

# 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  $\text{SiO}_2$  породы подразделяются на 4 группы:

- *ультраосновные* ( $\text{SiO}_2$  менее 45%),
- *основные* ( $\text{SiO}_2$  45–52%),
- *средние* ( $\text{SiO}_2$  52–63%),
- *кислые* ( $\text{SiO}_2$  более 63%).

В экзотических случаях встречаются низкокремнеземистые расплавы с содержанием  $\text{SiO}_2$  менее 30 мас.%, а также *ультракислые* – содержащие свыше 78%  $\text{SiO}_2$ .

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).

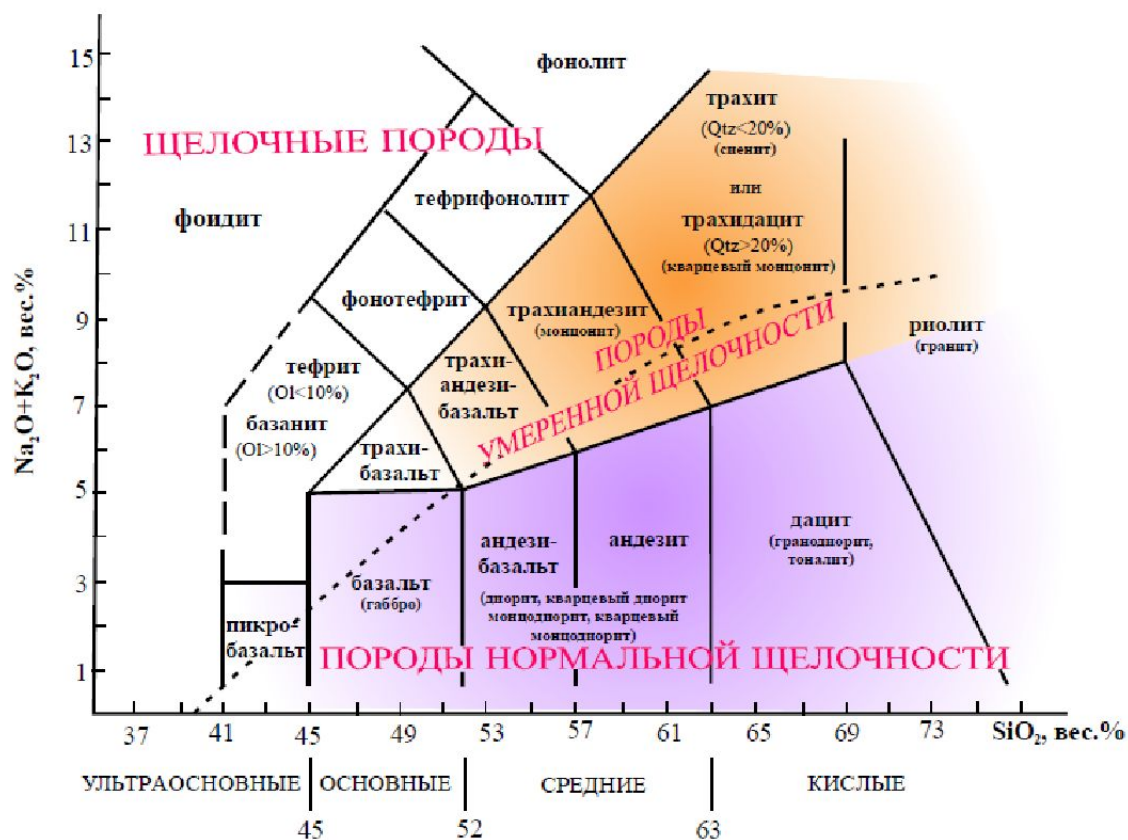


Диаграмма сумма щелочей – кремнезем (TAS) для вулканических пород (A Classification of Igneous Rocks..., 1989, с добавлениями). В скобках приводятся названия plutonic аналогов вулканических горных пород. Пунктирной линией показана граница между щелочными (выше линии) и субщелочными породами при двухуровневом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

- В диапазоне содержаний  $\text{SiO}_2$  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  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ ), 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, кальсилит и др.).

