

# Термодинамик- геологийн судалгаанд

О. Гэрэл

[gerel@must.edu.mn](mailto:gerel@must.edu.mn)

# Термодинамик

## What is Thermodynamics? (Definition + Examples)



I am **heat** and I am **moving**.

That's it. This is the simple meaning of thermodynamics.

Thermodynamics means the study of **heat in motion**.

**Thermodynamics = Thermo + Dynamics**  
(Heat) (Motion)

**Definition:** Thermodynamics is a science that describes how thermal energy is converted from one form to the other and how it affects the matter.

Термодинамик бол дулаан, ажил, энергийн (эрчим хүчний) хоорондын хамаарлыг судалдаг шинжлэх ухаан.

Термодинамикийн хуулиуд нь систем дэх энерги хэрхэн өөрчлөгдөж, систем нь хүрээлэн буй орчинд ашигтай ажил гүйцэтгэж чадах эсэхийг тодорхойлдог.

*Термодинамик - дулааны, механик, химийн үйл явцын хөдөлгөгч хүчний тухай хамгийн ерөнхий шинжлэх ухаан*

*А. Эйнштейн*

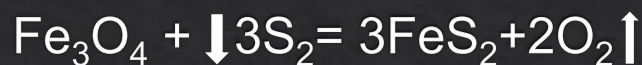
# Термодинамик-геологийн шинжлэх ухаанд

- ◇ *Эрдэс үүсэх урьдчилсан загвар*
- ◇ *Чулуулаг үүсэх нөхцөл*
- ◇ *Эрдсийн ассоциаци тодорхойлох*
- ◇ *Эрдсийн найрлага тодорхойлох*
- ◇ Термодинамик -дулаан, даралтын дор чулуулаг, эрдсийн тогтвортой байдал тогтооно.
- ◇ Термодинамикийн хувьд эхний болон эцсийн байдал нь чухал бөгөөд урвал ямар замаар явах нь хамаагүй.
- ◇ **Геологийн хувьд бид эцсийн байдлыг мэддэг бөгөөд анхны байдлыг таамаглаж байдаг.**

# Байгалийн тэнцвэрт системийн термодинамик загвар

- ◇ Дүгнэлт: **Байгалийн процесст хоёр төрлийн компонент байна:**
- ◇ **Хөөлгөөнгүй ба хөдөлгөөнт**

Магнетит  $\longrightarrow$  пирит



Fe – хөдөлгөөнгүй,

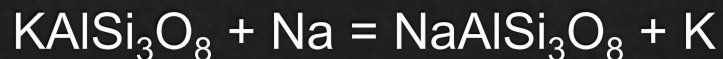
O – системээс гарсан

S – системд орсон

Компонентийн хоёр бүлэг


**Fe - S, O**

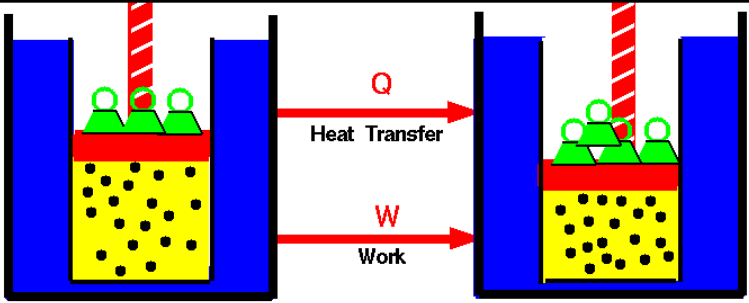
K хээрийн жонш  $\longrightarrow$  альбит



**Al, Si, O хөдөлгөөнгүй – Na, K хөдөлгөөнт компонент**

# Термодинамикийн нэгдүгээр хууль

 **First Law of Thermodynamics** Glenn Research Center



State 1  $E = \text{Internal Energy}$  State 2

$$E_2 - E_1 = Q - W$$

Any thermodynamic system in an equilibrium state possesses a state variable called the internal energy (E). Between any two equilibrium states, the change in internal energy is equal to the difference of the heat transfer into the system and work done by the system.

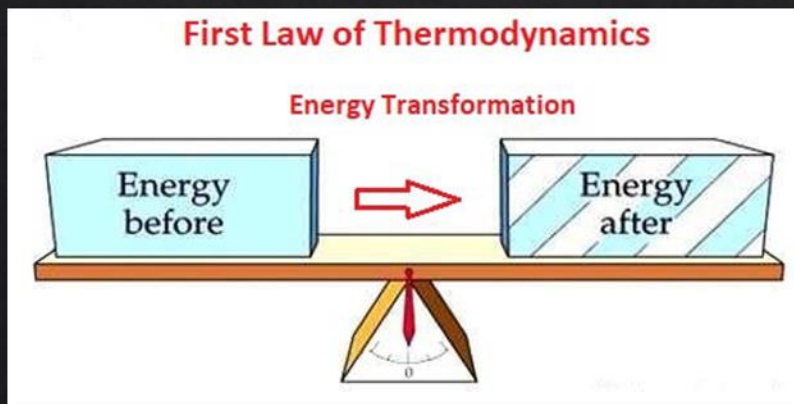
Термодинамикийн 1-р хууль нь энергийг үүсгэх эсвэл устгах боломжгүй, харин түүнийг шилжүүлэх боломжтой гэж заасан байдаг.

$$Q = \Delta U + A$$

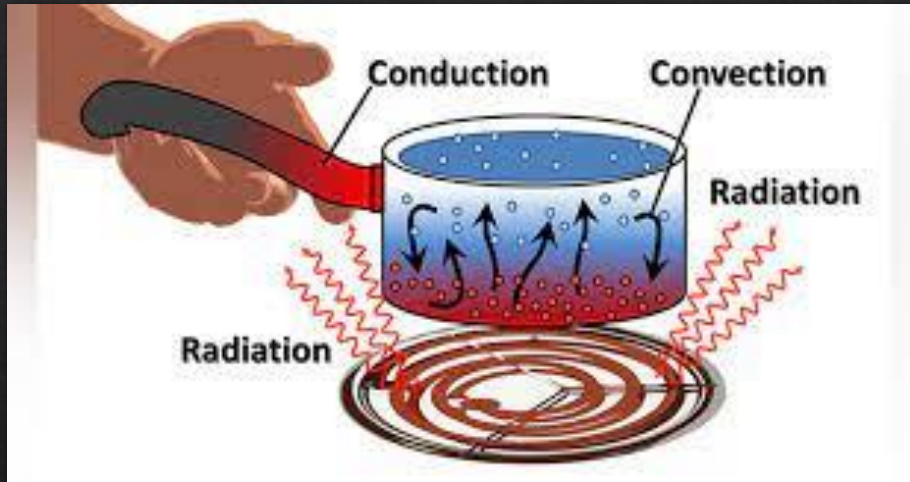
Q – системийн нийт дулаан

$\Delta U$ -дотоод эрчим хүч

A -ажил



# Кондукци, конвекци, радиаци




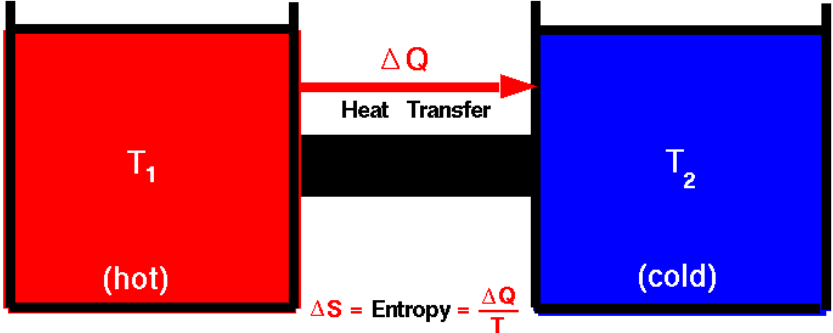
**Кондукци**- дулаан дамжуулалт нь объектуудын хооронд шууд харьцах замаар явагддаг.

**Конвекци** дулаан дамжуулалт шингэний дотор явагддаг.

**Радиаци** дулаан цахилгаан соронзон долгионоор дамждаг. Температурын зөрүүгээс болж дулааны дамжуулалт явагдана.

# Термодинамикийн хоёрдугаар хууль

 **Second Law of Thermodynamics** Glenn Research Center



$\Delta S = \text{Entropy} = \frac{\Delta Q}{T}$

There exists a useful thermodynamic variable called entropy (S). A natural process that starts in one equilibrium state and ends in another will go in the direction that causes the entropy of the system plus the environment to increase for an irreversible process and to remain constant for a reversible process.

$S_f = S_i$  (reversible)       $S_f > S_i$  (irreversible)

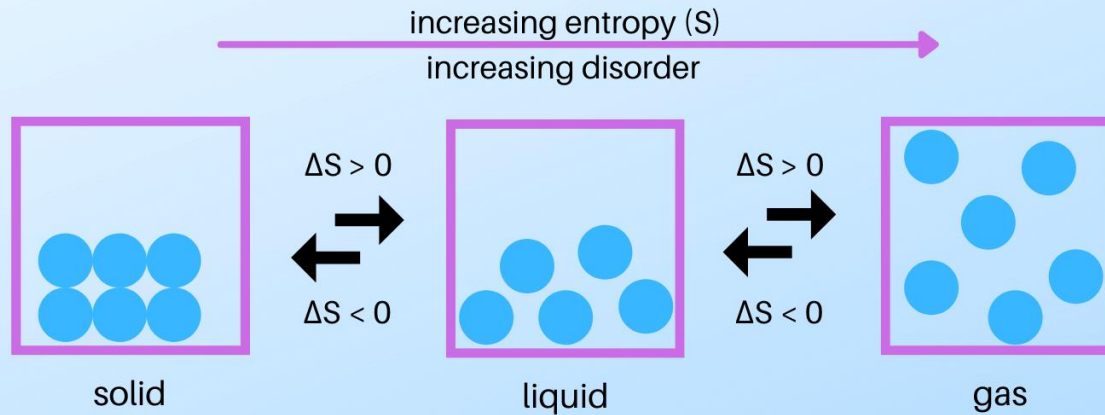
- Термодинамикийн хоёрдугаар хууль нь байгалийн термодинамик үйл явцад харилцан үйлчлэлцдэг термодинамик системүүдийн энтропийн нийлбэр хэзээ ч багасдаггүй. Энэхүү мэдэгдлийн нийтлэг үр дагавар нь **дулаан нь хүйтэн биеээс дулаан бие рүү аяндаа дамждаггүй** гэсэн үг юм.

**S**- энтропи – бодисын дотоод энергийн нөөцийг буюу дулааны агуулага тодорхойлох утга.

# Энтропи

## What Is Entropy?

Entropy is a measure of the disorder of a system or energy unavailable to do work.

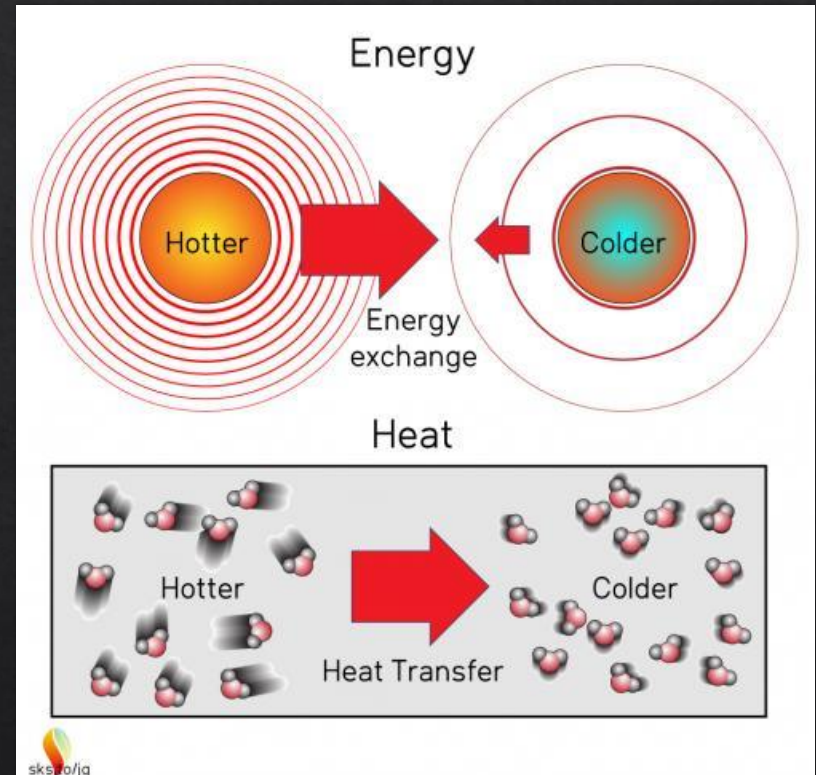
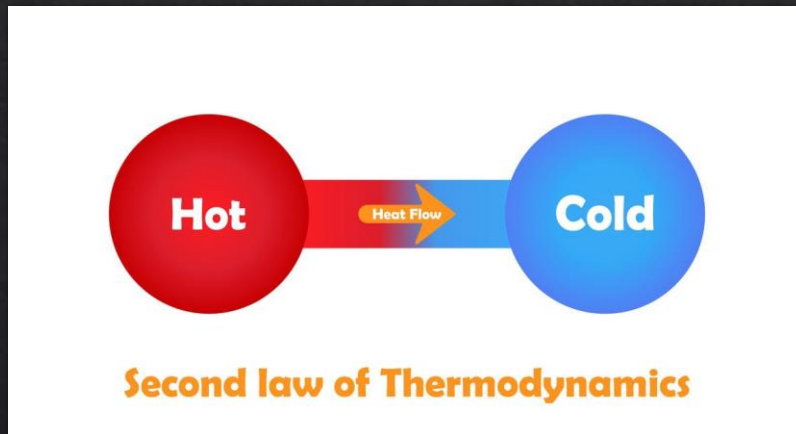


sciencenotes.org

Энтропи бол аливаа систем дэх эмх замбараагүй байдлын хэмжүүр

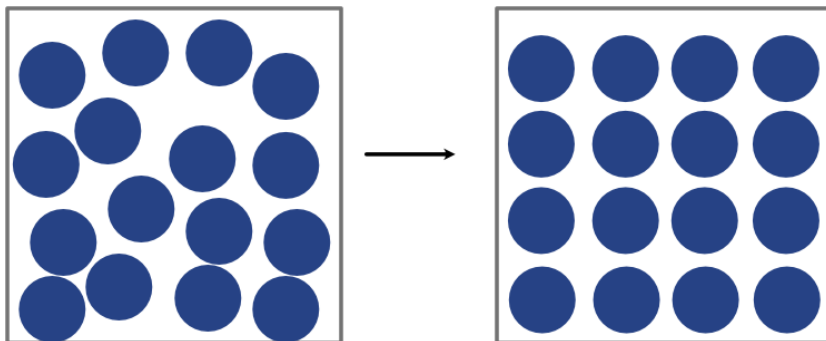


# Хоёрдугаар хууль



# Термодинамикийн гуравдугаар хууль

## Third Law of Thermodynamics



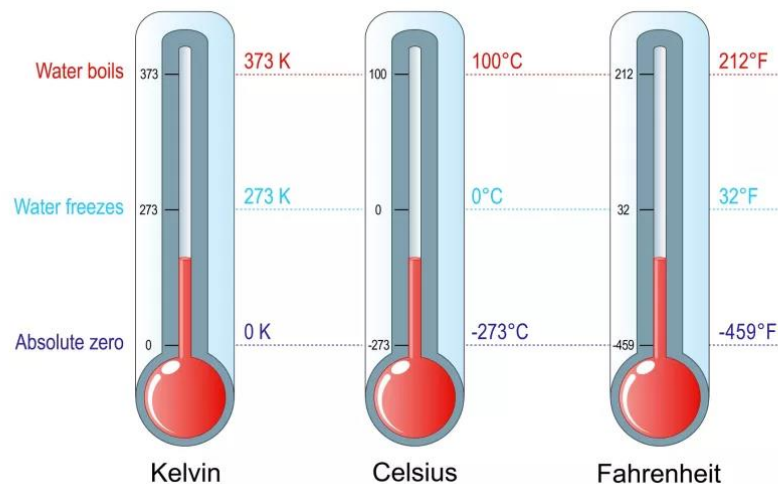
$$T > 0\text{K}$$
$$S > 0$$

$$T = 0\text{K}$$
$$S = 0$$

Entropy becomes zero at 0K

Термодинамикийн гуравдугаар хуулийн дагуу талстлаг бодисын температур абсолют тэгтэй (0 келвин) тэнцүү байхад энтропи тэг болно.

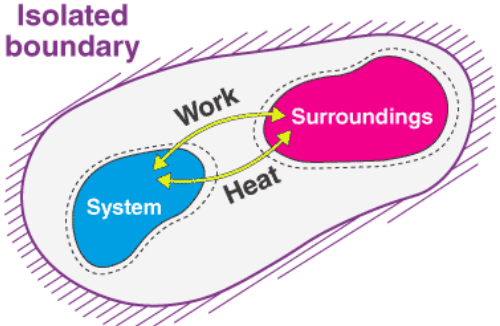
Абсолют тэг температурт хүрэх боломжгүй. Үүнд зөвхөн ойртож болно



# Систем

**BYJU'S**  
The Learning App

**Isolated boundary**



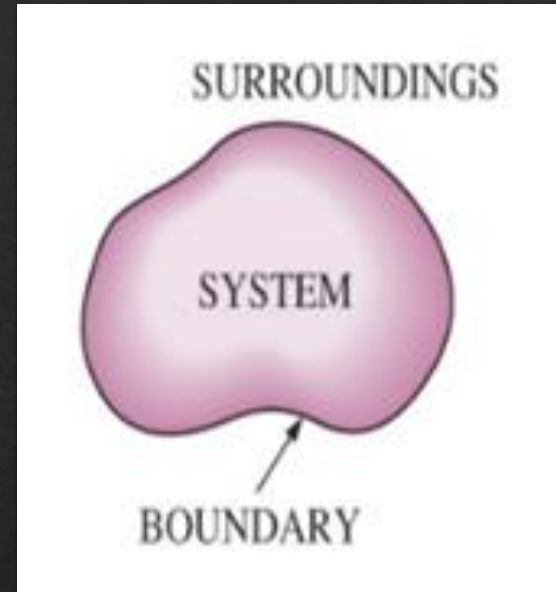
**System boundary**  
A boundary is a closed surface surrounding a system through which energy and mass may enter or leave the system.

**Surroundings**  
Everything that interacts with the system

**System**  
A system is a region containing energy and/or matter that is separated from its surroundings by arbitrarily imposed walls or boundaries

© Byjus.com

Энерги ба /эсвэл бодис агуулсан хүрээлэн буй орчноос хязгарлагдсан муж



Систем, хил зааг, хүрээлэн буй орчин

# Систем

**Систем: Бидний судлах гэсэн ертөнцийн нэг хэсэг.**

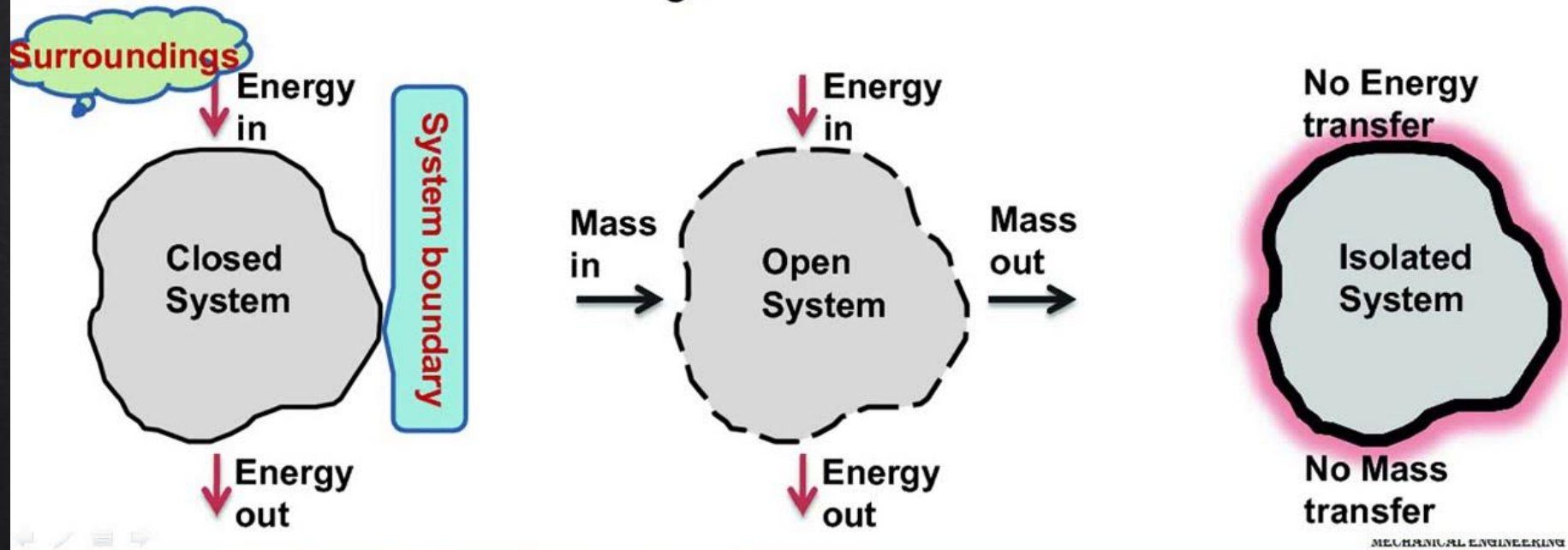
Системээс гадуур -**хүрээлэн буй орчин**: Системийн өөрчлөлт нь энергийн дамжуулалттай холбоотой байдаг.

Байгалийн систем нь хамгийн бага энергитэй төлөв рүү чиглэдэг – (тэнцвэрт байдал)

# Гол ойлголтууд

- **Системд:**
- **Фаз** системийн физикийн хувьд нэгэн төрлийн хэсэг бөгөөд механик замаар тусгарлах боломжтой: **эрдэс, магма (хайлмаг), хий, шингэн уусмал**
- **Компонент** системийг тодорхойлоход хамгийн бага хэмжээгээр авахад хангалттай бие даасан бодисууд юм.

# Types of Thermodynamic System



# Систем

- ◇ Химийн хувьд
- ◇ Физикийн хувьд
- ◇ Хүрээлэн буй орчинтой харьцах байдлаар
- ◇ Нэг компоненттэй, олон компоненттэй
- ◇ Гомоген (нэг фазтай), гетероген (олон фазтай)
- ◇ Хязгарлагдсан –дулаан, ажил, бодисоор солилцох боломжгүй
- ◇ Хаалттай -зөвхөн массаар солилцоо байхгүй, бусад нь байна
- ◇ Нээлттэй –бүх төрлийн солицоо байж болно

# Системийн байдал

**E** – системийн бүрэн энерги

**U**- дотоод энерги

**H**-энтальпи- урвалын бүтээгдэхүүний эмх замбараагүй (санамсаргүй) байдал илэрхийлсэн утга

**S**- энтропи – бодисын дотоод энергийн нөөцийг буюу дулааны агуулага тодорхойлох утга

**G**- Гиббсийн чөлөөт энерги

**F**- Гельмгольцийн чөлөөт энерги



# Параметрууд

- Параметр - системийн байдлыг тодорхойлж болох хэмжигдэхүүн
- Системийн үндсэн параметрууд:
- **температур (T), энтропи (S), даралт (p), эзэлхүүн (V), бүрэлдэхүүн хэсгүүдийн масс ( $m^a \dots m^k$ ) ба тэдгээрийн химийн потенциалууд ( $\mu^a \dots \mu^k$ ).**

# Параметрууд

**Экстенсив параметрууд** нь нэмэх шинж чанартай:  
**эзэлхүүн, энтропи ба компонентын масс.**

Системийн эзэлхүүн нь фазуудын эзэлхүүний нийлбэртэй тэнцүү, систем дэх масс нь системийн хэсгүүдийн массын нийлбэр юм.

