na	22,9898	Fe ₂ O ₃	159,6922
Mg	24,3050	FeO	71,8464
Al	26,9815	MnO	70,9375
Si	28,0855	MgO	40,3044
P	30,9738	CaO	56,0774
S	32,0660	Na ₂ O	61,9789
Cl	35,4530	K ₂ O	94,1960
K	39,0983	P ₂ O ₅	141,9445
Ca	40,0780	ZrO ₂	123,2228
Ti	47,8800	CO ₂	44,0098
Cr	51,9961	H ₂ O	18,0154
Mn	54,9381		
Fe	55,8470		
Zr	91,2240		

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
1,020	0,001	0,230	0,000	0,003	0,008	0,015	0,096	0,131	0,001	0,000	0,001

- Рассчитывают молекулярные количества нормативных минералов. Расчет ведут в такой последовательности:

Сначала определяют молекулярные количества аксессуарных минералов. Во многих случаях можно ограничиться расчетом количеств апатита, ильменита и магнетита.

1. Для расчета количеств апатита (*ap*) необходимо взять все молекулярное количество P₂O₅ и часть количества CaO в пропорции P₂O₅:CaO=3:10, как следует из стехиометрии формулы апатита Ca₁₀(PO₄)₆(F, Cl, OH)₂.

В нашем случае: P₂O₅ = 0,001, следовательно CaO в апатите составит 0,001*10/3=0,003.
Остаток CaO (за вычетом апатита) – 0,093.

2. Ильменит (*il*) FeTiO₃ составляем из равных молекулярных количеств TiO₂ и FeO[#] (FeO[#] = FeO + MnO). Если TiO₂ > FeO[#], то оставшиеся молекулы TiO₂ рассматриваются, как рутил (*ru*).

В нашем случае: TiO₂ = 0,001, следовательно FeO в ильмените составит 0,001.
Остаток FeO (за вычетом ильменита) – 0,007.

3. Магнетит (*mt*) составляем из равных количеств Fe₂O₃ и FeO[#]. Если на данном этапе окажется, что молекул Fe₂O₃ > (FeO[#] – *il*), то избыток Fe₂O₃ рассматривается, как нормативный гематит.

В нашем случае: Fe₂O₃ = 0,003, следовательно FeO в магнетите составит 0,003.
Остаток FeO (за вычетом магнетита) – 0,004.

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
1,020	0,001	0,230	0,000	0,003	0,008	0,015	0,096	0,131	0,001	0,000	0,001

Далее определяем количество нормативных полевых шпатов: ортоклаза, альбита и анортита.

1. Для образования молекул ортоклаза (*or*) берем все количество K₂O, а также часть Al₂O₃ и SiO₂ в пропорции K₂O:Al₂O₃:SiO₂ = 1:1:6 исходя из формулы KAlSi₃O₈.

В нашем случае: K₂O = 0,001, следовательно Al₂O₃ = 0,001, SiO₂ = 0,006.

Остаток Al₂O₃ = 0,229; SiO₂ = 1,014.

2. Для образования альбита (*ab*) используем Na₂O, Al₂O₃ и SiO₂ в пропорции 1:1:6. Если в породе Na₂O > Al₂O₃, то избыток Na₂O идет на образование акмита (*ac*) в пропорции Na₂O:Fe₂O₃:SiO₂ = 1:1:4. В этом случае *ac* рассчитывают раньше, чем *mt*. Оставшийся после образования *ac* Fe₂O₃ присоединяют к FeO[#] в виде молекулы *mt*. Если в породе имеется нормативный *ac*, то для образования анортита не остается Al₂O₃ и *an* отсутствует.

В нашем случае: Na₂O = 0,131, следовательно Al₂O₃ = 0,131, SiO₂ = 0,524.

Остаток Al₂O₃ = 0,098; SiO₂ = 0,490.

3. Если (Na₂O + K₂O) > Al₂O₃, то расписываем *an*, используя CaO, Al₂O₃ и SiO₂ в пропорции 1:1:2. Если после образования *or* и *ab* осталось такое количество Al₂O₃, что Al₂O₃ < CaO, то пропорцию CaO:Al₂O₃:SiO₂ = 1:1:2 составляем, исходя из количества Al₂O₃. При этом после образования *an* остается избыток CaO, который пойдет на построение молекул диопсида (*di*). Если после образования *or* и *ab* Al₂O₃ > CaO, то пропорцию CaO:Al₂O₃:SiO₂ = 1:1:2 составляем, исходя из количества CaO. При этом после образования *an* остается избыток Al₂O₃, который рассматривается как нормативный корунд (*C*).

В нашем случае: Al₂O₃ = 0,098, следовательно CaO = 0,098, SiO₂ = 0,196 – в анортит.