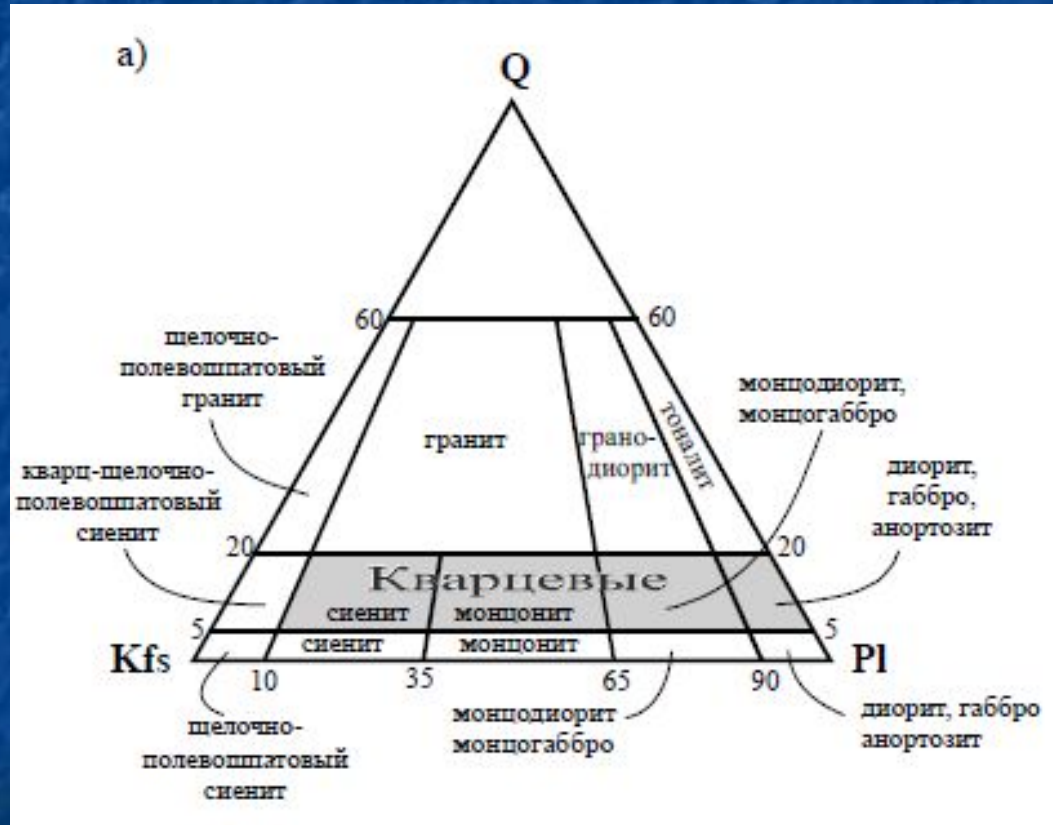
M = мафические минералы (темные слюды, амфиболы, пироксены, оливин и др.)