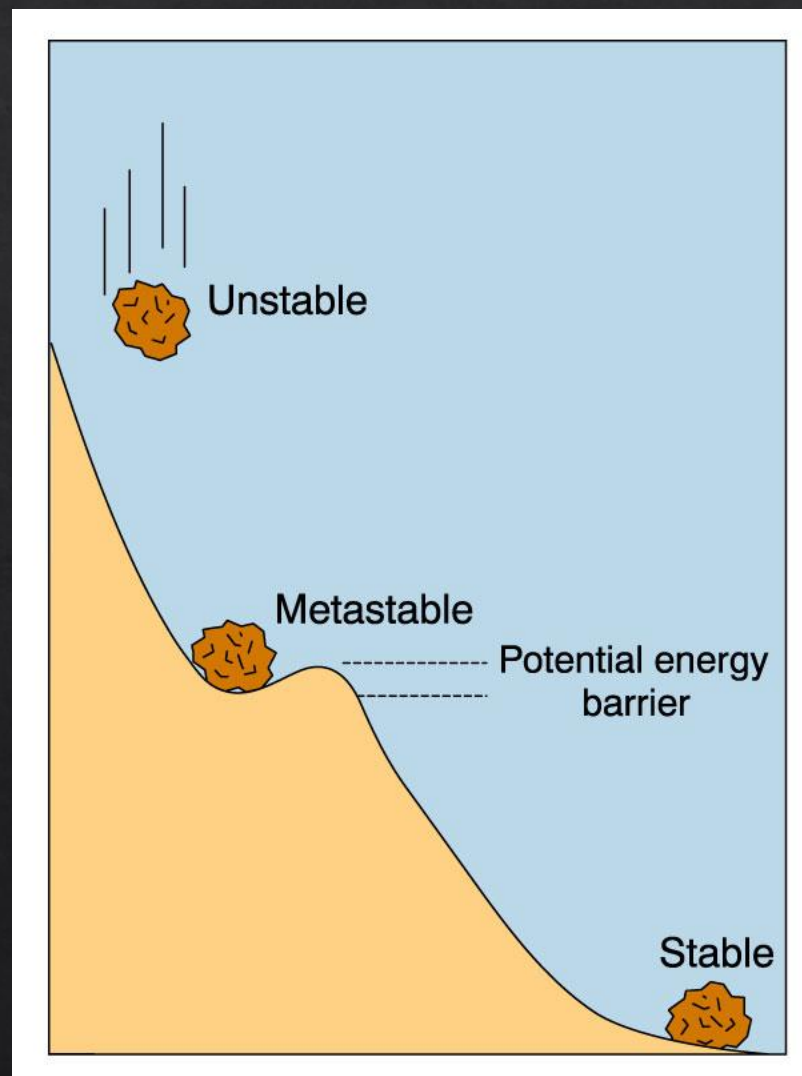
**Интенсив параметрууд: температур, даралт, ба компонентийн химийн потенциалууд**

# Энерги-эрчим хүч

**Unstable:** ТОГТВОРГҮЙ

**Stable:** - ТОГТВОРТОЙ-  
хамгийн бага энергитэй

**Metastable:**— хагас  
ТОГТВОРТОЙ



# Гиббсийн фазын дүрэм

$$F = C - \Phi + 2 \quad F = C - P + 2$$

$F$  – химийн тэнцвэрт байдлыг хадгалах эрчимтэй хувьсагчдын ( $p$ ,  $t$ ,  $x$ ) чөлөөт зэргийн тоо.

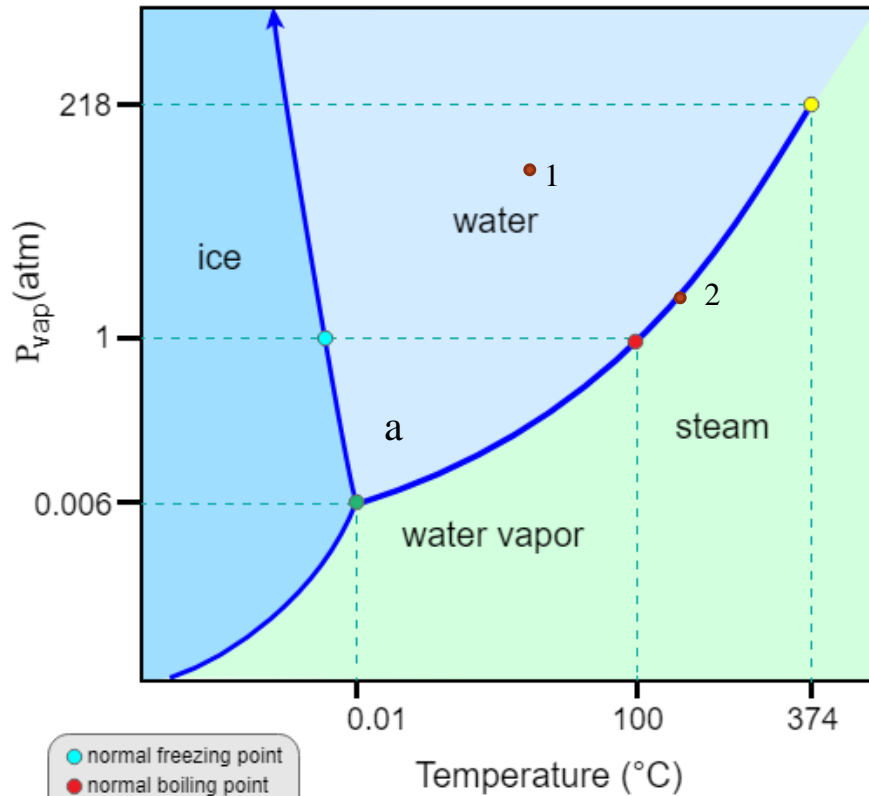
$C$  – компонентийн тоо (химийн бодис)

$\Phi$  - фазын тоо (эрдэс, дэгдэмхий бодис)

Тэнцвэрт термодинамик системийн чөлөөт зэргийн тоо компонентийн тоо хасах фазын тоо нэмэх тэнцвэрт нөлөөлөх факторуудын тоотой тэнцүү.

# Нэг компоненттэй систем – H<sub>2</sub>O

Phase Diagram for Water



© mccoord 2013

3 фаз хамтран орших цэг-а  
Гиббсийн фазын дүрэм

$$P+F=C+2$$

$$F=C-P+2 \quad F=C+2-P$$

Цэг а  $F=1(\text{H}_2\text{O})+2-3$  (мөс, ус, уур)=0

Чөлөөт зэргийн тоо 0 иймээс T, P өөрчлөгдөх боломжгүй.

Цэг 1

$$F=1+2-1$$
 (ус) =2

Температур ба даралт өөрчлөгдөх боломжтой

Цэг 2

$$F=1+2-2$$
 (ус, уур) =1

Температур, даралт аль нэг нь өөрчлөгдөх боломжтой





# Гиббсийн чөлөөт энерги

Гиббсийн чөлөөт энерги  $\Delta G$ . Бүх фазууд чөлөөт энерги агуулдаг ба  $P$  ба  $T$  хамааран өөрчлөгддөг.

Жишээлбэл, бага  $T$  хатуу минерал шингэнээс бага  $\Delta G$ . Иймээс тогтвортой.

Өндөр  $T$  хайлсан минерал хатуугаас бага  $\Delta G$  иймээс хайлсан минерал тогтвортой.



# Гиббсийн чөлөөт энерги

Гиббсийн чөлөөт энергийг ихэвчлэн жоуль (J) эсвэл калори (кал) нэгжээр илэрхийлдэг.

Энтропийг нэг Келвин (J/K)-д ноогдох жоуль буюу калори (кал/K)-аар илэрхийлдэг.

Эзлэхүүнийг ихэвчлэн куб. см ( $\text{см}^3$ ) -ээр илэрхийлдэг.

Гиббсийн чөлөөт энерги, энтропи ба эзэлхүүний утга нь молийн хэмжигдэхүүн тул тэдгээрийн утга нь авч үзэж буй материалын хэмжээнээс хамаарна.

# Тэнцвэрт байдал

Термодинамикийн үндсэн зарчим бол химийн системүүд энергийг багасгаж, **тогтвортой тэнцвэрт байдалд шилжихэд тэмүүлдэг.**

Хэрэв химийн систем тэнцвэрт байдалд байгаа бол даралт, температур эсвэл системийн найрлага өөрчлөгдөхөд дахин тэнцвэрт байдалд хүрэх хүртэл химийн урвал явагдана гэсэн үг юм.

# Термодинамикийн гол зарчим

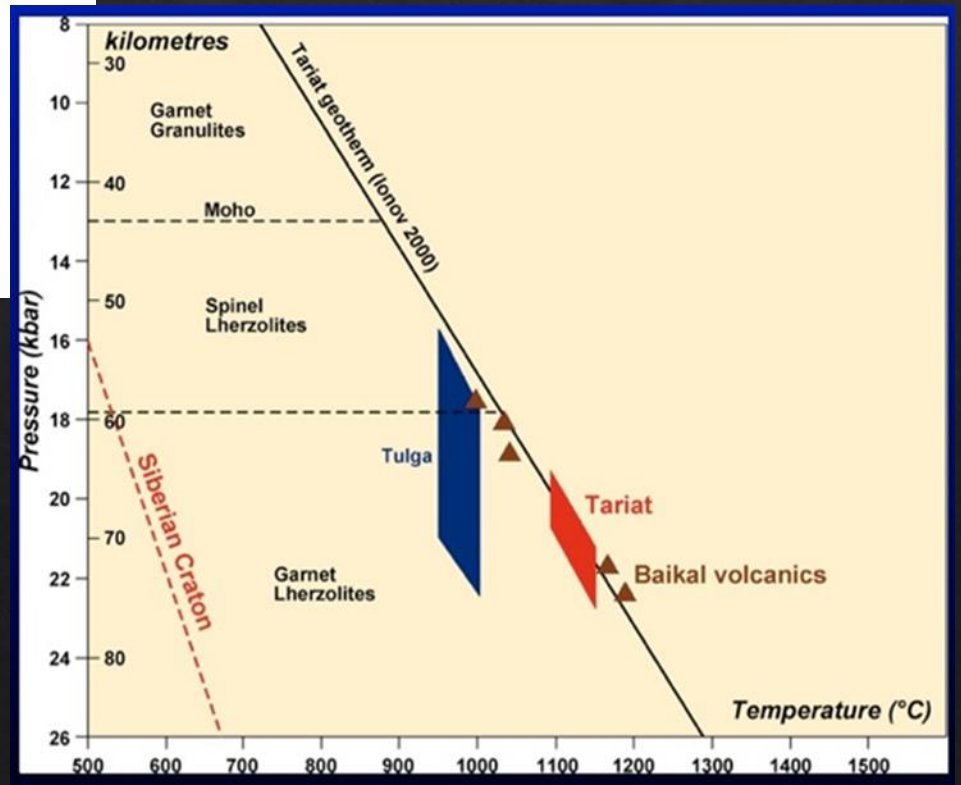
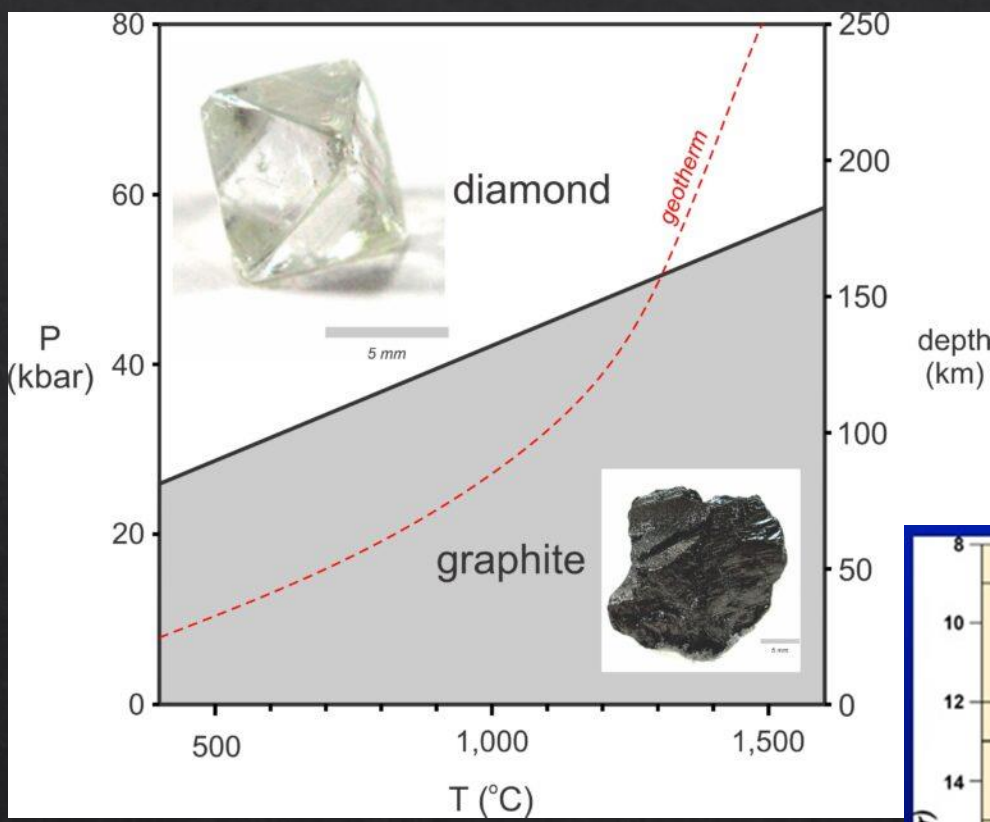
Термодинамикийн хуулиуд нь фазын тэнцвэрт байдлыг зохицуулдаг.

- Эрдэс судлаачид эрдсийн тогтвортой байдлыг урьдчилан таамаглахад термодинамикийг ашигладаг.

Жишээлбэл, термодинамик нь (1 атмосферийн даралтад) мөс  $0^{\circ}$  хайлж, форстерит  $1890^{\circ}\text{C}$  хайлах болно гэж заадаг.

- Мөн эрдсийн ассоциацийг тайлбарладаг  
Жишээлбэл, алмаз агуулсан чулуулаг дэлхийн гүнд маш өндөр даралтанд үүссэн гэж термодинамик тогтоодог.

# Ксенолит



# Термодинамикийн хоёрдугаар зарчим

Термодинамикийн хоёрдугаар зарчим **энтропитэй** (S) холбоотой.

Бүх хий шингэнээс өндөр энтропитэй. Өндөр энтропитэй фазууд өндөр температурт тогтвортой.

Өндөр температур эмх замбраагүй байдал үүсгэдэг. Учир нь кинетик энерги өндөр температурт өндөр байдаг.

**Энэ зарчим нь яагаад хатуу бодис халахад хайлж, илүү халахад хайлмаг нь ууршиж (буцалж) хий болж хувирдгийг тайлбарладаг.**

# Гиббсийн чөлөөт энерги

Энгийн эрдэс эсвэл хайлмаг шинжилэхэд хялбар. Чулуулаг бол илүү төвөгтэй.

Тухайлбал, габбро хэд хэдэн эрдсээс тогтсон

Гиббсийн чөлөөт энерги хэд хэдэн эрдсийн энергийн нийлбэр: 55 мол. % плагиоклаз, 41 мол. % пироксен, 4 мол. % оливин

Тэгвэл Гиббсийн энерги:

$$\Delta G_{\text{rock}} = 0.55 \times \Delta G_{\text{plagioclase}} + 0.41 \times \Delta G_{\text{pyroxene}} + 0.04 \times \Delta G_{\text{olivine}}$$

# Термодинамикийн гуравдахь зарчим

Термодинамикийн гуравдахь үндсэн зарчим бол илүү нягтралтай фазууд илүү их даралтанд илүү тогтвортой байдаг.

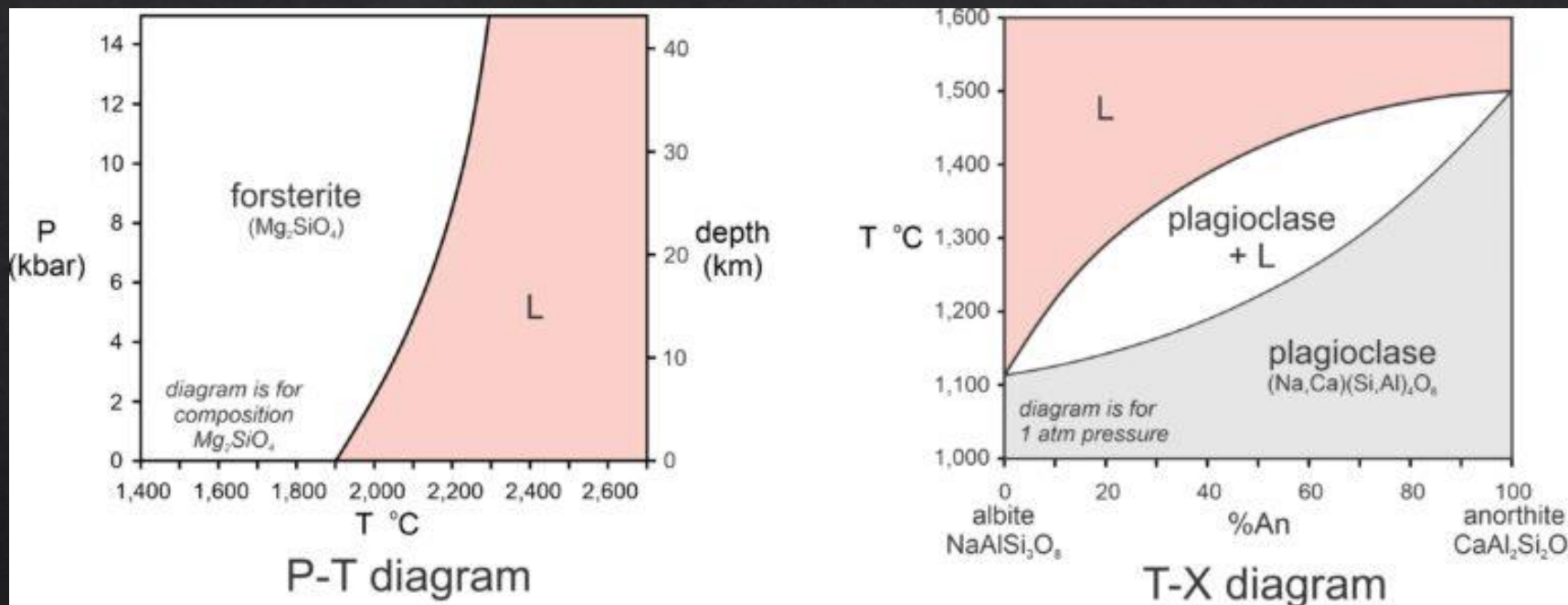
Өөрөөр хэлбэл, илүү их эзэлхүүнтэй ( $V$ ) фазууд нь бага даралтанд хамгийн тогтвортой байдаг.

Энэ нь бас утга учиртай - өндөр даралт нь нягт, бага зай эзэлдэг материалыг илүүд үздэг.

Жишээлбэл, алмаз (графиттэй ижил найрлагатай) өндөр даралтанд үүсдэг, бага даралтанд графит үүсдэг. Алмазын нягтрал  $3.51 \text{ g/cm}^3$  графитын  $2.26 \text{ g/cm}^3$