Остаток CaO = 0; SiO₂ = 0,294.

В остатке - SiO₂ = 0,294, MgO = 0,014 и FeO = 0,04, что соответствует нормативному оливину или энстатиту и кварцу.

Далее рассчитываем количество нормативного диопсида: $di = wo + en + fs$ учитывая, что в этом минерале $wo:(en+fs) = CaO:(MgO+FeO^{\#}) = 1:1$. Количество wo равно молекулярному количеству CaO, которое осталось после образования ap и an ; $en+fs=wo$.

Пропорцию $en:fs$ принимаем равной отношению $MgO:FeO^I$ (FeO^I — остаток $FeO^{\#}$ после образования il и mt). В состав диопсида входит SiO_2 в пропорциях $CaO:SiO_2=1:1$; $MgO:SiO_2=1:1$; $FeO^I:SiO_2=1:1$. Если в породе содержится нормативный корунд, то диопсид отсутствует.

После того как образованы полевые шпаты и диопсид, рассчитываем нормативные гиперстен ($hy = en + fs$) и оливин ($ol = fo + fa$).

1. Если после образования диопсида остатки MgO , FeO и SiO_2 таковы, что $SiO_2 \leq (MgO+FeO)_2$, то в породе содержится только нормативный гиперстен, а оливин отсутствует. Формируем гиперстен, исходя из пропорции $(MgO+FeO):SiO_2 = 1:1$ ($MgO = en$, $FeO = fs$), а избыток SiO_2 , оставшийся после образования гиперстена, рассматривается как нормативный кварц (Q).

2. Если после расчета диопсида $(MgO+FeO) > SiO_2 > 0,5(MgO+FeO)$, то в породе содержится hy и ol . При этом

$$hy + 2ol = MgO + FeO$$

$$hy + ol = SiO_2.$$

Отсюда:

$$ol = (MgO + FeO) - SiO_2$$

$$hy = 2SiO_2 - (MgO + FeO).$$

Относительные количества en и fs , fo и fa пропорциональны MgO и FeO , оставшимся после образования il , mt и di . Если в породе содержится нормативный ol , то кварц (Q) отсутствует.

Расчет нормативного минерального состава удобно вести, последовательно заполняя столбцы таблицы. В каждый столбец таблицы заносим то молекулярное количество оксидов, которое расходуется на образование соответствующих нормативных минералов. При этом всегда надо начинать с оксида, который расходуется на образование данного минерала полностью: P_2O_5 в апатите, TiO_2 в ильмените, Fe_2O_3 в магнетите, K_2O в ортоклазе, Na_2O в альбите и т. д. В последнюю очередь распределяются оксиды, входящие в состав нескольких минералов: FeO и MgO — в диопсиде, гиперстене и оливине.

Пример пересчета породы основного состава

Базальт		Молекулярные кол-ва	ap	il	mt	Полевые шпаты			di			ol		hy	
Оксиды, мас. %						or	ab	an	wo	en	fs	fo	fa	en	fs
SiO ₂	49,29	821				72	336	188	82	71	11	37	6	16	2
TiO ₂	1,69	21		21											
Al ₂ O ₃	16,53	162				12	56	94							
Fe ₂ O ₃	5,45	34			34										
FeO	5,69	79		21	34						11		12		2
MnO	0,13	1													
MgO	6,50	161								71		74		16	
CaO	10,06	179	3					94	82						
Na ₂ O	3,49	56					56								
K ₂ O	1,05	12				12									
P ₂ O ₅	0,12	1	1												
Молекулярные количества минералов:			1	21	34	12	56	94	82	71	11	37	6	16	2
Минералы, мас. %: (сумма = 99,98)			0,34	3,19	7,87	6,68	29,36	26,15	9,52	7,13	1,45	5,21	1,22	1,61	0,26

После того как рассчитаны молекулярные количества оксидов, которые пошли на построение нормативных минералов, определяем молекулярные количества самих этих минералов. Молекулярные количества минералов равны количествам тех оксидов, которые входят в формулы с коэффициентом 1. Например, количество *or* равно молекулярному количеству K_2O , количество *ol* равно молекулярному количеству SiO_2 и т. п.

Молекулярные количество минералов переводим затем в массовые проценты. Для этого умножаем молекулярные количества на молекулярные массы минералов и полученный результат делим на 1000 (если при расчете молекулярных количеств был введен коэффициент 1000). Пример (табл.3): $or = 12 * 556,66 : 1000 = 6,68$ мас. %.

Если весь расчет выполнен правильно, то сумма массовых процентов нормативных минералов должна равняться 100. Отклонения от этой величины могут быть связаны лишь с неточностями при округлении величины в процессе перевода массовых процентов в молекулярные количества и обратно. Если отклонение составляет более 1%, значит в расчете имеются ошибки.