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

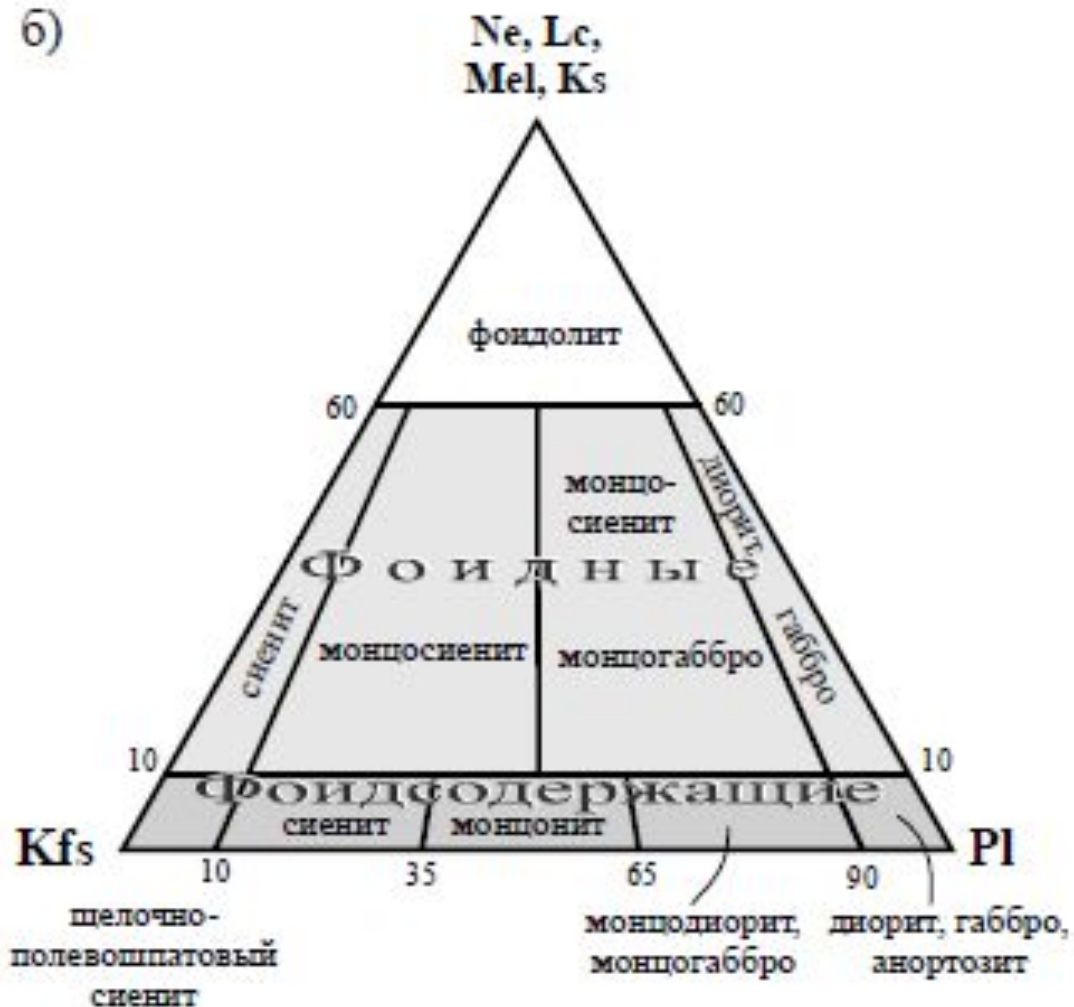
Значение M – содержание меланократовых (цветных) минералов в породе – обычно называют *цветовым (или цветным) индексом (числом)*.