# Цөөн компонент бүхий загвар систем

## Фазын диаграм

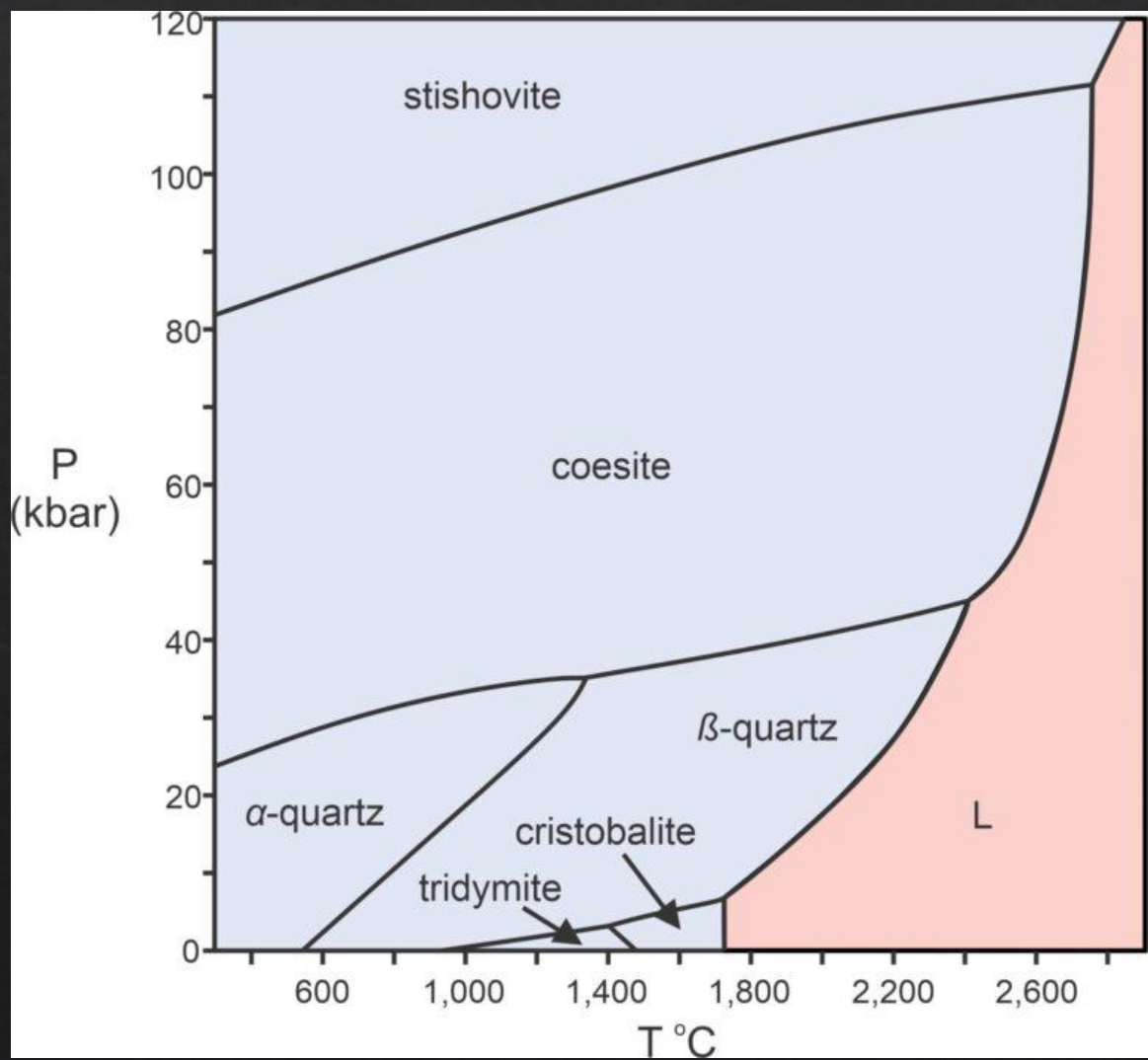


Даралт-температур P-T

Температур-концентраци T-X



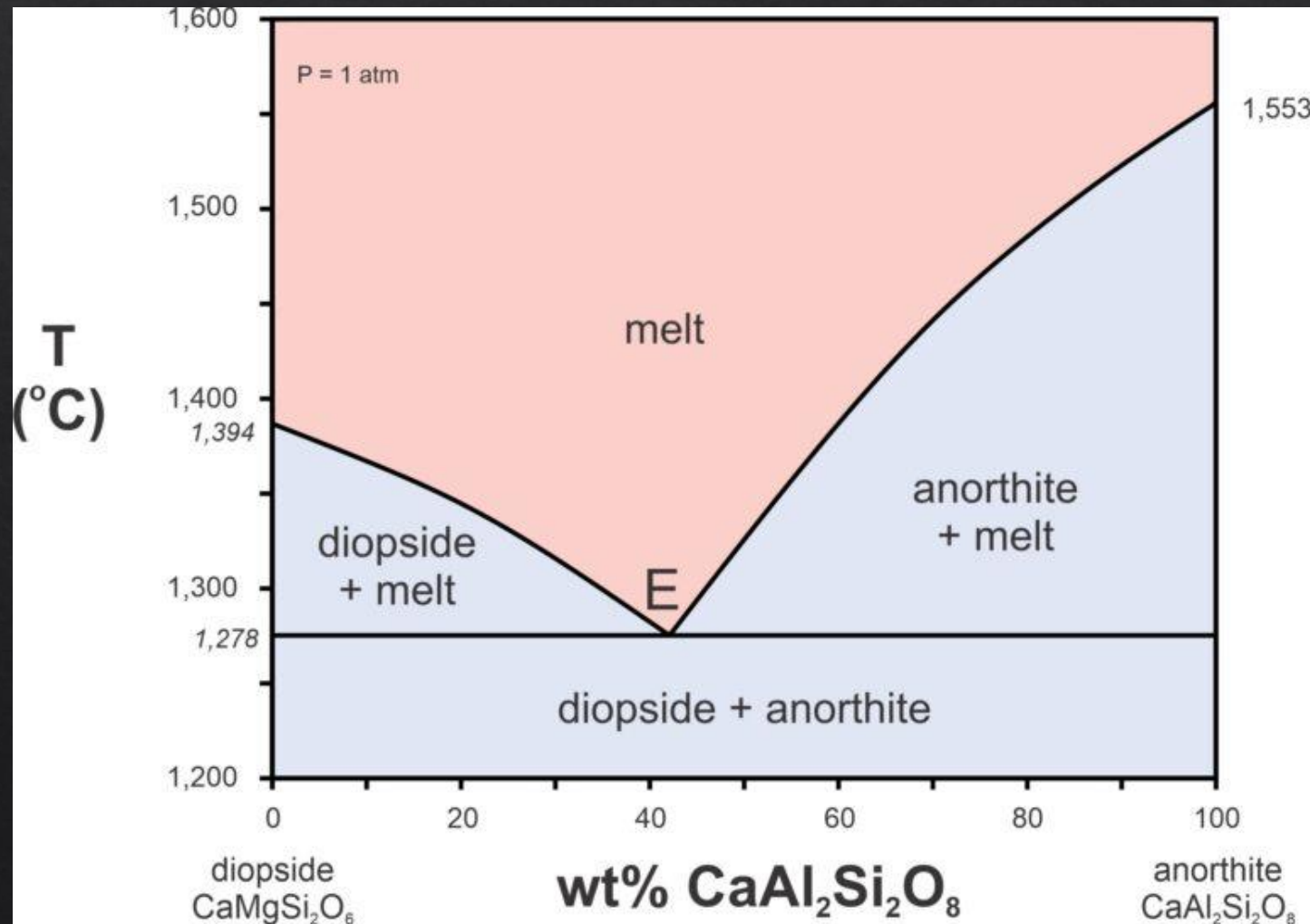
# SiO<sub>2</sub> P-T диаграм



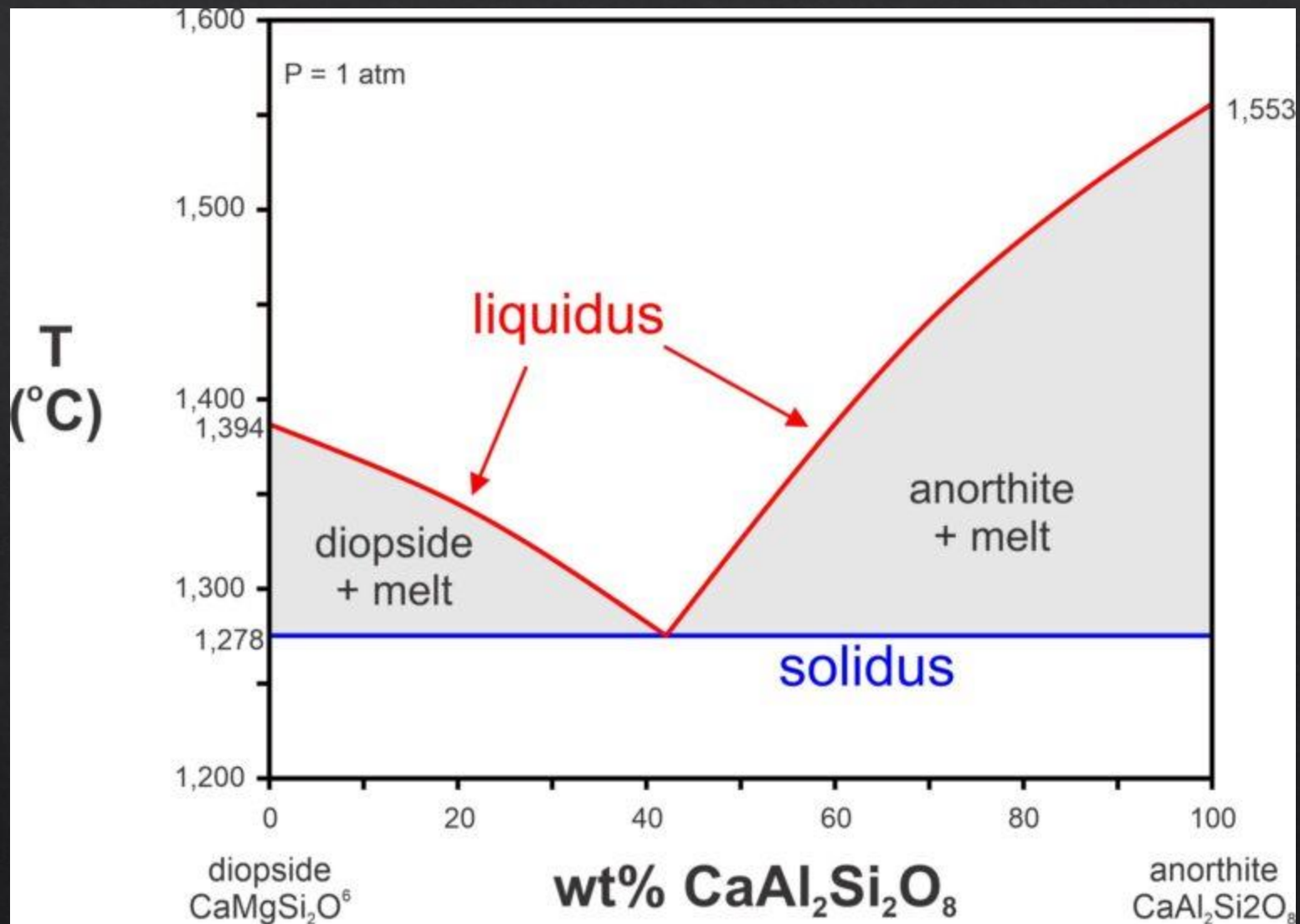
α-кварц - β-кварц  
573 °C  
Тридимит 1470°C  
Кристаллит 1713°C

Коэсит, стишовит  
маш өндөр  
даралтанд үүсдэг.  
Аризона галт уулын  
тогоонд олдсон.

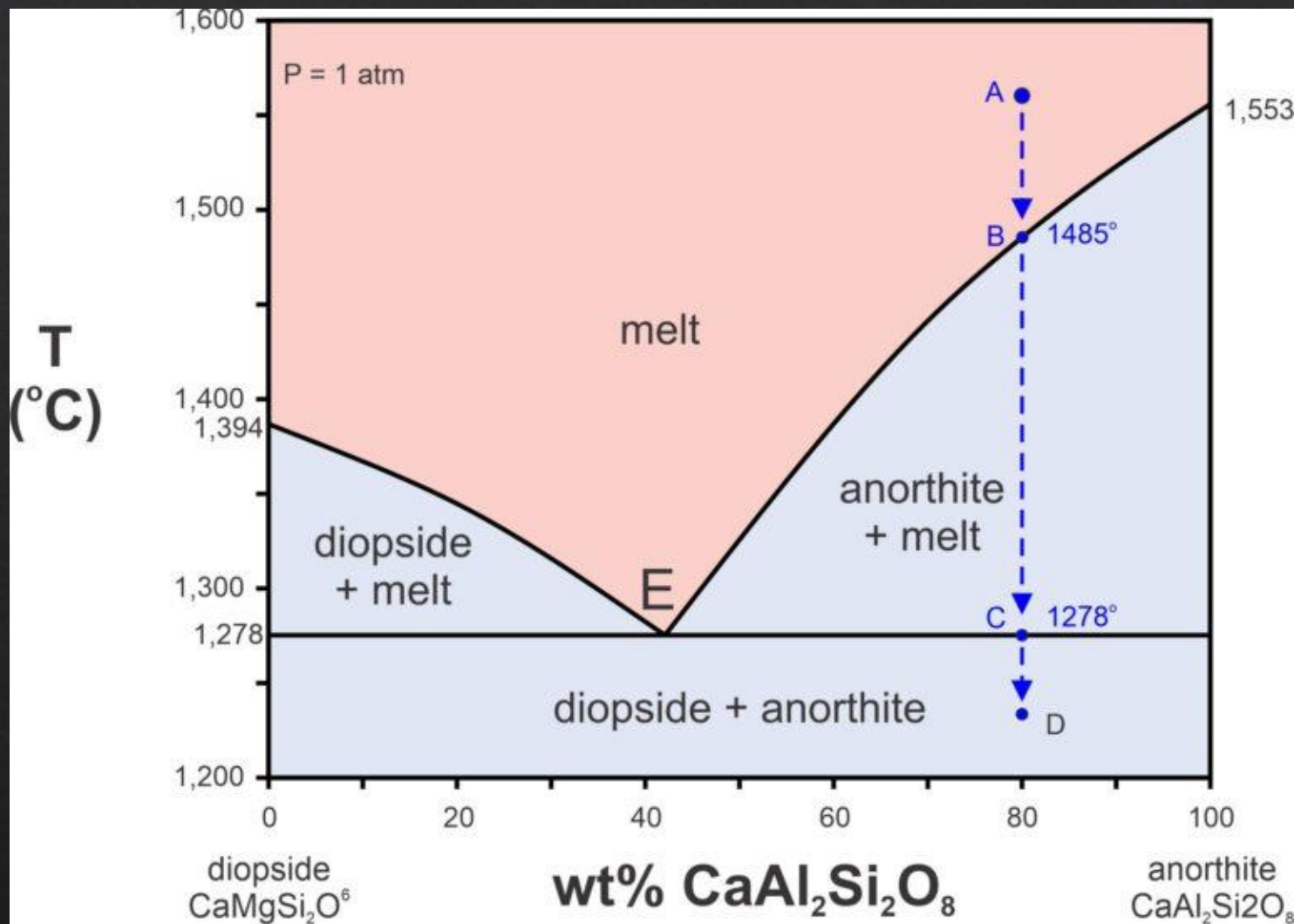
# Di-An T-X диаграм



Ан хайлах  $T$ -  
 $1553^\circ\text{C}$   
Di хайлах  $T$   
 $1394^\circ\text{C}$   
E- эвтектик  $T$   
 $1278^\circ\text{C}$ ,  
найрлага  
42% An



**Ликвидус** - хайлмагийн найрлага харуулсан шугам эсвэл гадаргүү  
**Солидус** –хатуу фазуудын найрлага харуулсан шугам эсвэл гадаргүү



$$F = C + 2 - P$$

$$F = C + 1 - P$$

Хайлмаг:

80% An

20% Di

диопсид

$T = 1600^{\circ}$

А цэгт:  $F = 2 (\text{Di} + \text{An}) + 1 - 1 (\text{L}) = 2$ ; В цэгт:  $F = 2 (\text{Di} + \text{An}) + 1 - 2 (\text{L} + \text{An}) = 1$   
 С (Е) цэгт:  $F = 2 (\text{Di} + \text{An}) + 1 - 3 (\text{L} + \text{An} + \text{Di}) = 0$ ; D цэгт  $F = 2 (\text{Di} + \text{An}) + 1 - 2 (\text{Di} + \text{An}) = 1$

Е-эвтектик цэг- хамгийн бага  $T$  хамтран хайлах эсвэл талсжих цэг.

Эвтектик температур – хамтран хайлах эсвэл талсжих хамгийн бага температур

# Эвтектик талсжилт

Гранит

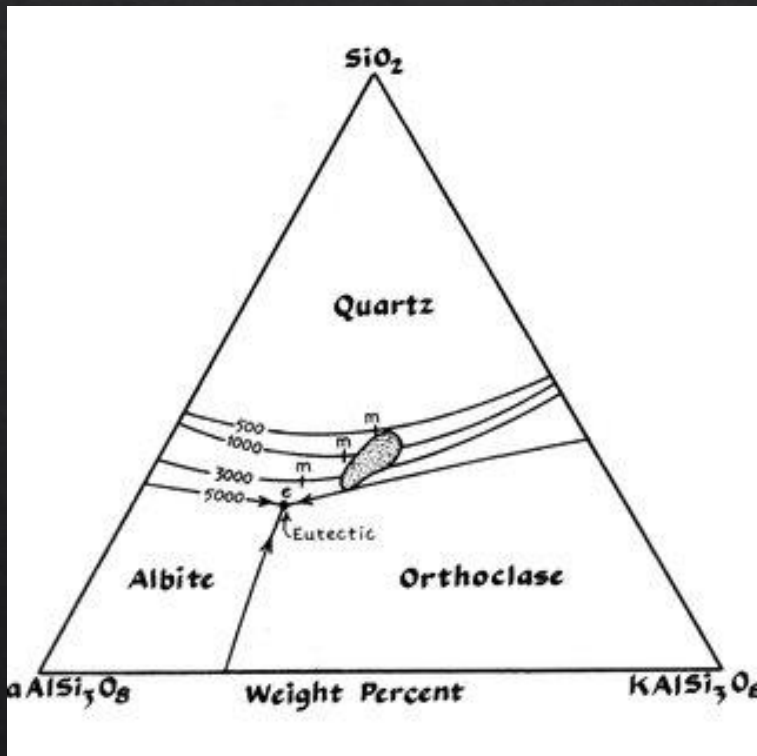
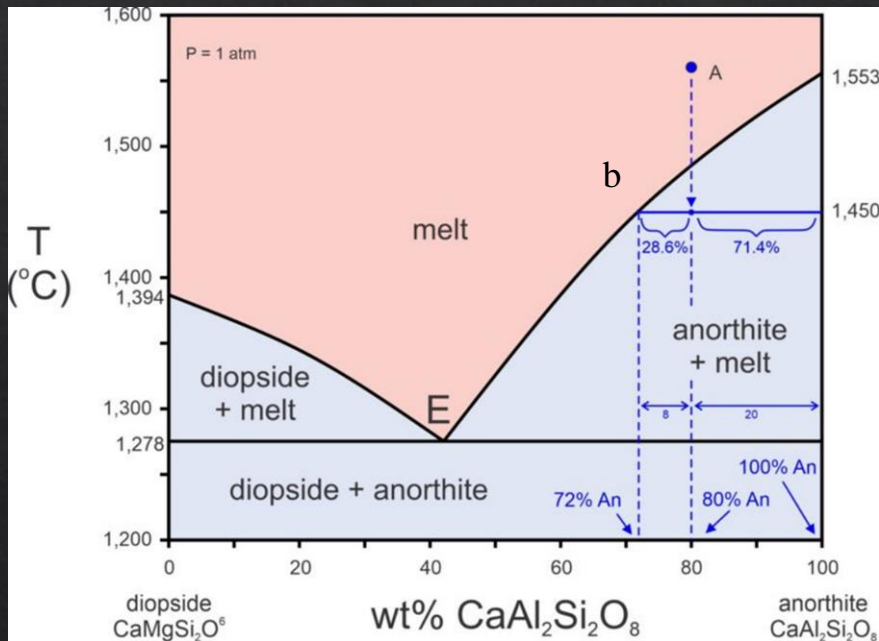


График структур –магнаг үсэгт пегматит



Эвтектик T - 900-600°

## Хоёр компоненттэй системд талсжилт



А цэгт  $F=2 (Di+An) +1-1 (L)= 2$   
 Чөлөөт зэргийн тоо 2 иймээс Т ба концентраци өөрчилж болно. Талсжиж байгаа учир Т өөрчилно, гэвч найрлага бас өөрчилж болно.

б цэгт  $F=2 (Di+An)+1-2 (An+L)=1$   
 Зөвхөн нэг параметр өөрчилж болно.

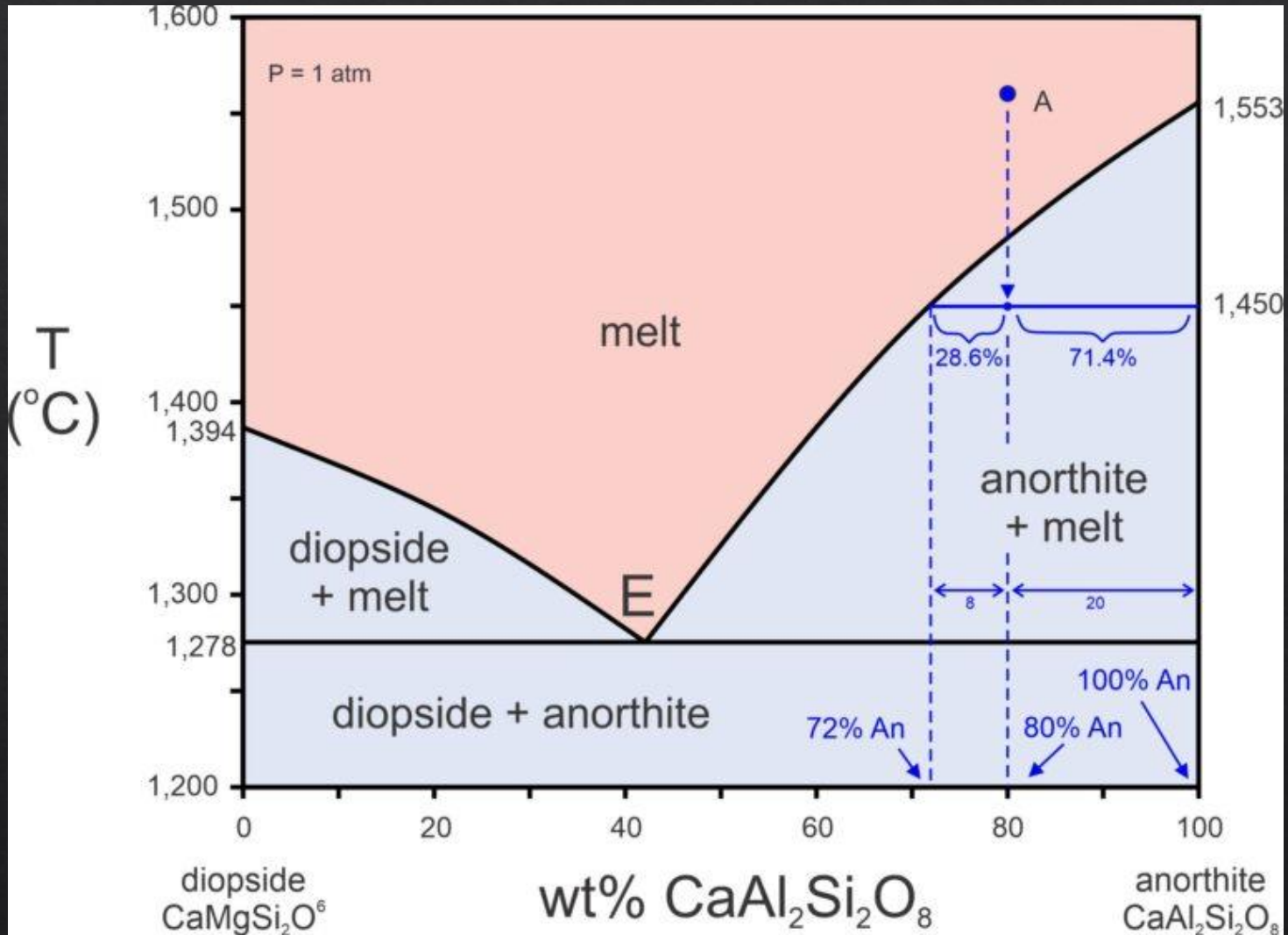
б цэгээс шурам татаж хэдэн хувь анортит ба диопсид, ямар найрлагатай тодорхойлж болно.

Е цэгт (эвтектик цэг) чөлөөт зэргийн тоо 0 учир хайлмаг дуустал ямар ч параметр өөрчилж болохгүй  
 $F=2+1-3 (An+Di+L)=0$

Е цэгт кристаллжилт дуусна  
 Харин хатуу байдалд чөлөөт зэргийн тоо 1 учир хатуу байдалд постмагмын өөрчилт байж болно.