# Плутонические породы

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

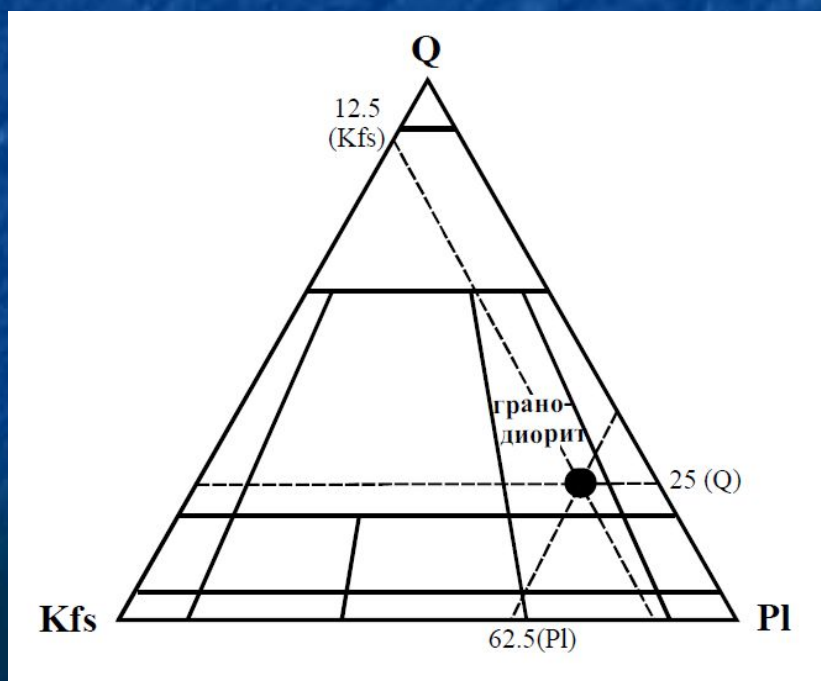


б)