Гиббсийн томъёо  $F=C+2-P$   
 даралтг тогтвортой системд  
 $F= C+1-P$   
 Найрлага 80% An ,1600°C  
 температурт байгаа хайлмагийн  
 талсжилт авч үзэе

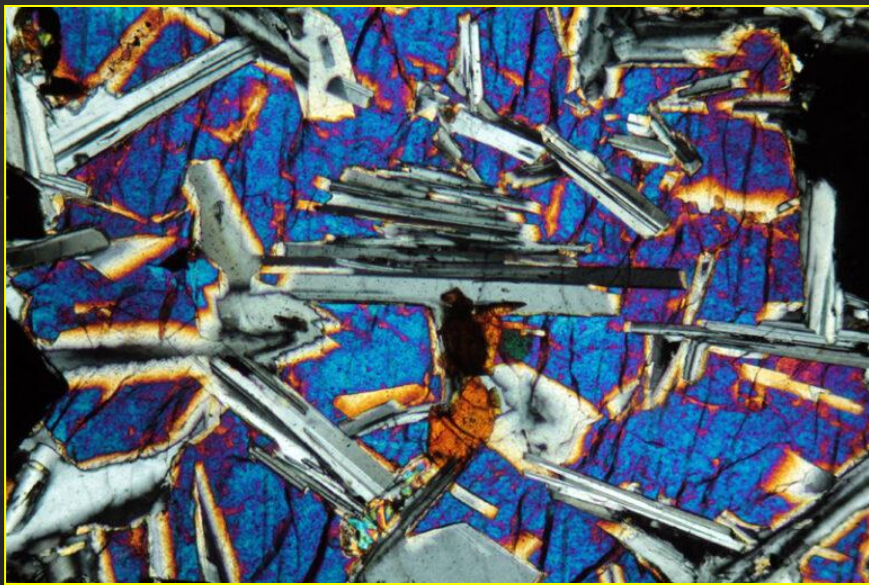
# Тоо хэмжээ ба найрлага тодорхойлох



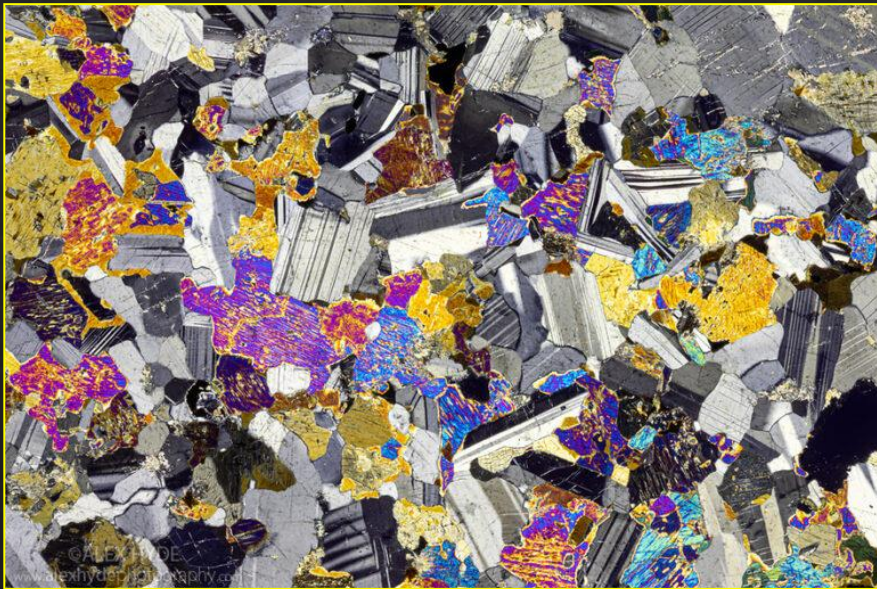
Фазуудын тоо хэмжээ ба найрлага тодорхойлох:

An  $8:28 \times 100\% = 28.6\%$ , найрлага  $72\% \text{ An}$ ;

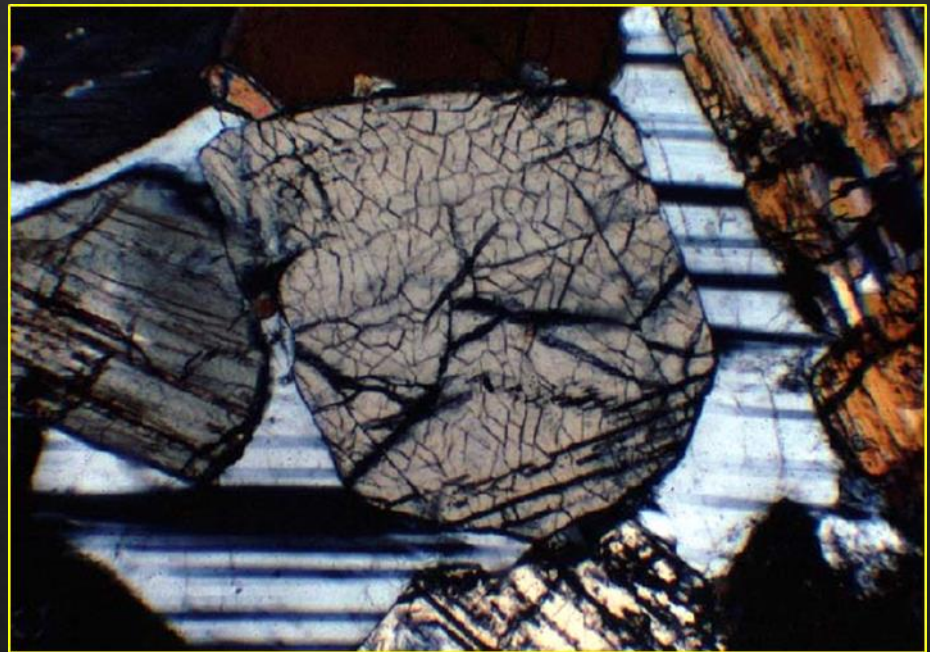
Di  $20:28 \times 100\% = 71.4\%$ , найрлага  $100\% \text{ An}$



Оффит структур:  
плагиоклаз  
пироксены өмнө  
талсжсан



Габбро структур –  
идиоморфизмын зэрэг *ижил*



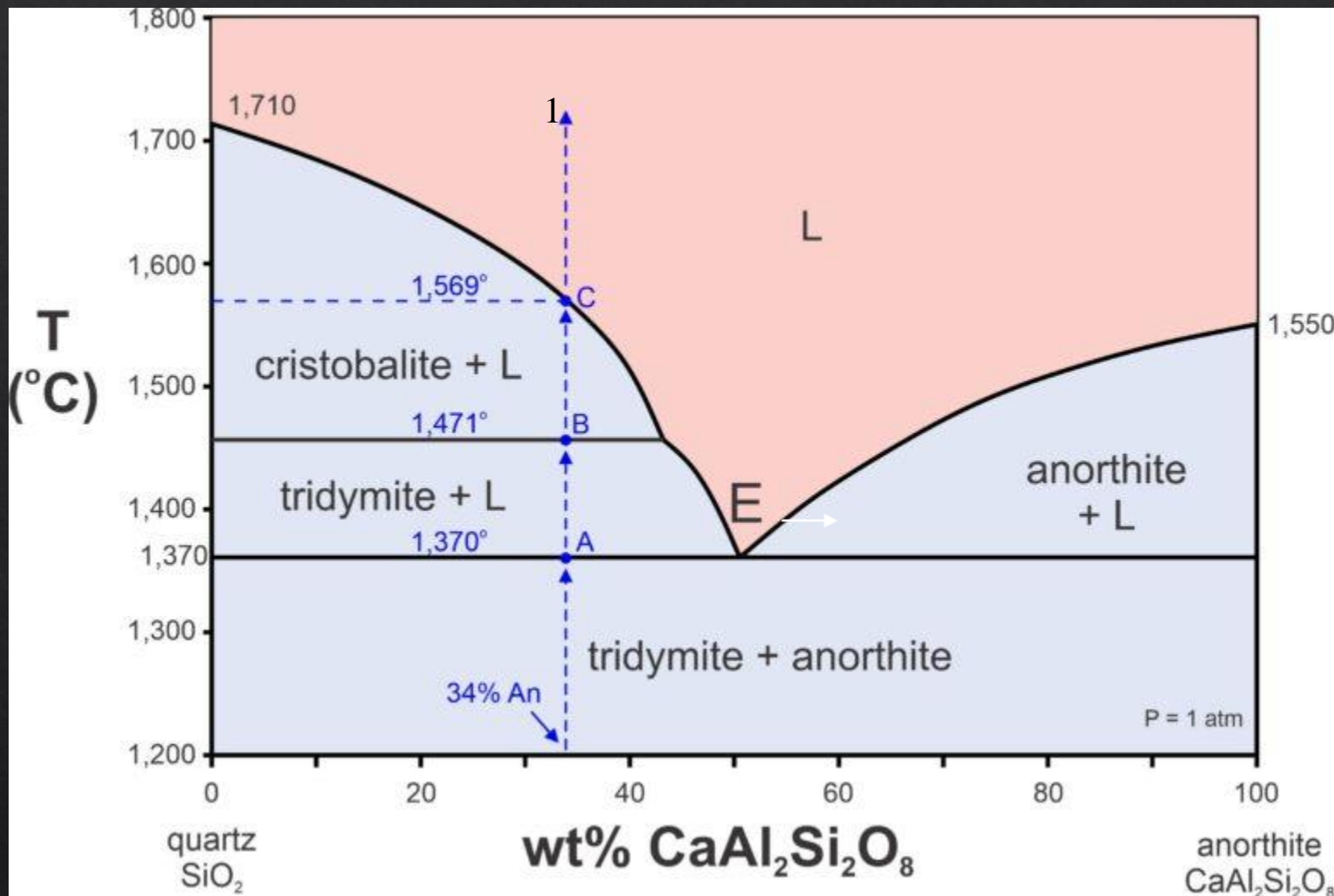
Пироксен түрүүлж талсжсан



# Кварц-анортит систем

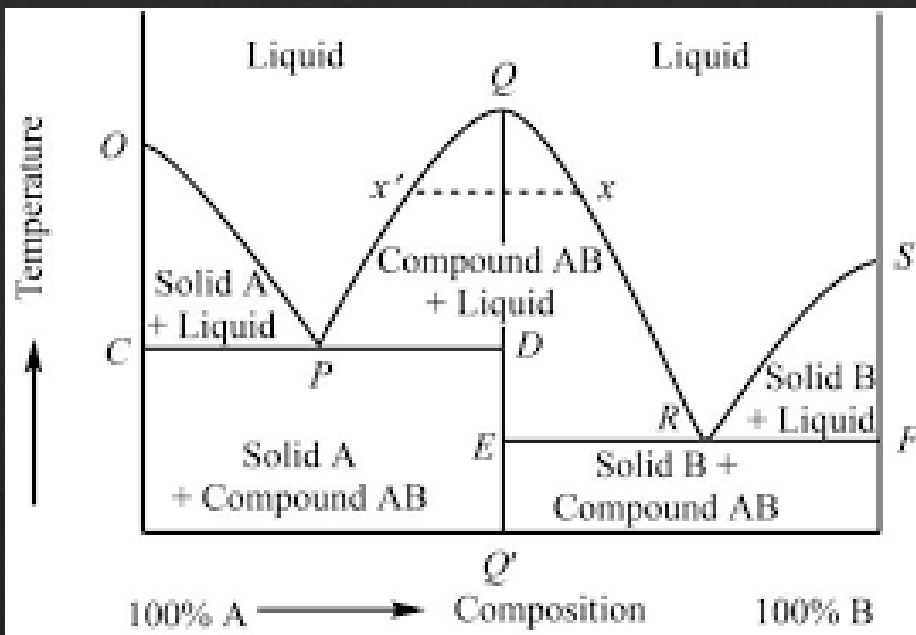
Хайлмаг  
34% An  
1730°C

$$F=C+1-P$$

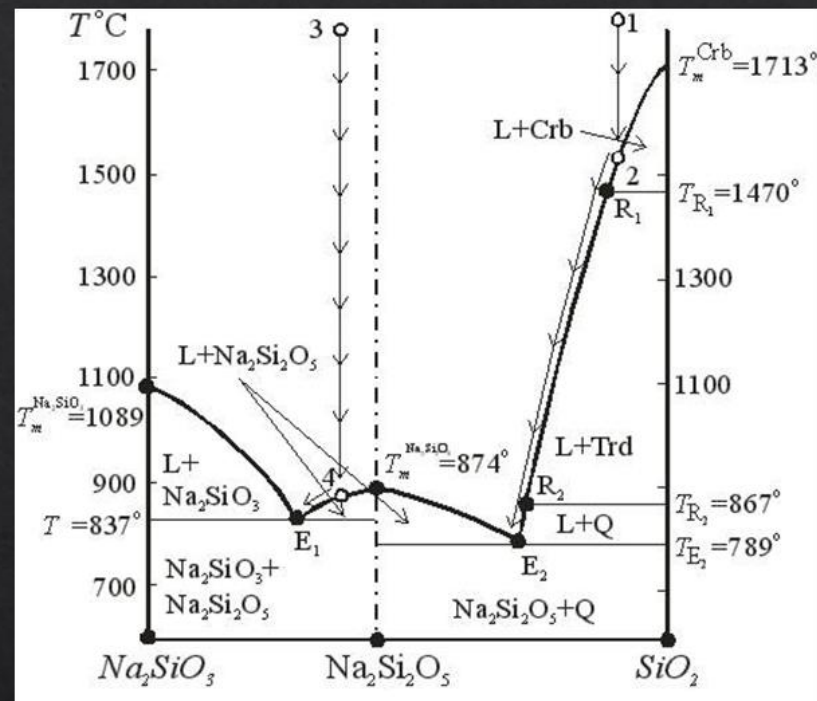


1-C (L)  $\rightarrow$  C-B (Crb + L)  $\rightarrow$  B (Crb+L+Tr)  $\rightarrow$  B-A (Tr+L)  $\rightarrow$  A(E) (Tr+An+L)

# Конгруэнт хайлалттай систем

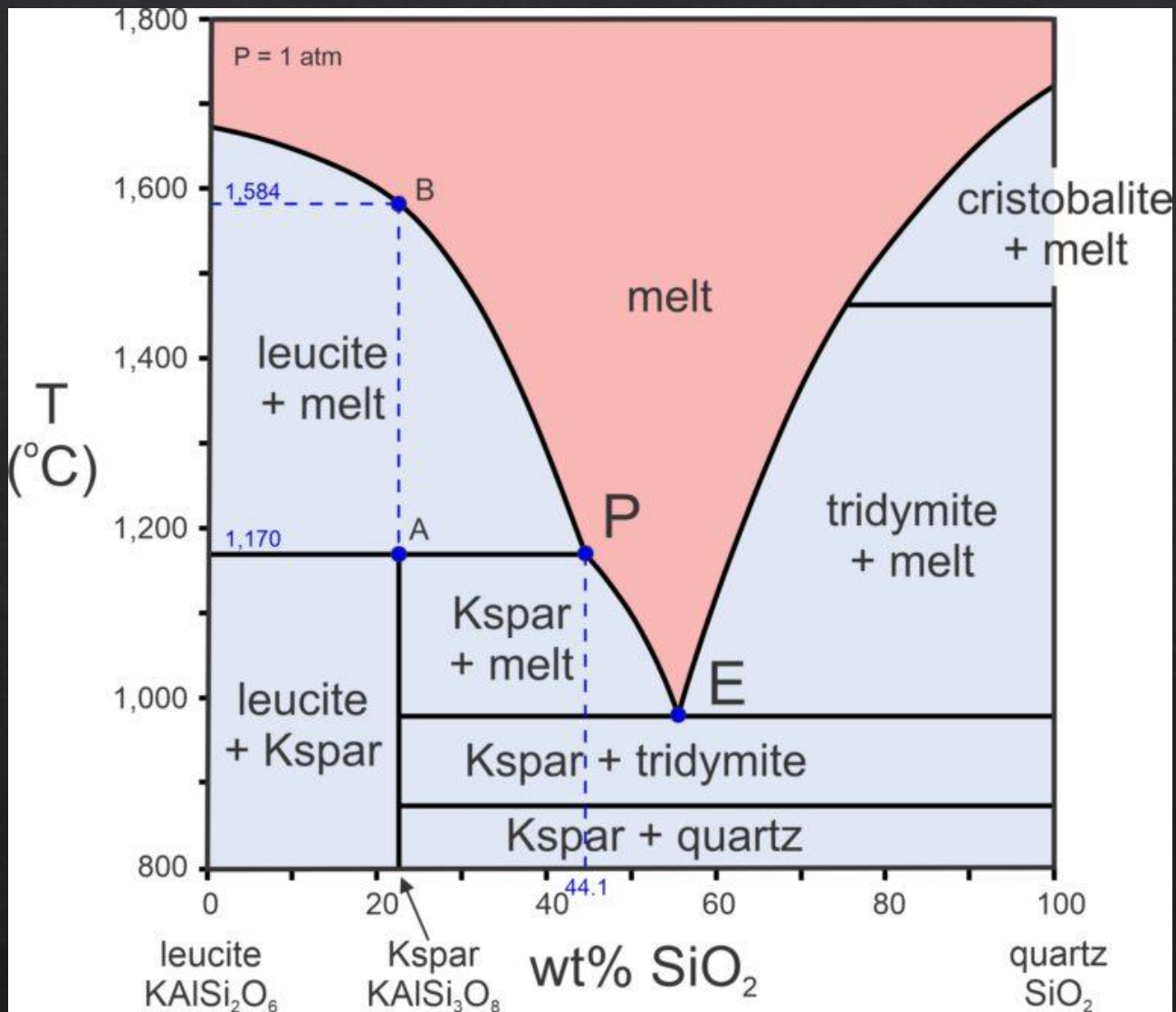


Конгруэнт хайлалт – хатуу фаз ба түүний хайлмаг ижил найрлагатай

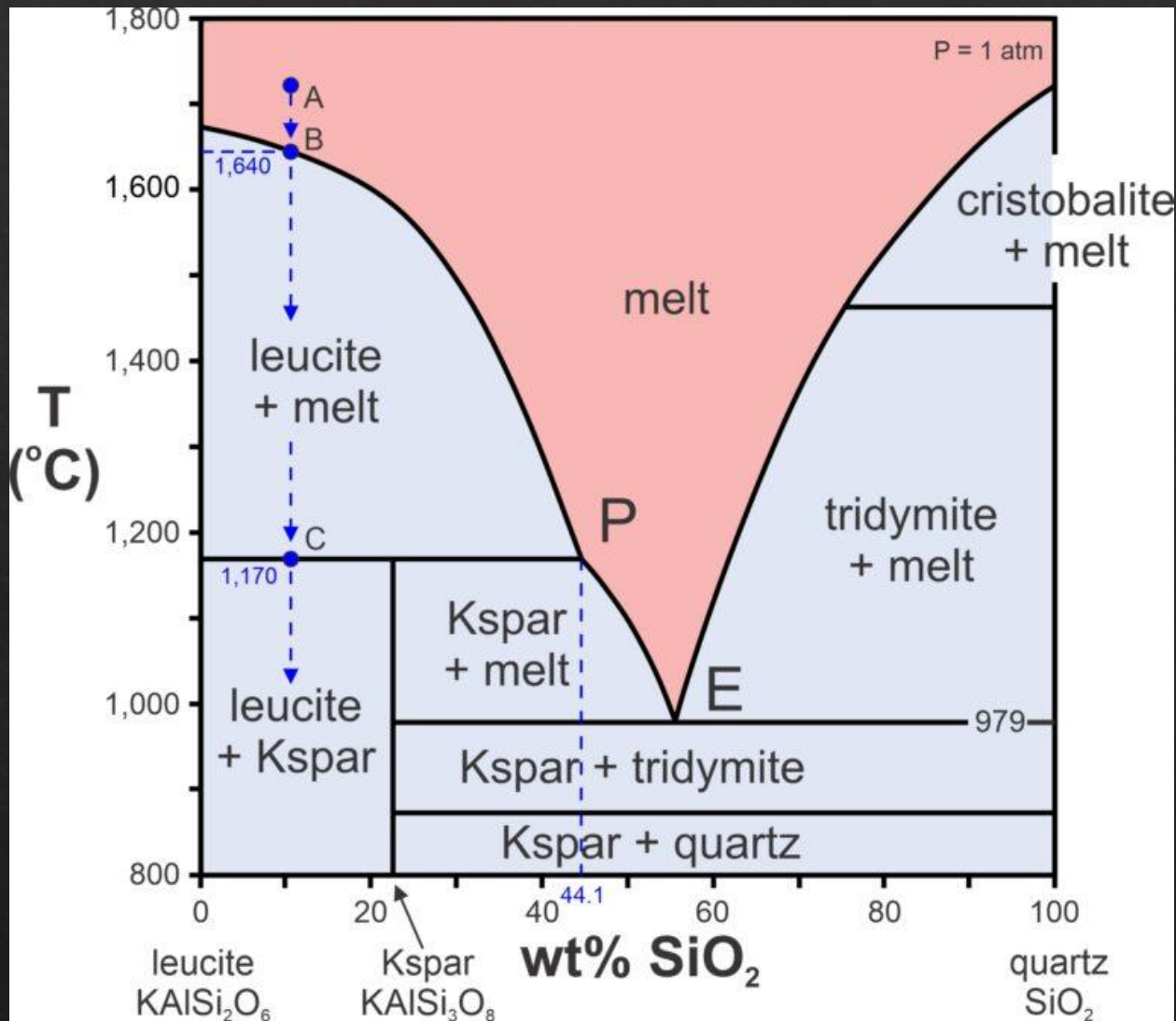


A-B хоёр компоненттэй системд завсрын бүтээгдэхүүн AB үүсдэг, иймээс эцэсийн бүтээгдэхүүн AQ хооронд (A+AB нэгдэл) эвэл BQ хооронд (B+AB нэгдэл)

# Инконгруэнт хайлалттай систем



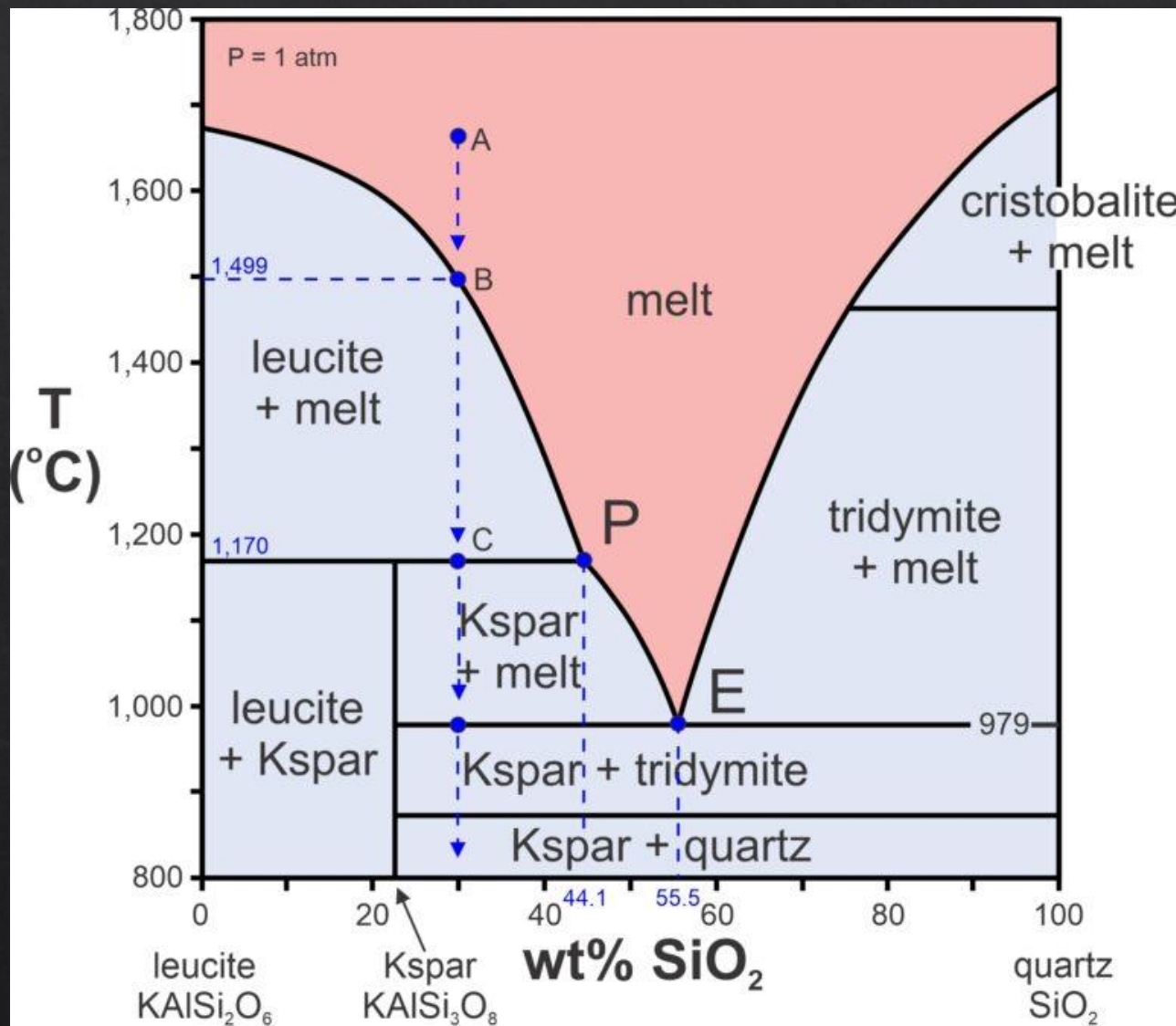
**Инконгруэнт хайлалт** – хатуу фаз нь хайлмаг ба өөр найрлагатай хатуу фаз болж хувирдаг.



P (C) цэгт  
 $F=2 (Lc+Qz)+1-3$   
 $(Lc+Kfs+L)=0$

90% лейцит, 10% кварц: A-B (L) - B-C (Lc+L) – C (P) (Lc+L → KFs)

P-перитектик урвал- хатуу ба шингэн фазууд урвалдаж шинэ хатуу фазыг үүсгэдэг, перитектик цэг - өмнө үүссэн хатуу фаз хайлмагтай урвалдаж шинэ хатуу фаз үүсгэдэг диаграм дээр цэг



А цэгт

$$F=2(Lc+Qz)+1-1 (L)=2$$

В цэгт

$$F=2 (Lc+Qz)+1-2 (Lc+L)= 1$$

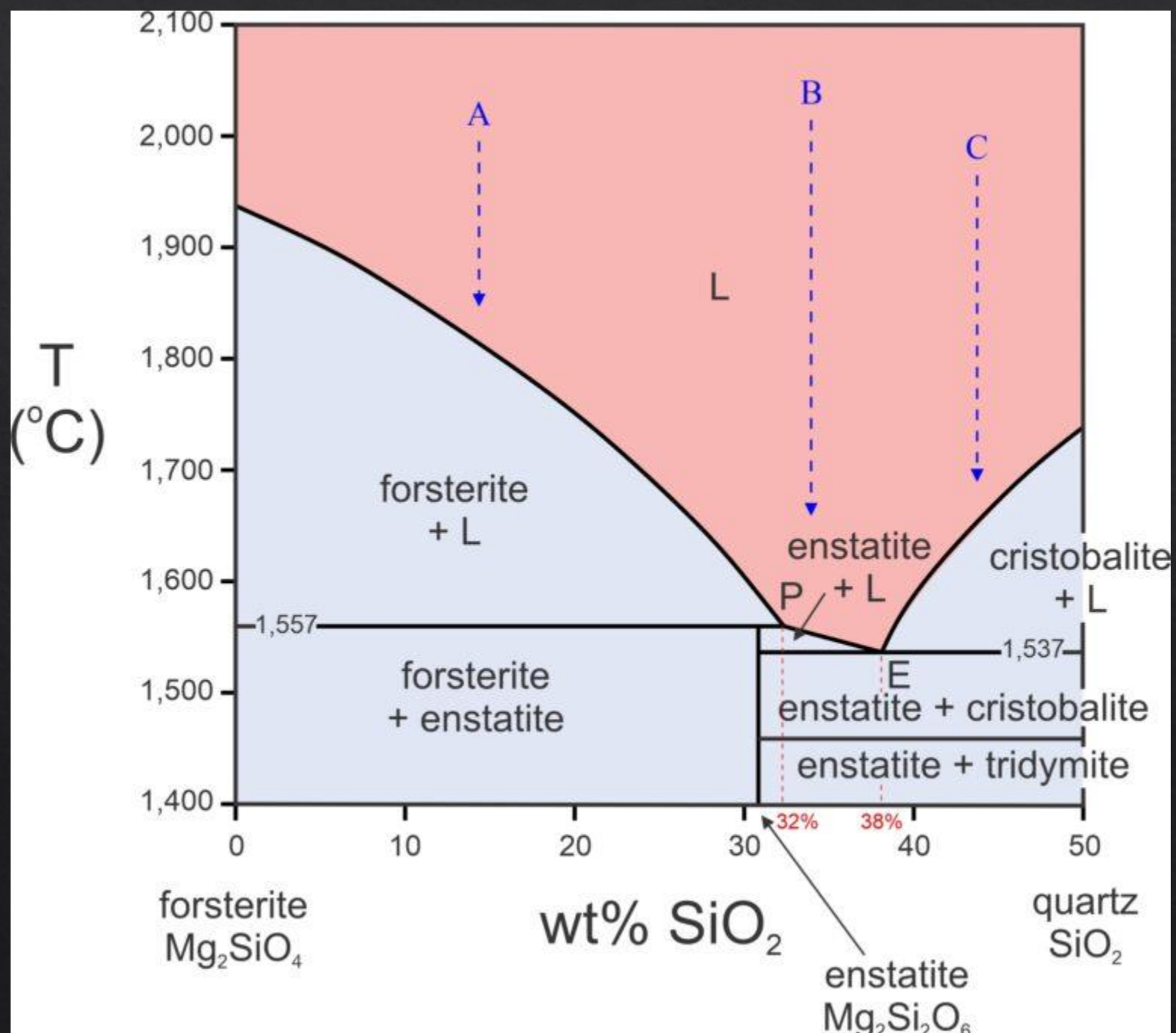
С (P) цэгт  $F=2+1-3=0$

Лейцит урвалдаж дуусахад  
 $F = 2+1-2 (Kfs + L)=1$

Е цэгт  $F=2+1-3=0$

70% лейцит 30% кварц бүхий хайлмаг

A-B (L) → B-C (Lc+L) → C(P) (Lc+L- Ksp) → P-E (Kfs+L) → E (Kfs+Qz+L)



А цэгт  
хайлмаг  
талчиж  
Fo+En

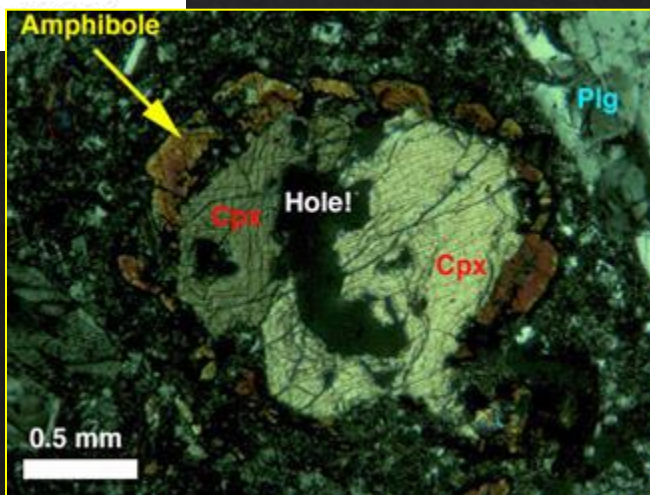
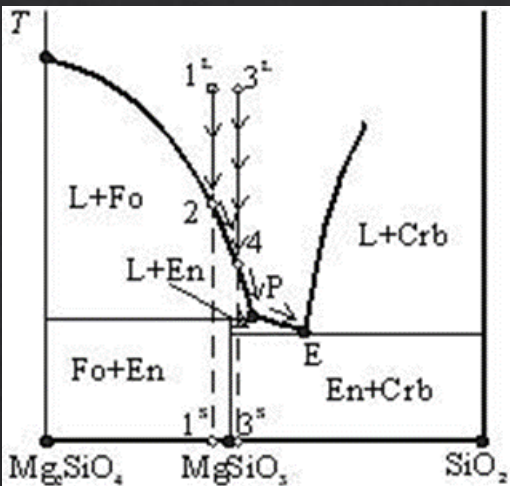
В цэгт  
En+Tr

С цэгт  
Tr +En

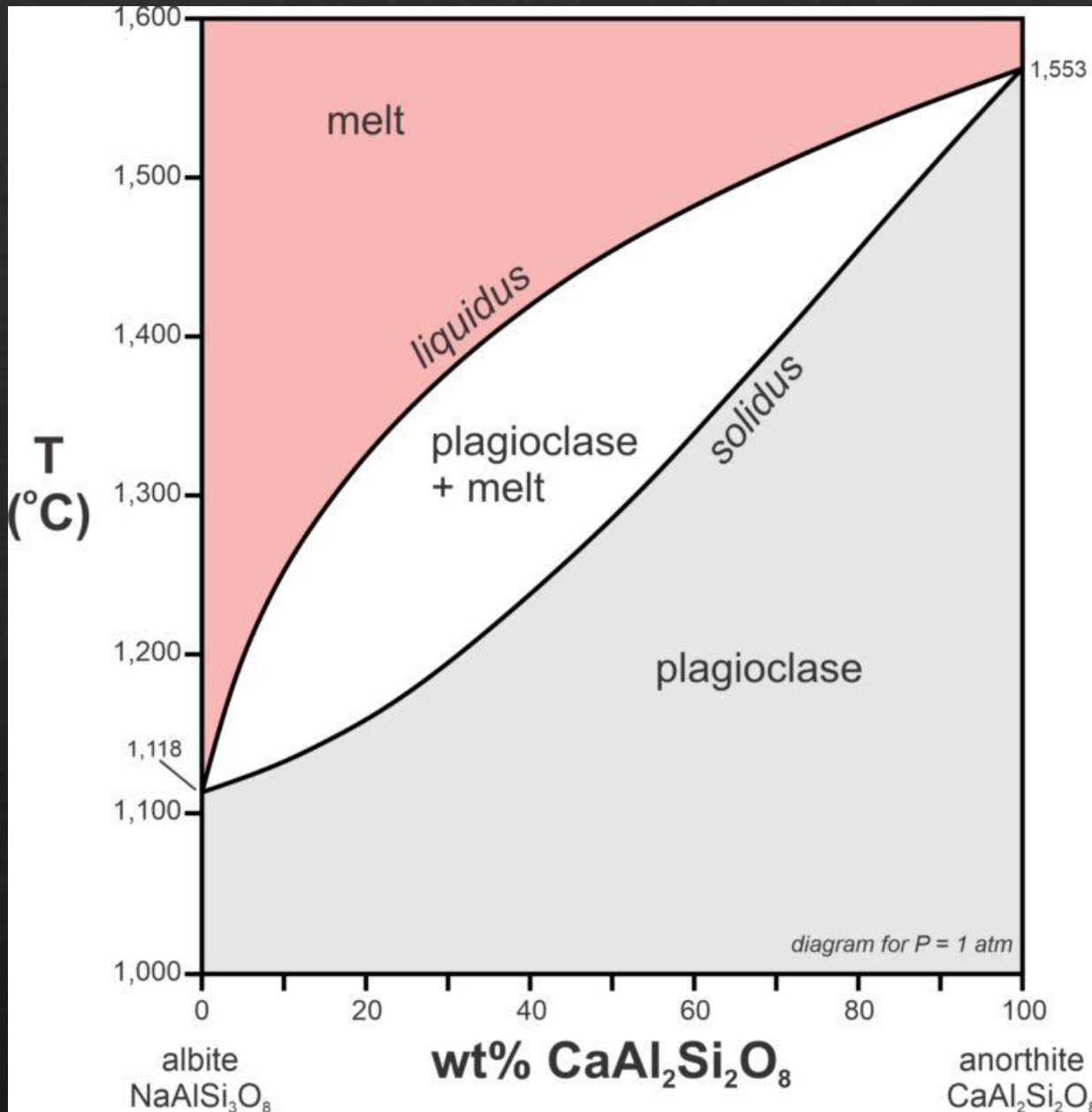
# Урвалын хөвөө

Тэнцвэрт бус талсжилт  
Форстерит ( $Mg_2SiO_4$ ) - кристобалит ( $SiO_2$ )  
систем

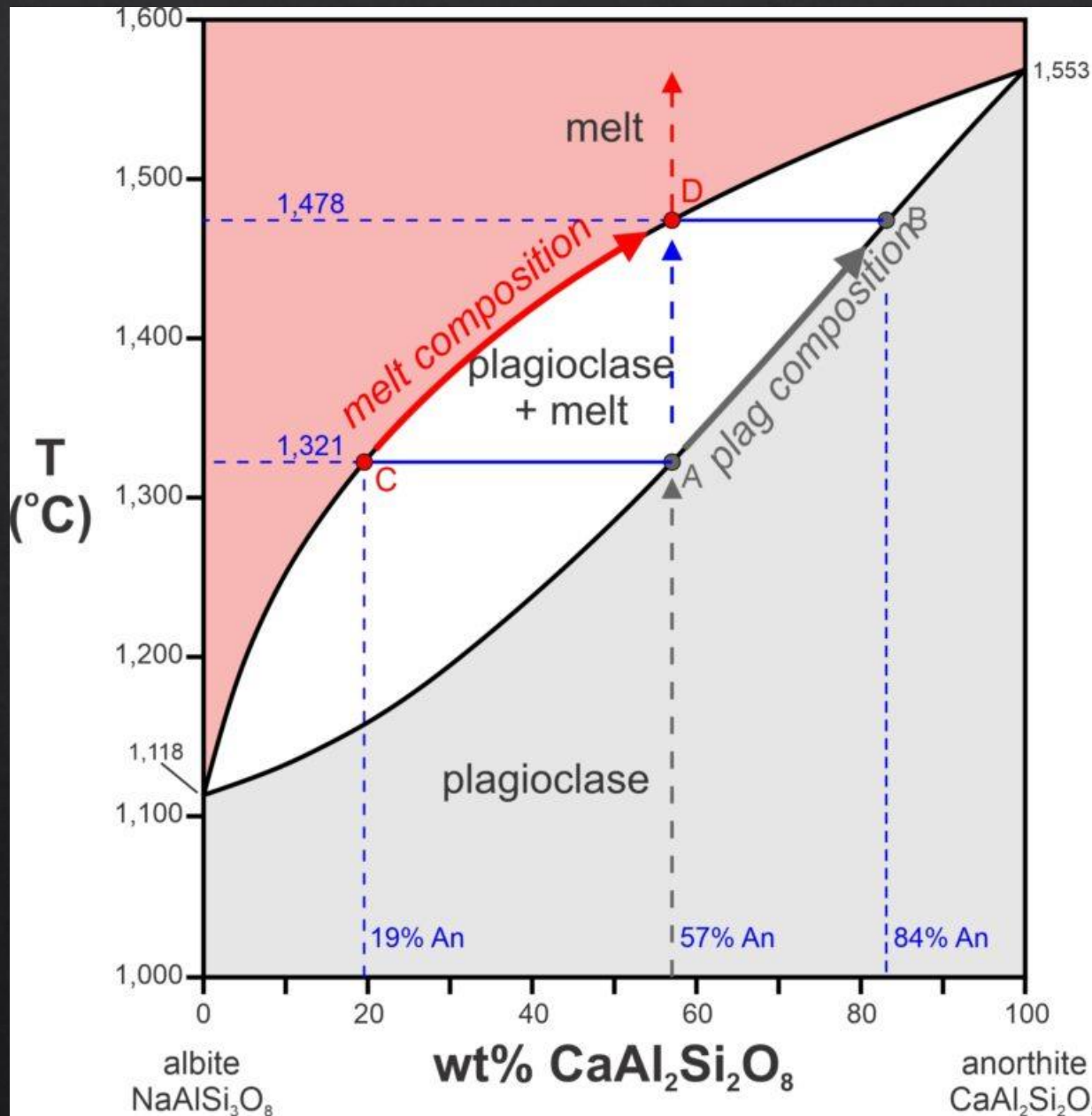
Перитектик урвалаар анх үүссэн форстерит хайлмагтай урвалдаж энстатит үүсдэг. Температур хурдан буурснаас эсвэл форстеритын талстууд хайламгаас ялгарсан тохиолдолд урвал нь эцэст явагдаагүйгээс болж энстатит форстеритын талстыг хурээлж үүсдэг ба эвтетикт  $En + Crb$  талсждаг.



# Хатуу уусмалтай фазын диаграм

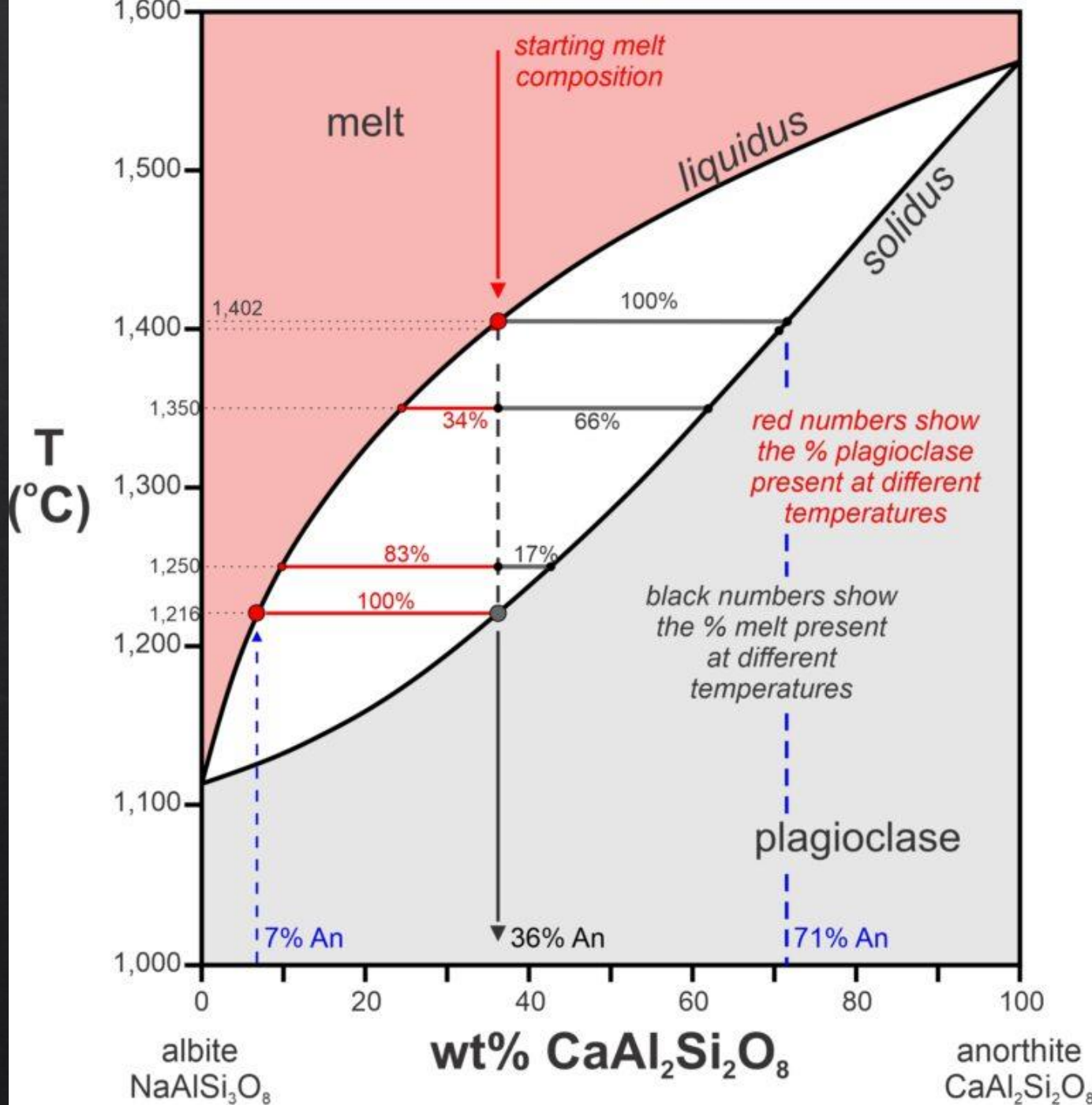






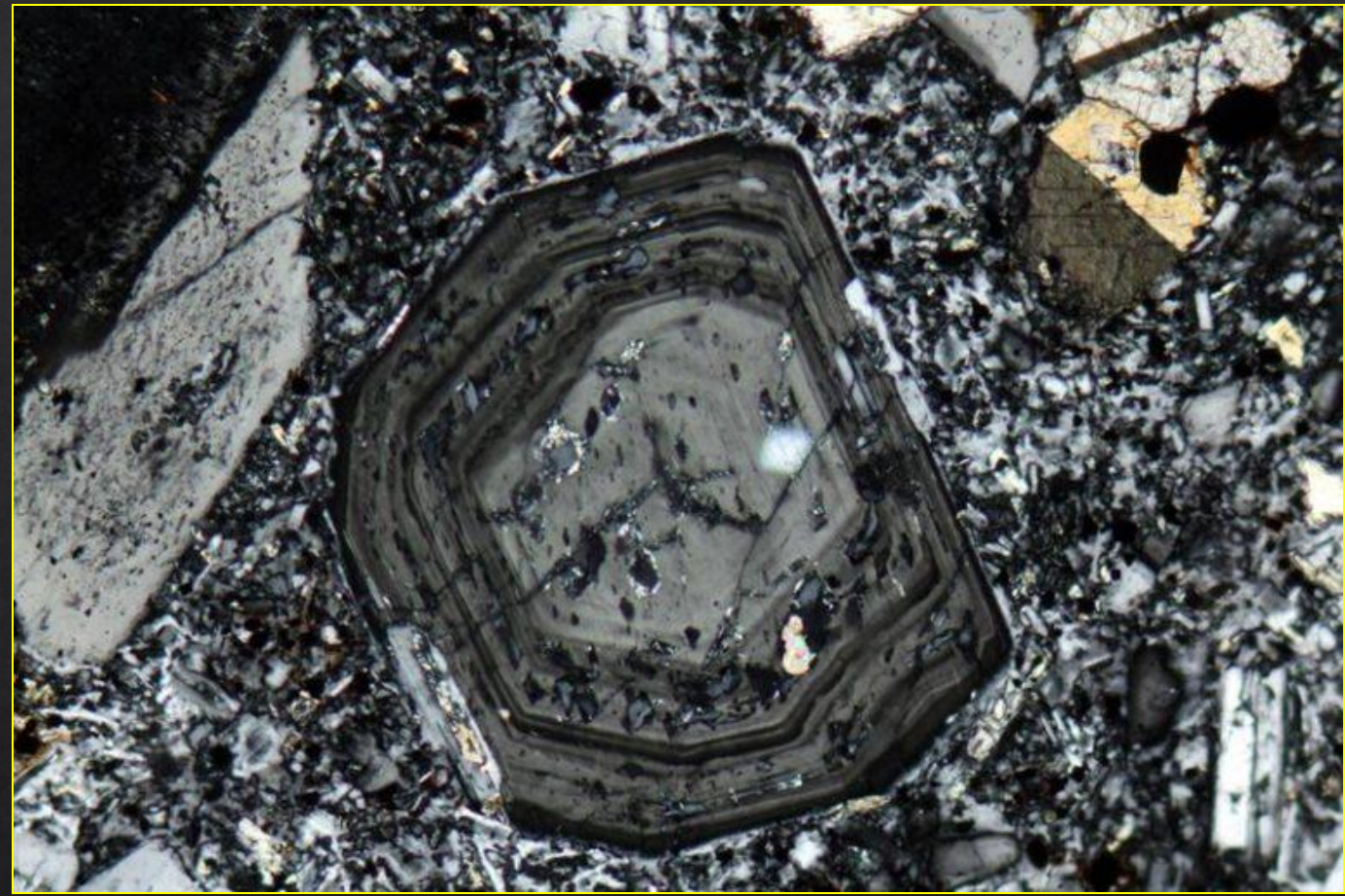
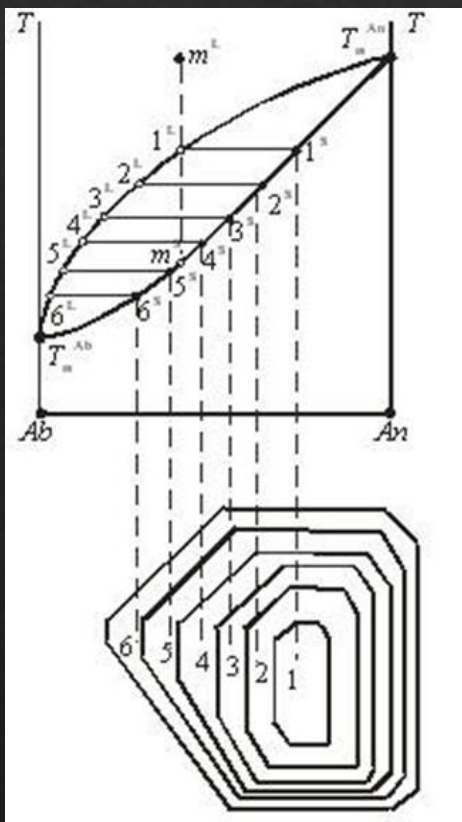
57% An 43% Ab  
 Агуулсан 1600°C  
 хайлмаг