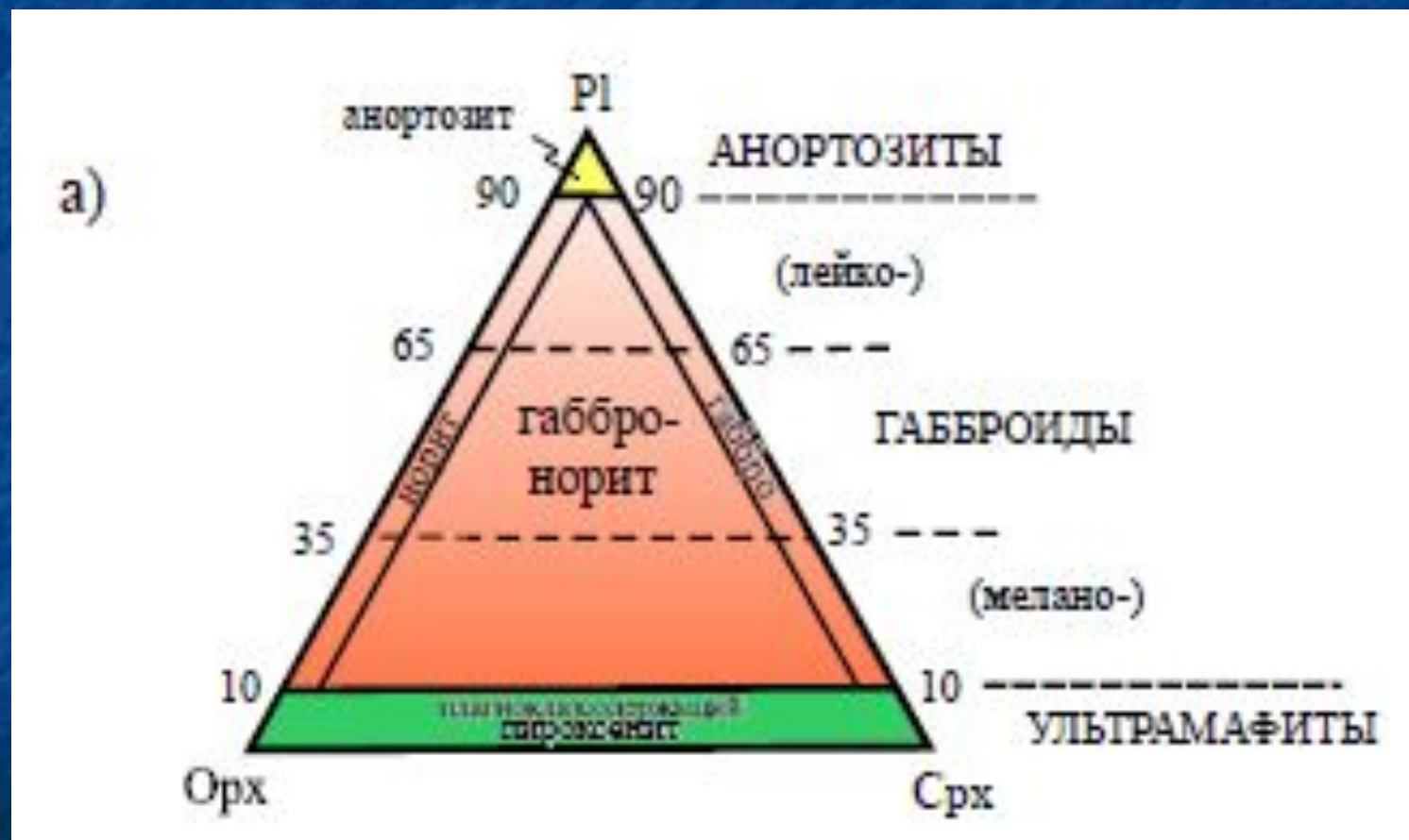


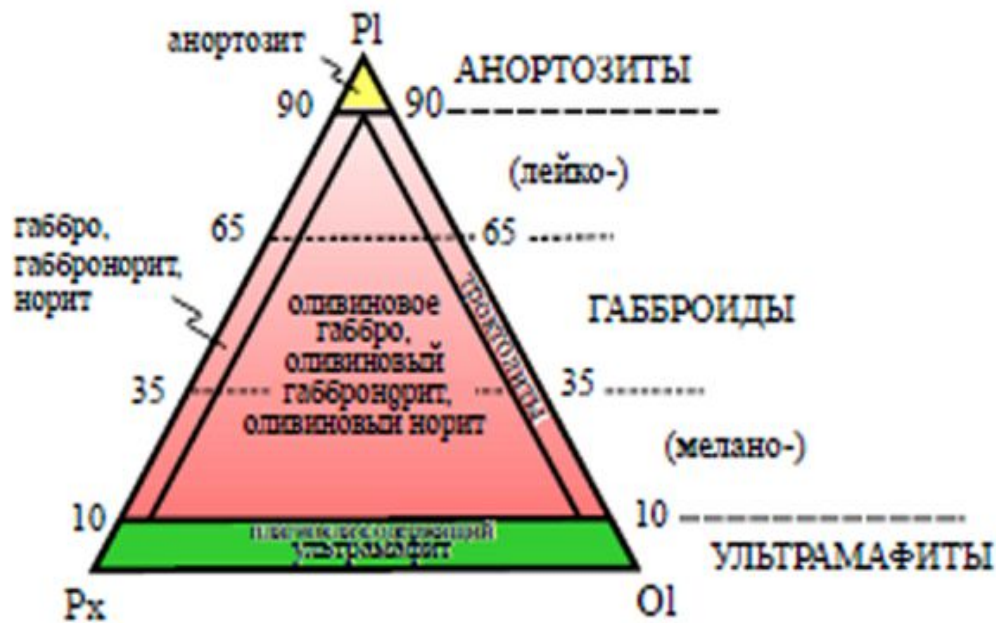
- **Пример:** порода содержит 20% кварца, 10% щелочного полевого шпата, 50% плагиоклаза и 20% темноцветных минералов. Для нанесения точки состава данной породы на диаграмму Q–Fsp–Pl исключаем из расчетов величину M, а оставшиеся значения приводим к 100%:
  - $A' = A \cdot 100\% / (A+B+C)$  или  $A' =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