D цэгт  
 $F = 2 (Ab - An) + 1 - 2$   
 $(Pl + L) = 1$   
 Үүссэн плагиоклаз  
 84% An  
 D-A (Pl+L)  
 A цэгт  $F = 2 + 1 - 2 = 1$   
 Плагиоклаз 57% An  
 Хайлмаг C цэгт  
 19% An

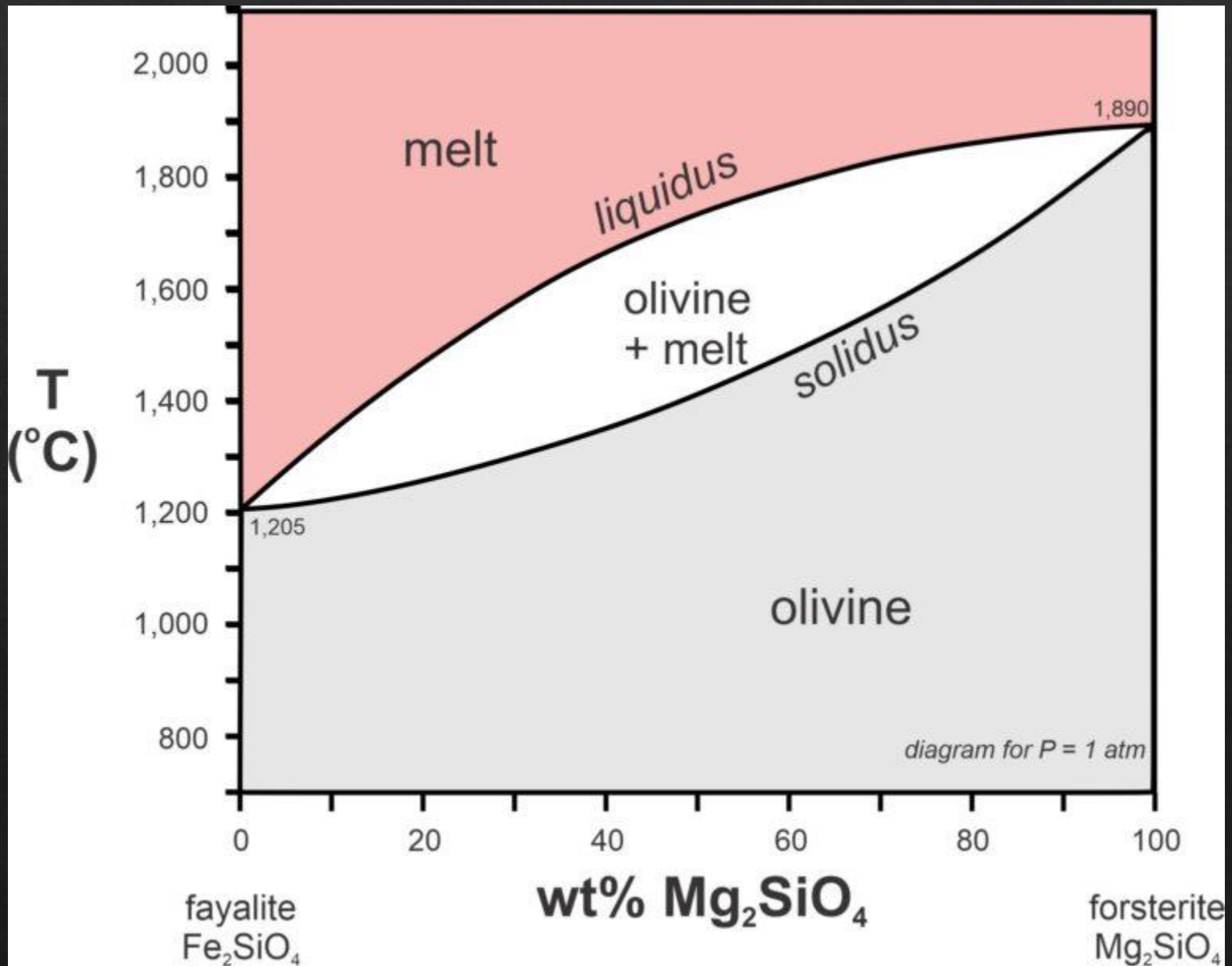


Анхны хайлмаг 36 % An 1400° кристаллаж эхэлсэн Эхний плагиоклаз 71% An Эцэсийн 36% An

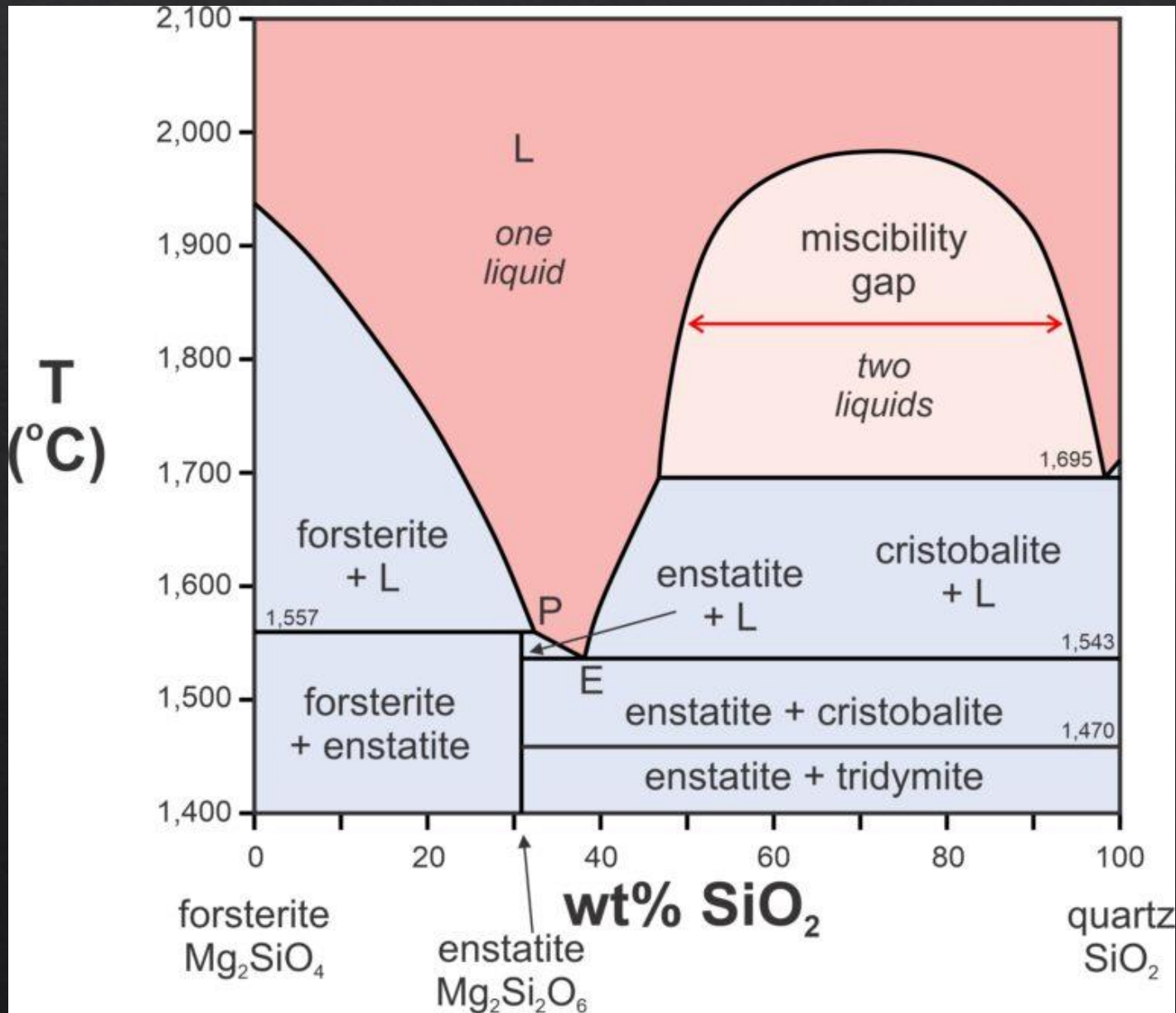
# Бүслүүрлэг плагиоклаз

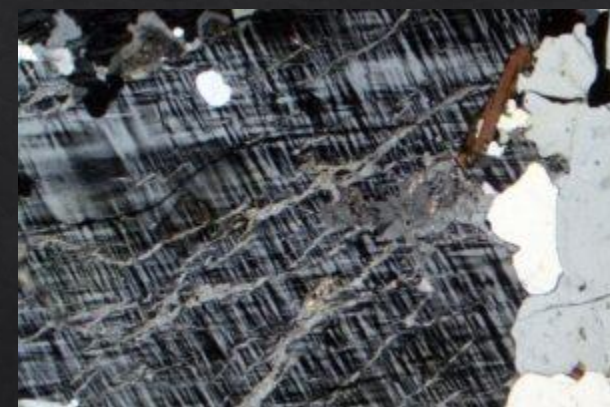
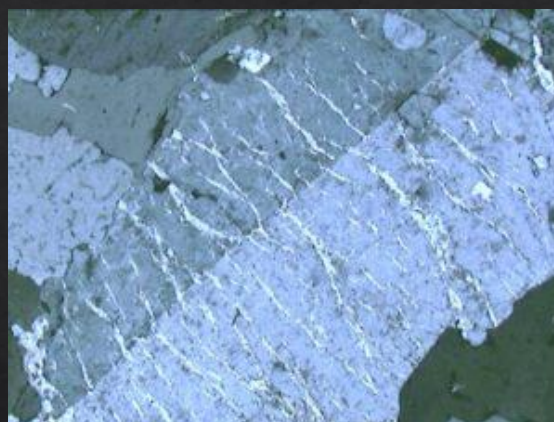
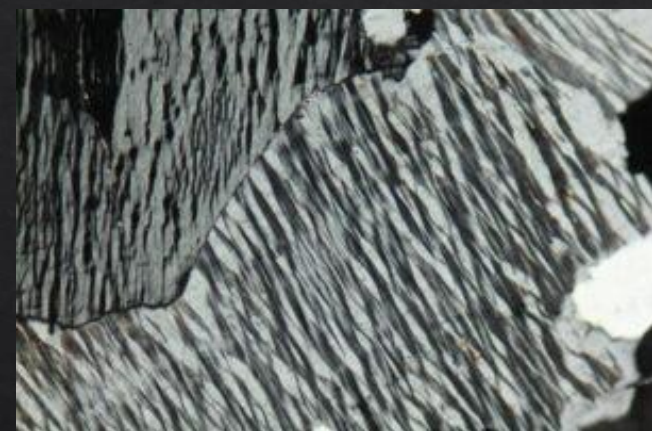
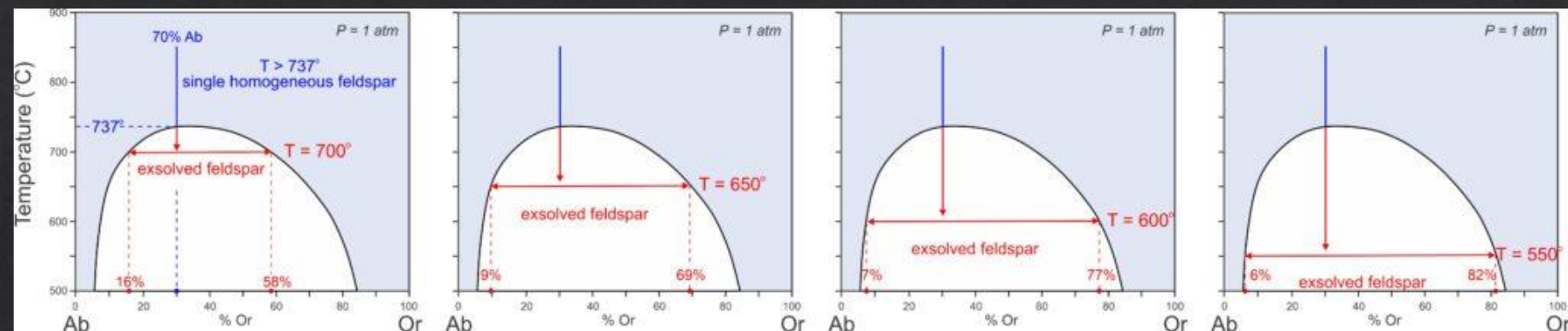


# Фаялит-форстерит систем



# Холилдохгүй байдал



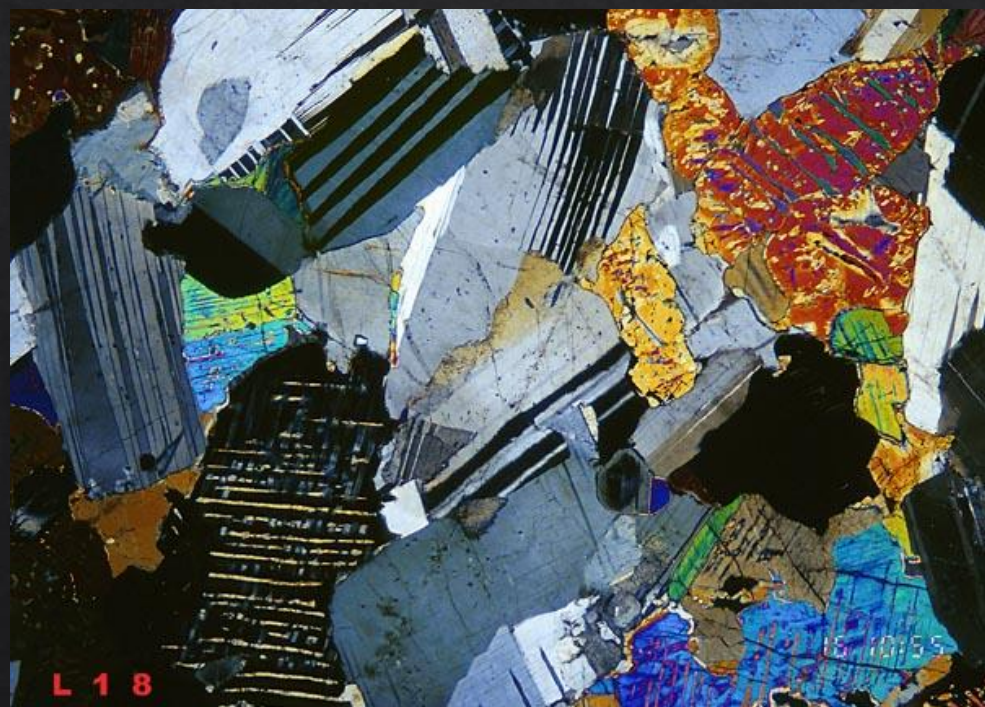


Өндөр температурт нэг хээрийн жонш, бага  $T$  хоёр хээрийн жонш-альбит ба ортоклаз

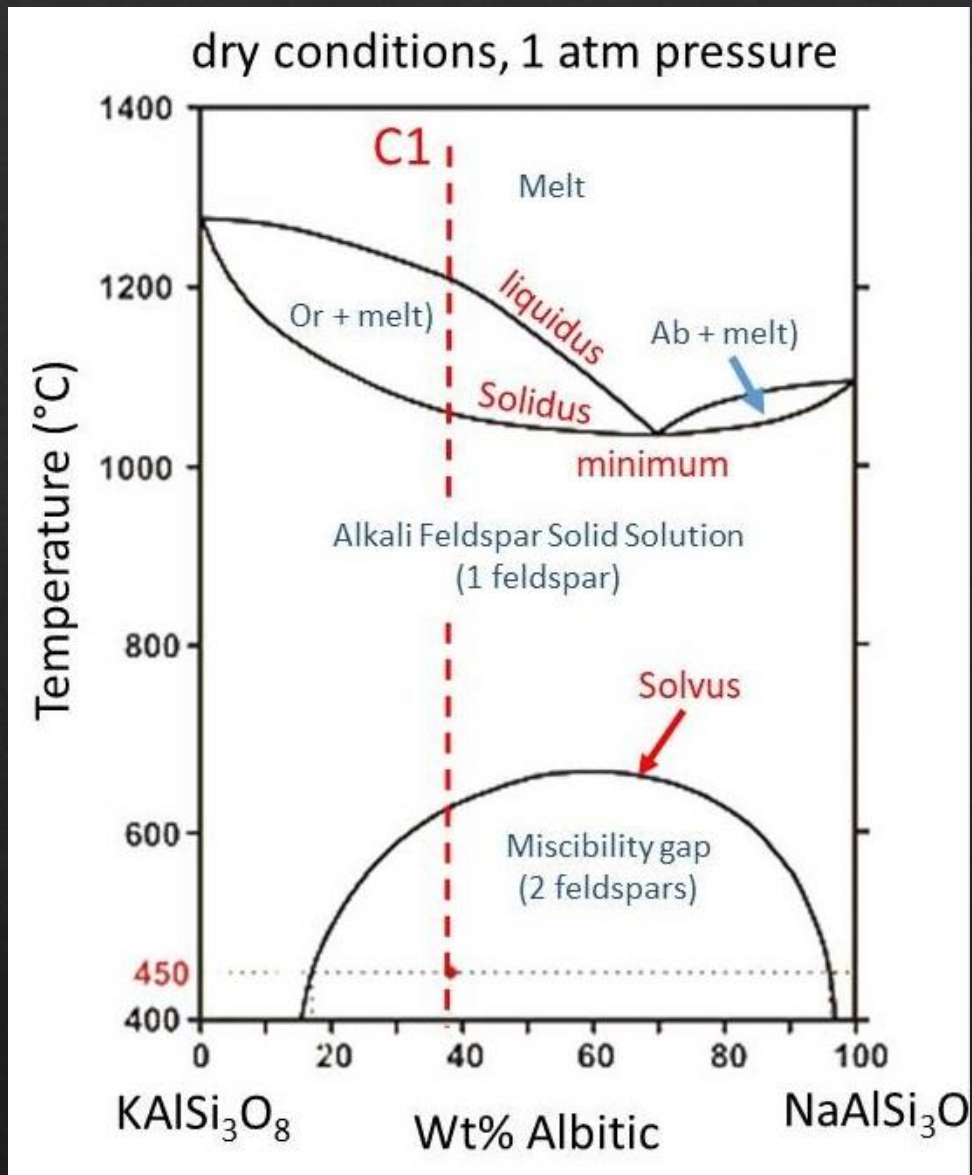
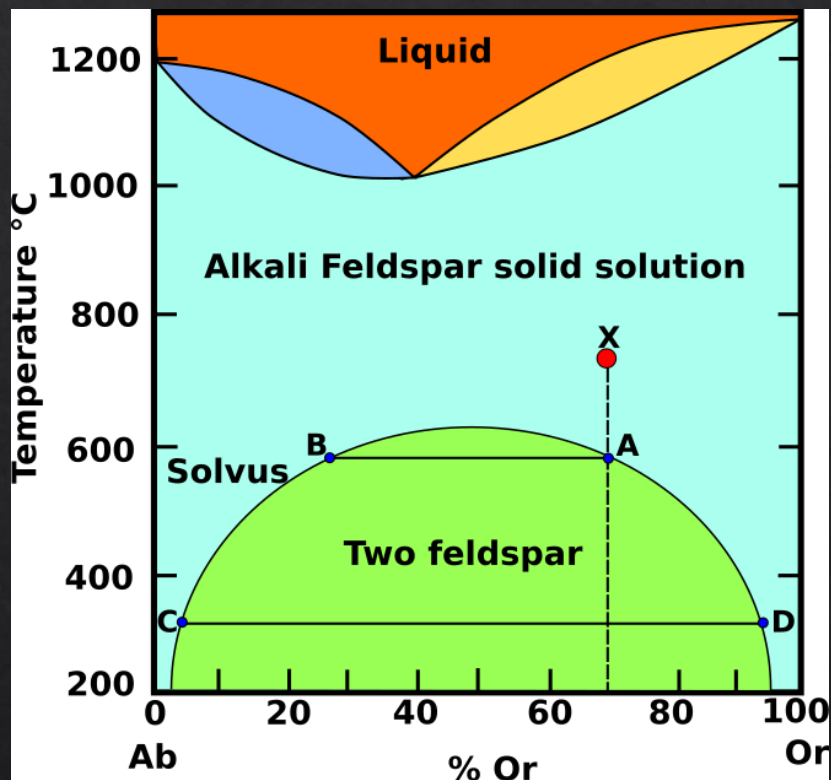
# Задралын структур субсолидуст холилдохгүй байдал

Пироксен  
Гиперстены (Орх) ламелл  
авгит (Срх) дотор

Хээрийн жонш  
альбит  
(пертит) микроклин дотор



# Шүлтлэг хээрийн ЖОНШ

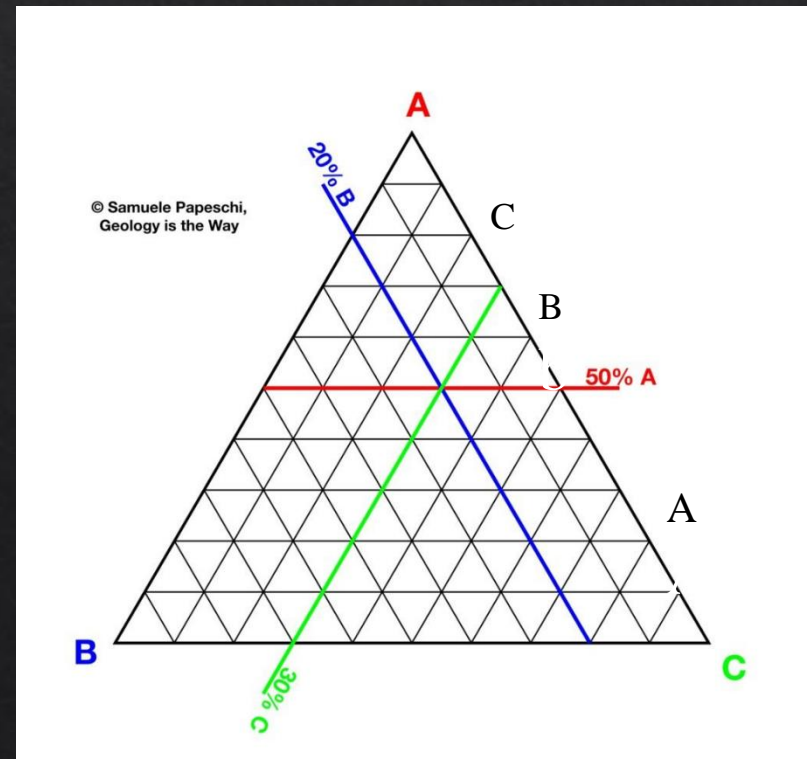
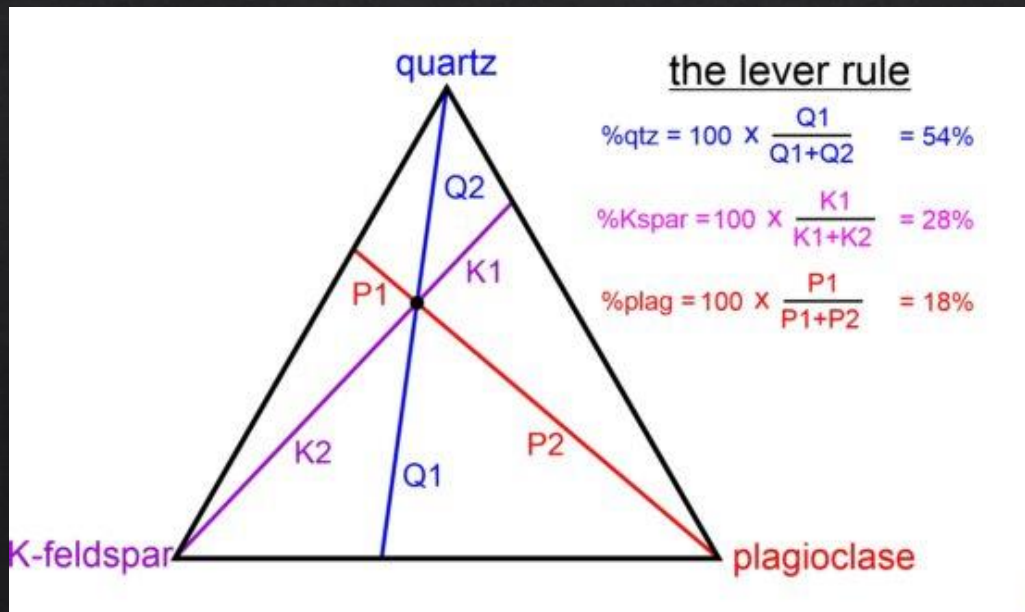
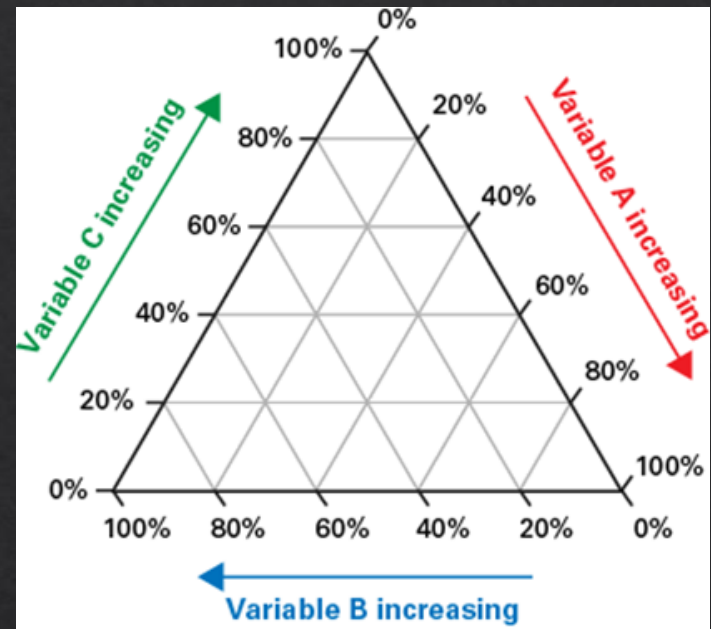


Сольвус - нэг төрлийн хатуу уусмалын задрал эсвэл инконгруэнт хайлалттай үүсч болох хэд хэдэн фазын талбайгаас тусгаарлах муруй

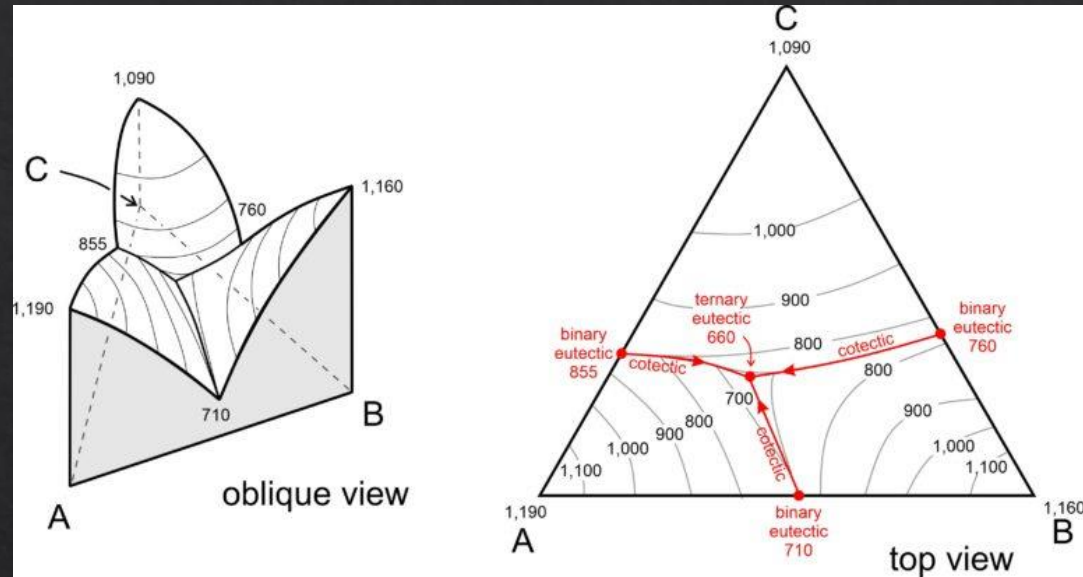
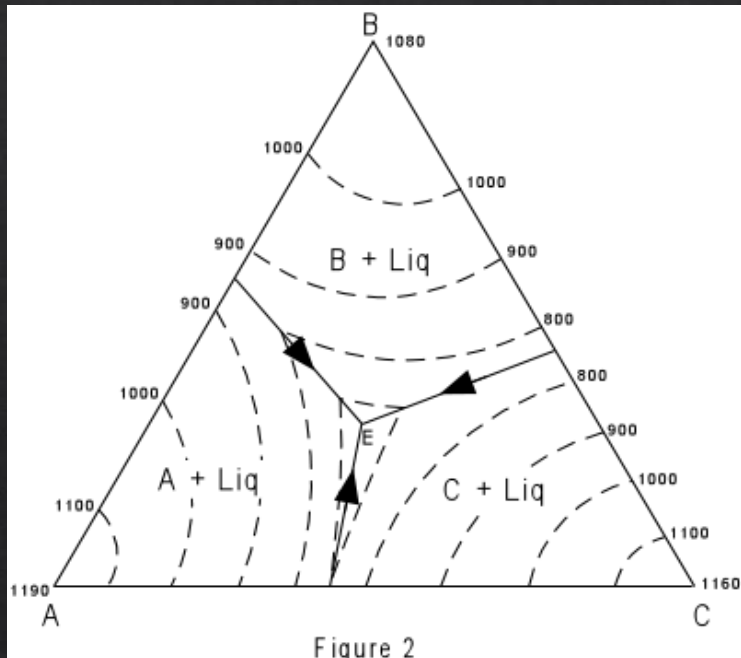


# Гурван компоненттэй (гурвалсан) диаграм

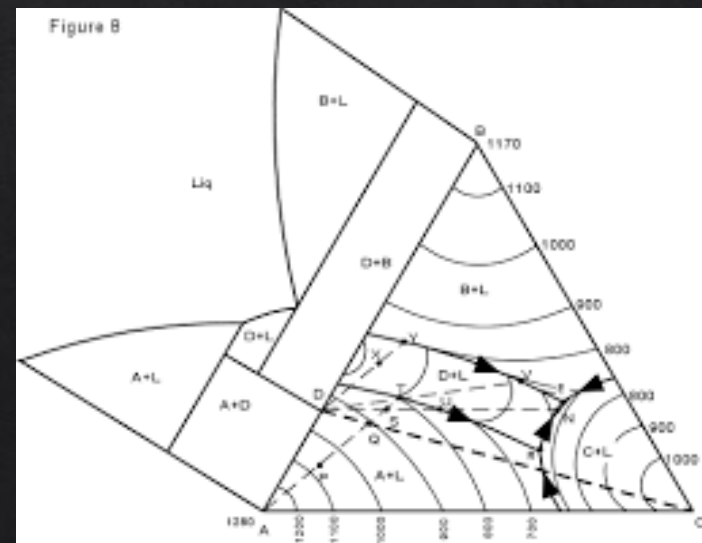
Хөшүүргийн дүрэм



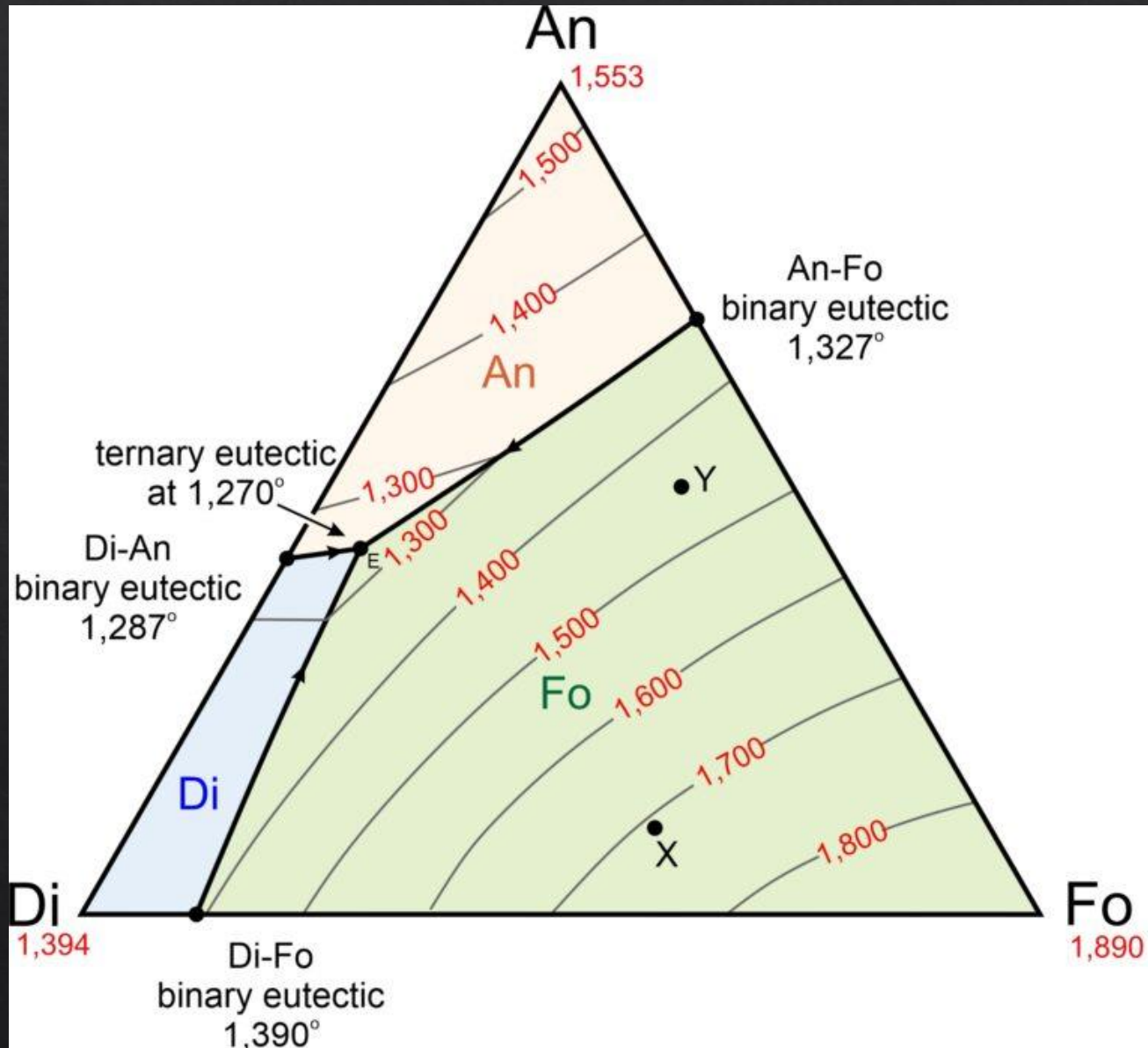
# Гурвалсан диаграм



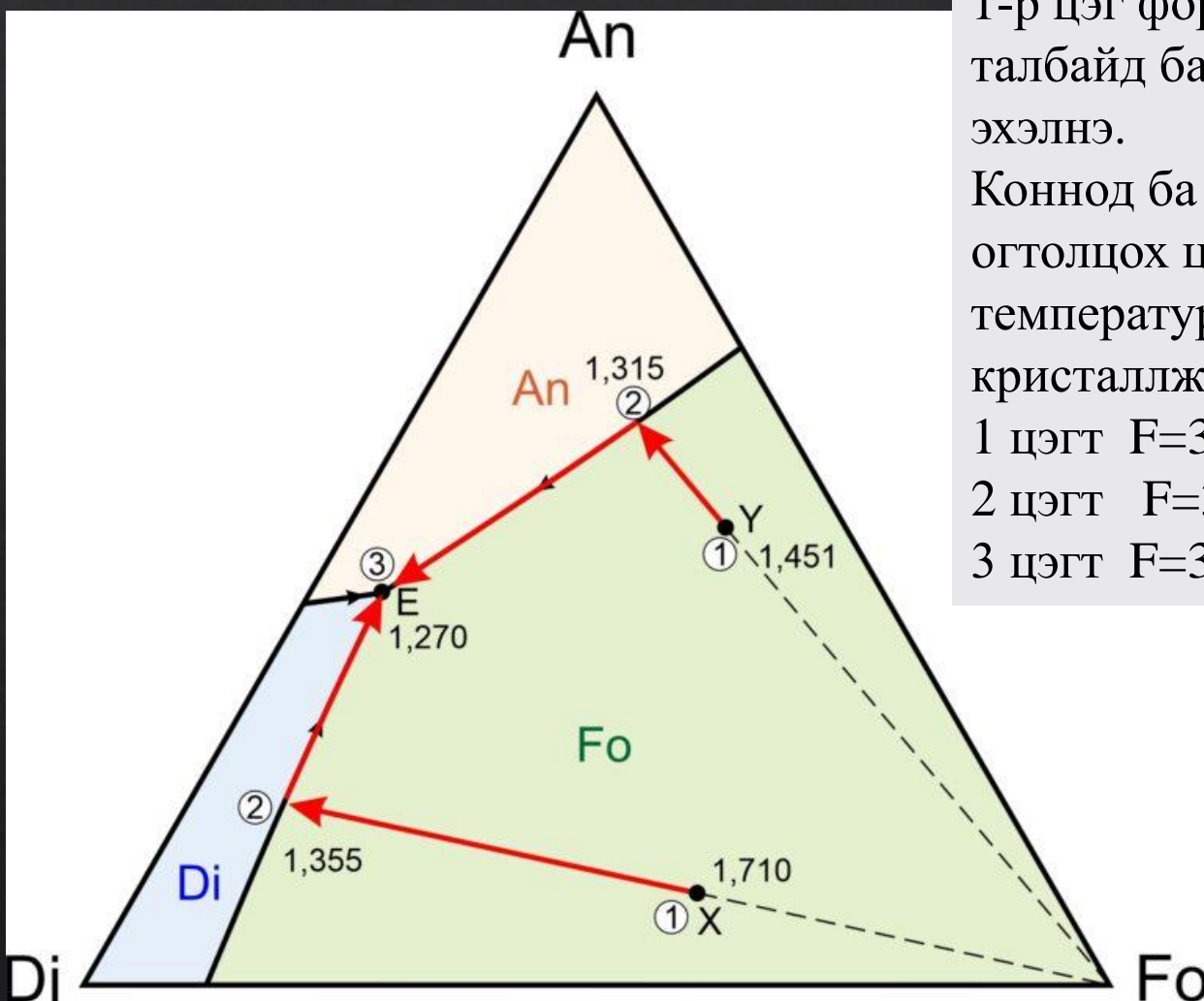
Дор хаяж нэг чөлөөт зэргийн тоо байхад хоёр ба түүнээс дээш кристаллаг фазын тэнцвэрийг **котектик гэж нэрлэдэг.**



# Диопсид-анортит-форстерит систем



# Di-An-Fo систем



Ү цэгт 1-2-3

1-р цэг форстеритын талсжилтийн талбайд байгаа тул талсжилт Fo эхэлнэ.

Коннод ба котектикийн муруй огтолцох цэг илүү өндөр температуртай байдаг, иймээс кристаллжилт 3-р цэг руу чиглүүлнэ.

1 цэгт  $F=3+1-2 (Fo+L) =2$

2 цэгт  $F=3+1-3(Fo+An+L)=1$

3 цэгт  $F=3+1-4 (Fo+An+Di+L)=0$

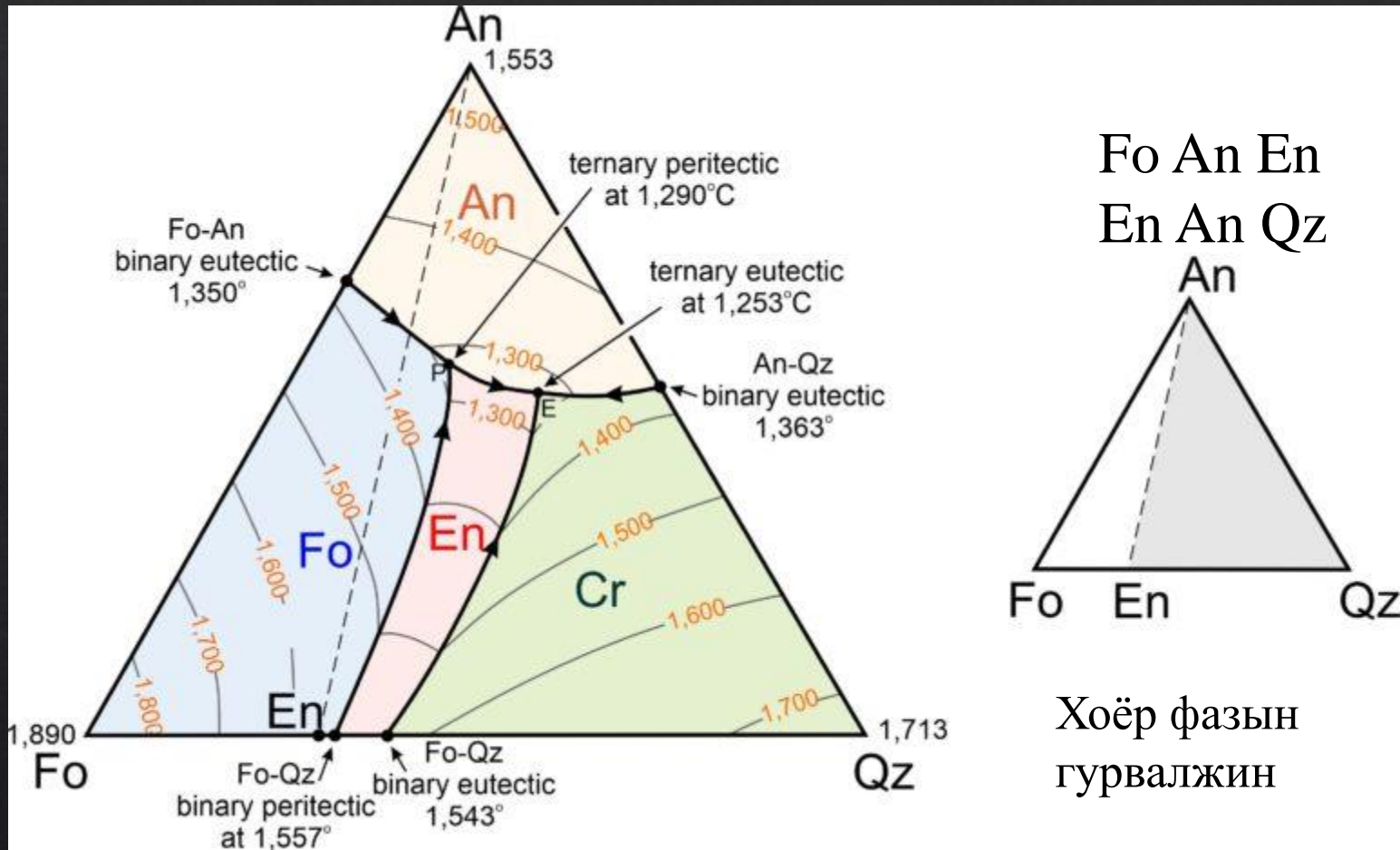
Коннод- тэнцвэрт байгаа цэгүүдийг (фазуудыг) холбосон шугам

X цэгт 1-2-3. 1-р цэгт  $F= 3+1-2 =2$

2-р цэгт  $F=3+1-3 (Fo+Di+L) =1$

E цэгт  $F=3+1-4 (Fo+Di+An+L)=0$

# Fo-An-Qz систем



Хэрэв авсан цэг FoAnEn гурвалжинд байвал талсжилт P цэгт дуусана. Цэг EnAnQz гурвалжинд байвал E цэгт дуусах болно

# Форстерит-анортит-кварц



Хоёр гурвалжин: Fo-An-En ба En-An-Qz

U цэг Fo-An-En гурвалжинд байгаа тул эцэсийн бүтээгдэхүүн Fo-An-En найрлагатай байна. Талсжилт P цэгт дуусах болно. U цэг форстеритын талбайд байгаа тул талсжилт Fo эхэлнэ. Талсжилтийн дараалал: 1 (Fo+L)-2 (Fo+En+L)-3 (Fo+En+An+L)

V цэг 1-2 (Fo+L) - 2 (Fo+An+L) - P (Fo+An+ En+L)