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

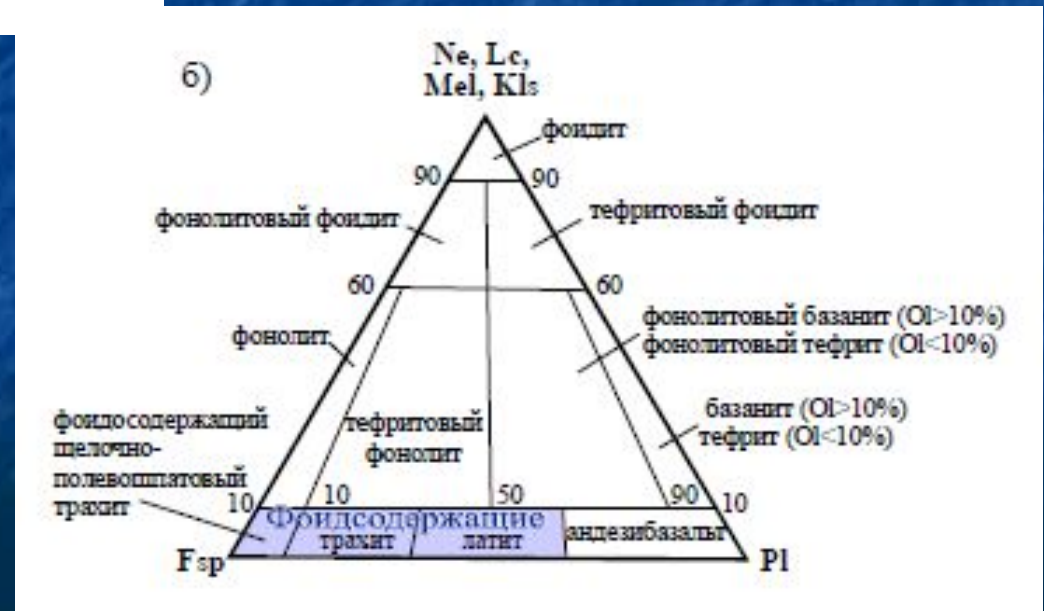
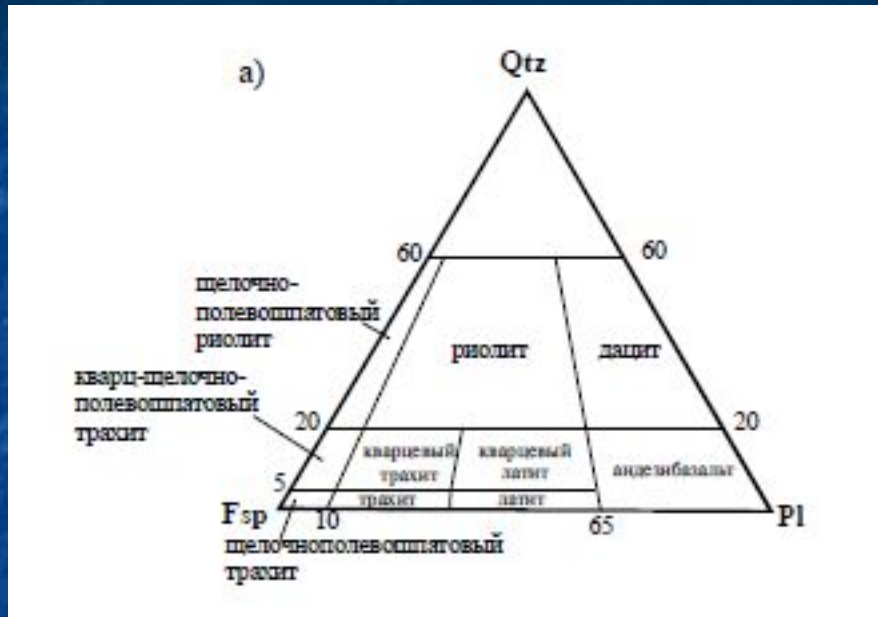
- Для пород, значительную часть которых составляют Fe–Mg силикаты, используются дополнительные диаграммы: для габброидов – Орх–Pl–Срх, Рх–Pl–Ol и Рх–Pl–Нbl, для ультрамафитов – Орх–Ol–Срх и Рх–Ol–Am.







# Вулканические породы



# Пересчет химического состава горной породы на нормативный состав (метод сірw)

- 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 породообразующих 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:

SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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:

SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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.).

SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na2O	K2O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
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 <sub>2</sub>	60,0843
C	12,0110	TiO <sub>2</sub>	79,8788
O	15,9994	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101,9613
F	18,9984	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	151,9904
Na	22,9898	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	61,9789
Cl	35,4530	K <sub>2</sub> O	94,1960
K	39,0983	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	141,9445
Ca	40,0780	ZrO <sub>2</sub>	123,2228
Ti	47,8800	CO <sub>2</sub>	44,0098
Cr	51,9961	H <sub>2</sub> O	18,0154
Mn	54,9381		
Fe	55,8470		
Zr	91,2240		



SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
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 акцессорных минералов. Во многих случаях можно ограничиться расчетом количеств апатита, ильменита и магнетита.

1. Для расчета количеств апатита (*ap*) необходимо взять все молекулярное количество P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и часть количества CaO в пропорции P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:CaO=3:10, как следует из стехиометрии формулы апатита Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(F, Cl, OH)<sub>2</sub>.

**В нашем случае:** P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,001, следовательно CaO в апатите составит 0,001\*10/3=0,003. Остаток CaO (за вычетом апатита) – 0,093.

2. Ильменит (*il*) FeTiO<sub>3</sub> составляем из равных молекулярных количеств TiO<sub>2</sub> и FeO<sup>#</sup> (FeO<sup>#</sup> = FeO + MnO). Если TiO<sub>2</sub> > FeO<sup>#</sup>, то оставшиеся молекулы TiO<sub>2</sub> рассматриваются, как рутил (*ru*).

**В нашем случае:** TiO<sub>2</sub> = 0,001, следовательно FeO в ильмените составит 0,001. Остаток FeO (за вычетом ильменита) – 0,007.

3. Магнетит (*mt*) составляем из равных количеств Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO<sup>#</sup>. Если на данном этапе окажется, что молекул Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > (FeO<sup>#</sup> – *il*), то избыток Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> рассматривается, как нормативный гематит.

**В нашем случае:** Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,003, следовательно FeO в магнетите составит 0,003. Остаток FeO (за вычетом магнетита) – 0,004.

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
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 K<sub>2</sub>O, а также часть Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> в пропорции K<sub>2</sub>O:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SiO<sub>2</sub> = 1:1:6 исходя из формулы KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

**В нашем случае:** K<sub>2</sub>O = 0,001, следовательно Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,001, SiO<sub>2</sub> = 0,006.

Остаток Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,229; SiO<sub>2</sub> = 1,014.

2. Для образования альбита (*ab*) используем Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub> в пропорции 1:1:6. Если в породе Na<sub>2</sub>O > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, то избыток Na<sub>2</sub>O идет на образование акмита (*ac*) в пропорции Na<sub>2</sub>O:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SiO<sub>2</sub> = 1:1:4. В этом случае *ac* рассчитывают раньше, чем *mt*. Оставшийся после образования *ac* Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> присоединяют к FeO<sup>#</sup> в виде молекулы *mt*. Если в породе имеется нормативный *ac*, то для образования анортита не остается Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и *an* отсутствует.

**В нашем случае:** Na<sub>2</sub>O = 0,131, следовательно Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,131, SiO<sub>2</sub> = 0,524.

Остаток Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,098; SiO<sub>2</sub> = 0,490.

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

**В нашем случае:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,098, следовательно CaO = 0,098, SiO<sub>2</sub> = 0,196 – в анортит.

Остаток CaO = 0; SiO<sub>2</sub> = 0,294.

В остатке - SiO<sub>2</sub> = 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	<i>ap</i>	<i>il</i>	<i>mt</i>	Полевые шпаты			<i>di</i>			<i>ol</i>		<i>hy</i>	
Оксиды, мас. %						<i>or</i>	<i>ab</i>	<i>an</i>	<i>wo</i>	<i>en</i>	<i>fs</i>	<i>fo</i>	<i>fa</i>	<i>en</i>	<i>fs</i>
$SiO_2$	49,29	821				72	336	188	82	71	11	37	6	16	2
$TiO_2$	1,69	21		21											
$Al_2O_3$	16,53	162				12	56	94							
$Fe_2O_3$	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						
$Na_2O$	3,49	56					56								
$K_2O$	1,05	12				12									
$P_2O_5$	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.