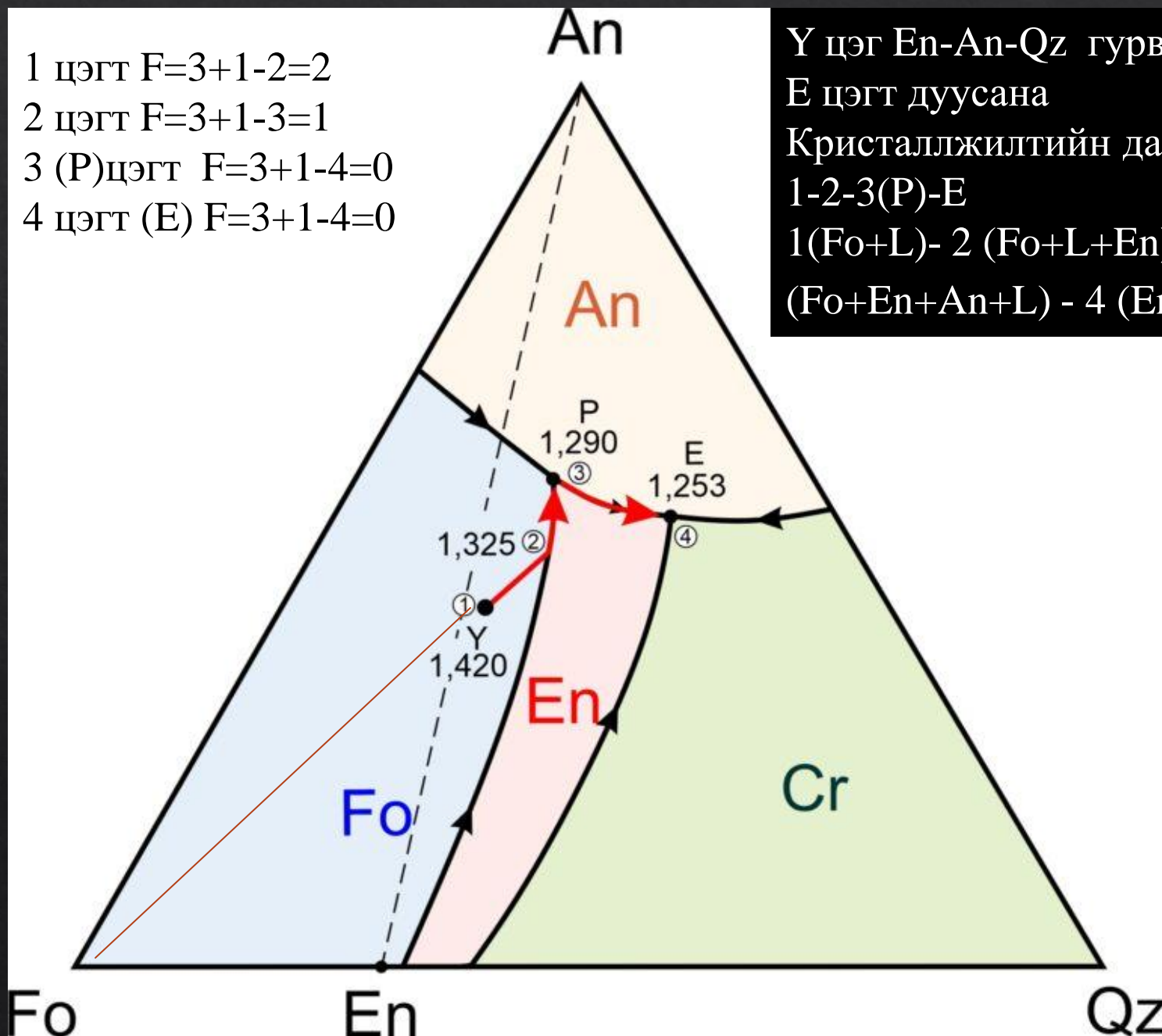
W цэг En-An-Q гурвалжинд байгаа ба эцэсийн бүтээгдэхүүн E цэгт дуусах болно.

Дараалал: 1(Cr+L) -2( Cr+En+L) -3(E) (Cr+En+An+L)

X цэгт 1(Cr+L) - 2(Cr+An+L) -3 (Cr+An+En+L)

- 1 цэгт  $F=3+1-2=2$
- 2 цэгт  $F=3+1-3=1$
- 3 (P)цэгт  $F=3+1-4=0$
- 4 цэгт (E)  $F=3+1-4=0$

Ү цэг En-An-Qz гурвалжинд  
 E цэгт дуусана  
 Кристаллжилтийн дараалал:  
 1-2-3(P)-E  
 1(Fo+L)- 2 (Fo+L+En)- 3  
 (Fo+En+An+L) - 4 (En+An+Cr+L)



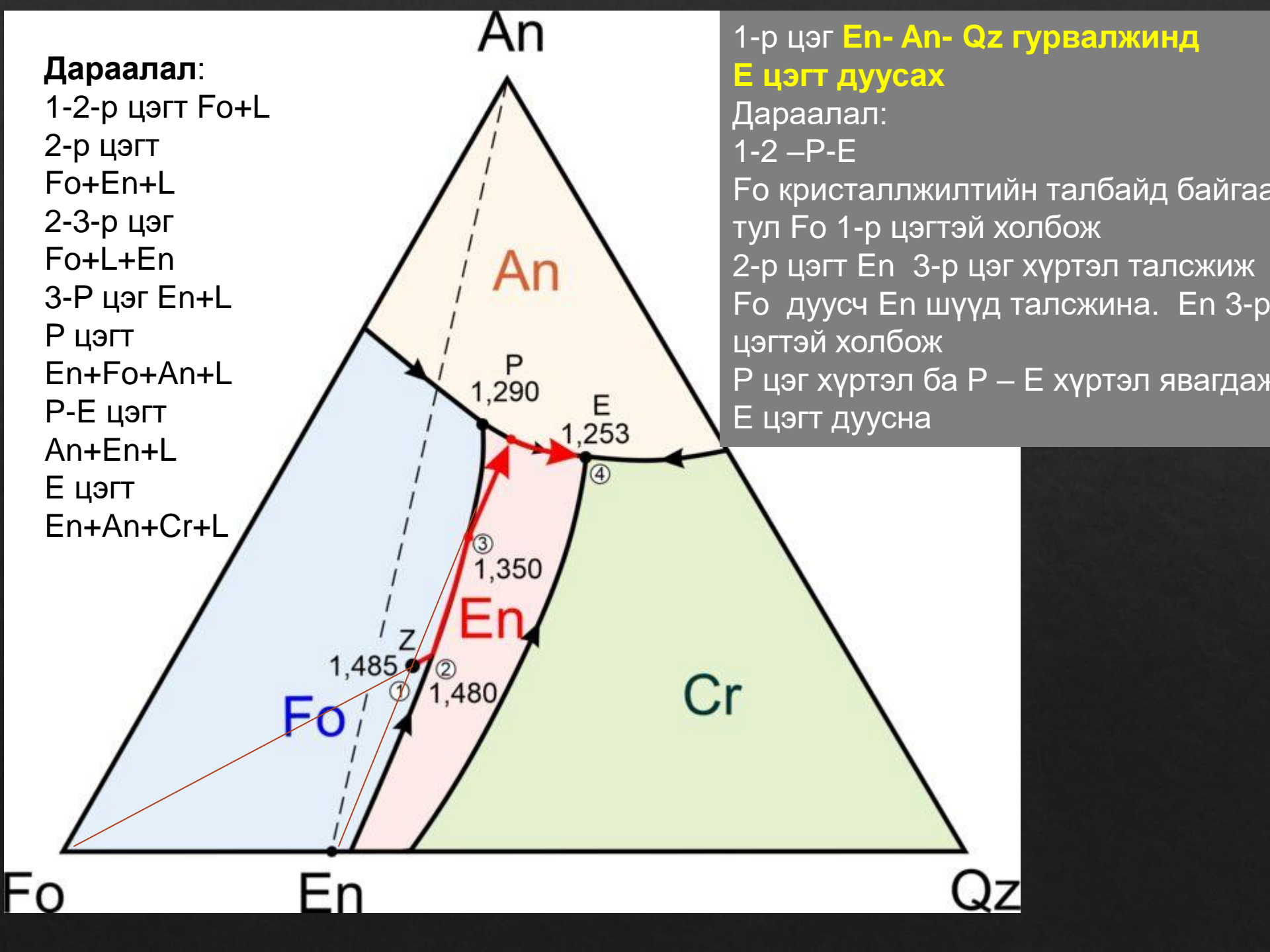
**Дараалал:**

- 1-2-р цэгт Fo+L
- 2-р цэгт Fo+En+L
- 2-3-р цэг Fo+L+En
- 3-Р цэг En+L
- Р цэгт En+Fo+An+L
- Р-Е цэгт An+En+L
- Е цэгт En+An+Cr+L

1-р цэг **En- An- Qz** гурвалжинд **Е** цэгт дуусах

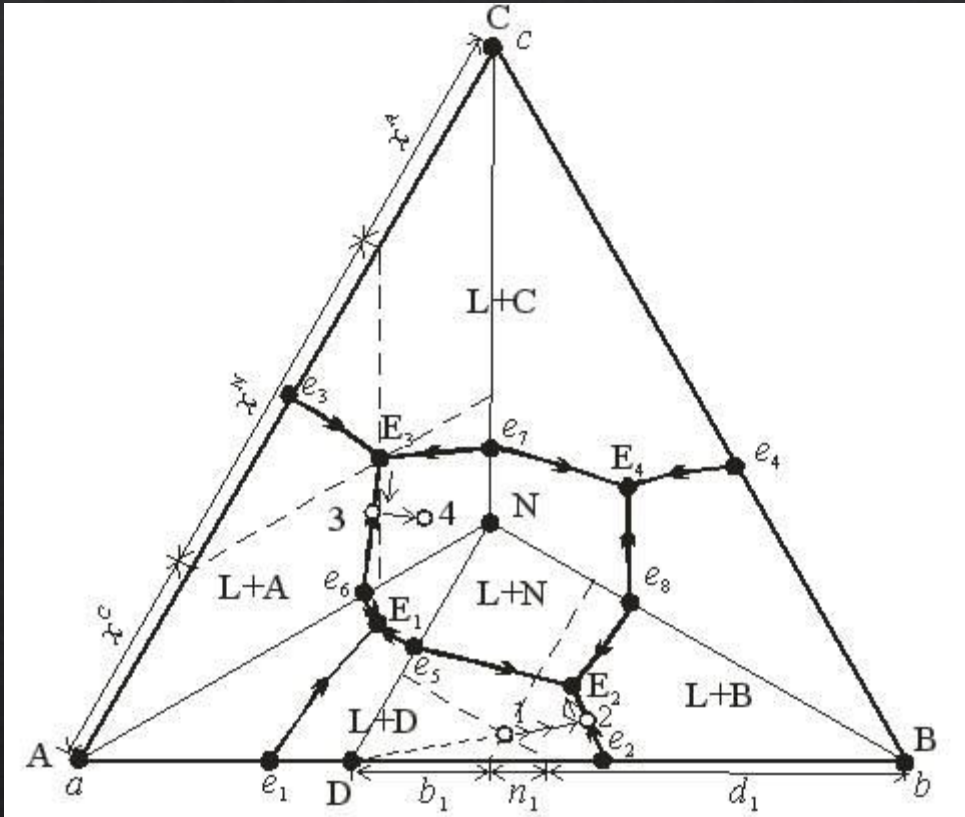
**Дараалал:**

- 1-2 –Р-Е
- Fo кристаллжилтийн талбайд байгаа тул Fo 1-р цэгтэй холбож
- 2-р цэгт En 3-р цэг хүртэл талсжиж Fo дуусч En шүүд талсжина. En 3-р цэгтэй холбож
- Р цэг хүртэл ба Р – Е хүртэл явагдаж
- Е цэгт дуусна





# А-В-С диаграм



$e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6$  хоертын эвтектик  
 $E_1, E_2, E_3, E_4$ -гурвалсан эвтектик  
 ACN, ADN, DNB, CNB-фазын  
 гурвалжин

## 1. Фазын гурвалжин тогтоох

Цэг 1 DNB гурвалжинд оршдог

## 2. Талсжилт дуусах цэг олох

D, N, B -  $E_2$  цэгт

## 3. Талсжилтын дараалал тогтоох

Цэг 1 L+D талсжилтийн талбайд оршдог, иймээс талсжилт D эхэлдэг

2 -котектик шугамаас - $E_2$

1 - 2 -  $E_2$

Фазын томъёо

Цэг 1  $F=3 (A, B, C)+1-2(L+D)=2$

Цэг 2  $F=3+1-3 (L+B+D)=1$

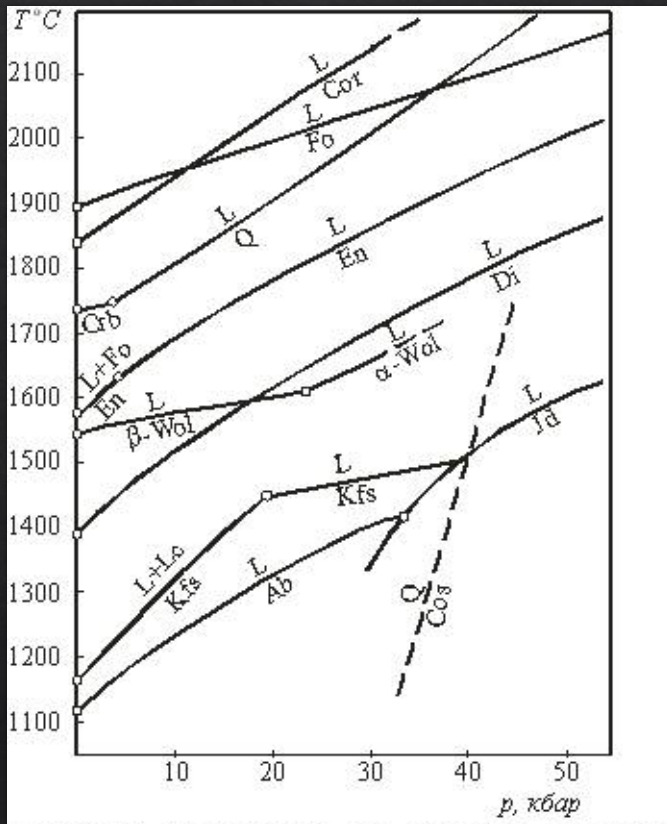
$E_2$   $F=3+1-4 (L+D+B+C)=0$

Цэг 4 ACN фазын гурвалжинд оршпог

$E_2$  дуусах

Дараалал 4 -3 - $E_3$

# Даралтын нөлөө



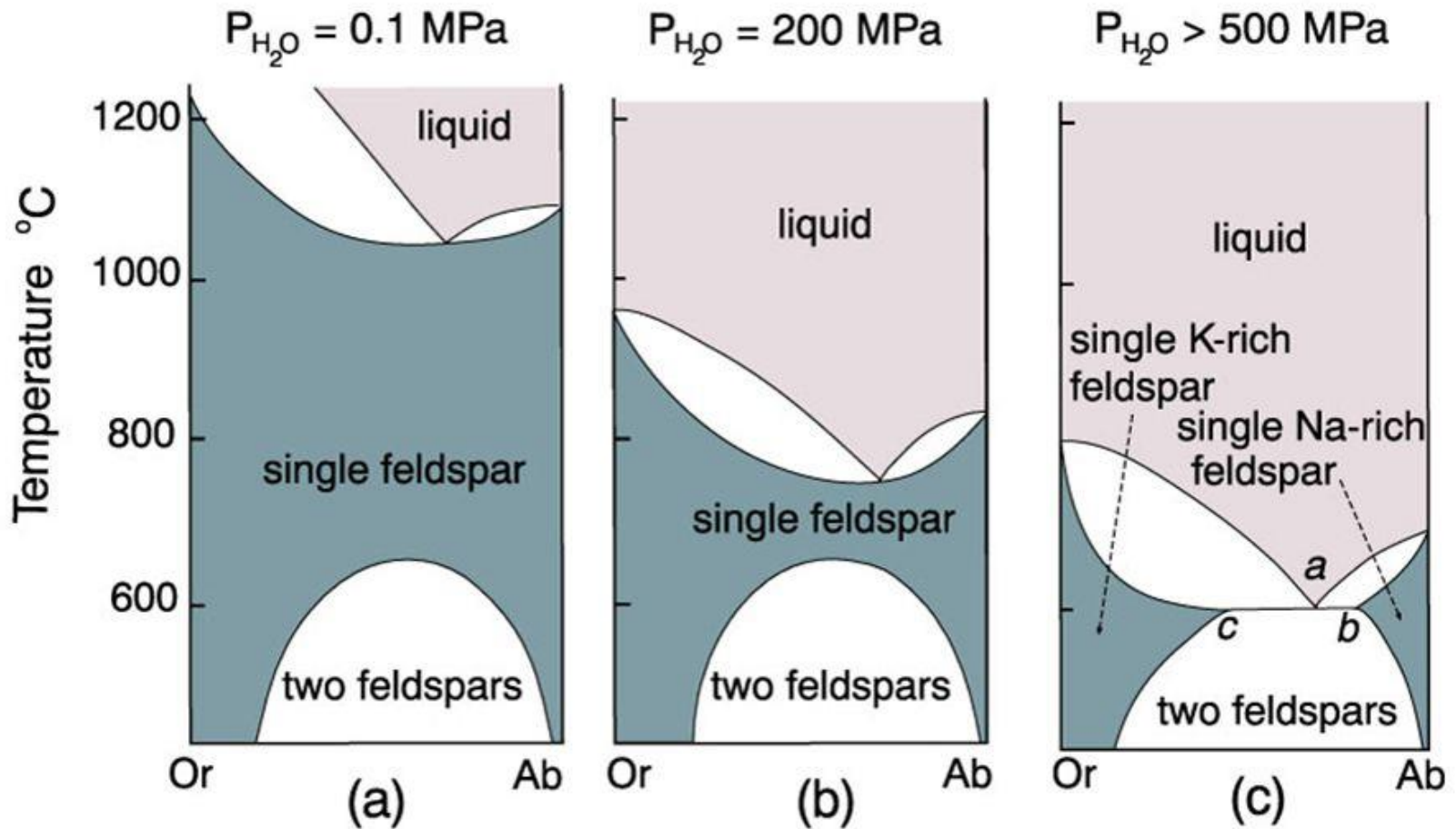
Даралтын нөлөө Клаузиус-Клайпероны тэгшитгэлээр тодорхойлогддог  $dT/dP = \Delta V / \Delta S = V^L - V^S / S^L - S^S$

$V^L$  – хайлмаг дахь компонентийн эзэлхүүн,  $V^S$  – хатуу фаз дахь эзэлхүүн,  $S^L, H^L$  и  $S^S, H^S$  – шингэн ба хатуу фаз дахь энтропи ба энтальпи .

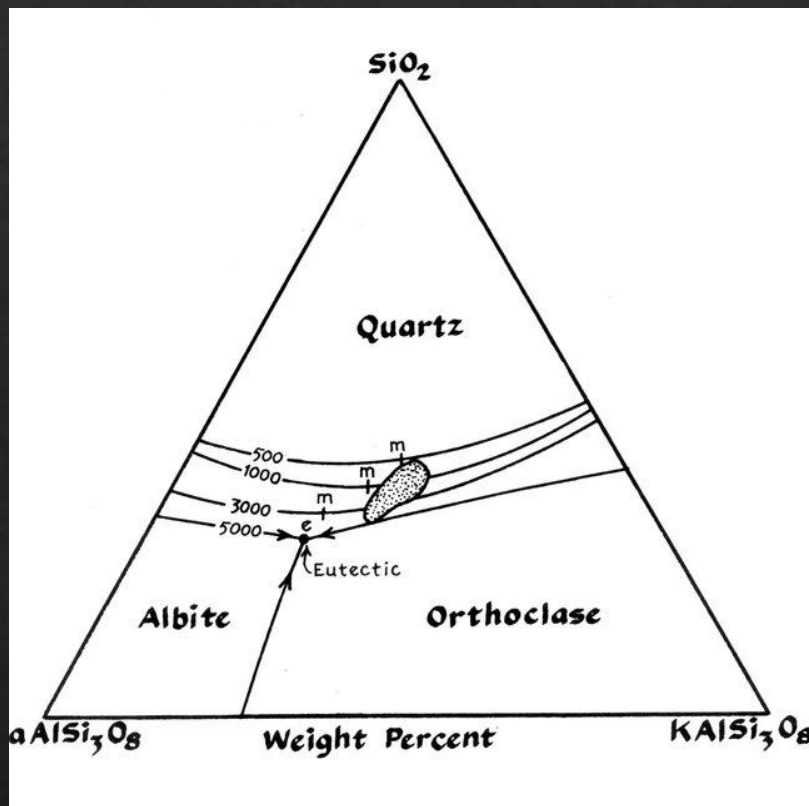
Даралт ихсэхэд эрдсүүдийн хайлах температур ихсэдэг.

$dT/dP$  эрдэс болгонд өөр байдаг ( 0, 0036 - 0, 030 град.атм).

# Effect of $P_{H_2O}$ on Ab-Or

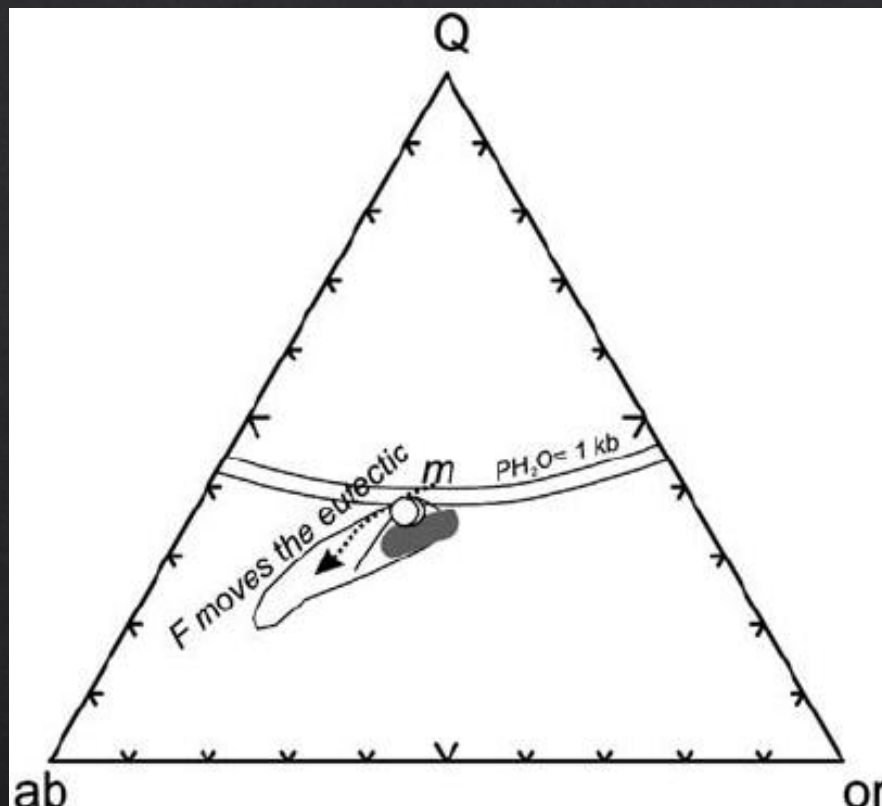


## H<sub>2</sub>O нөлөө

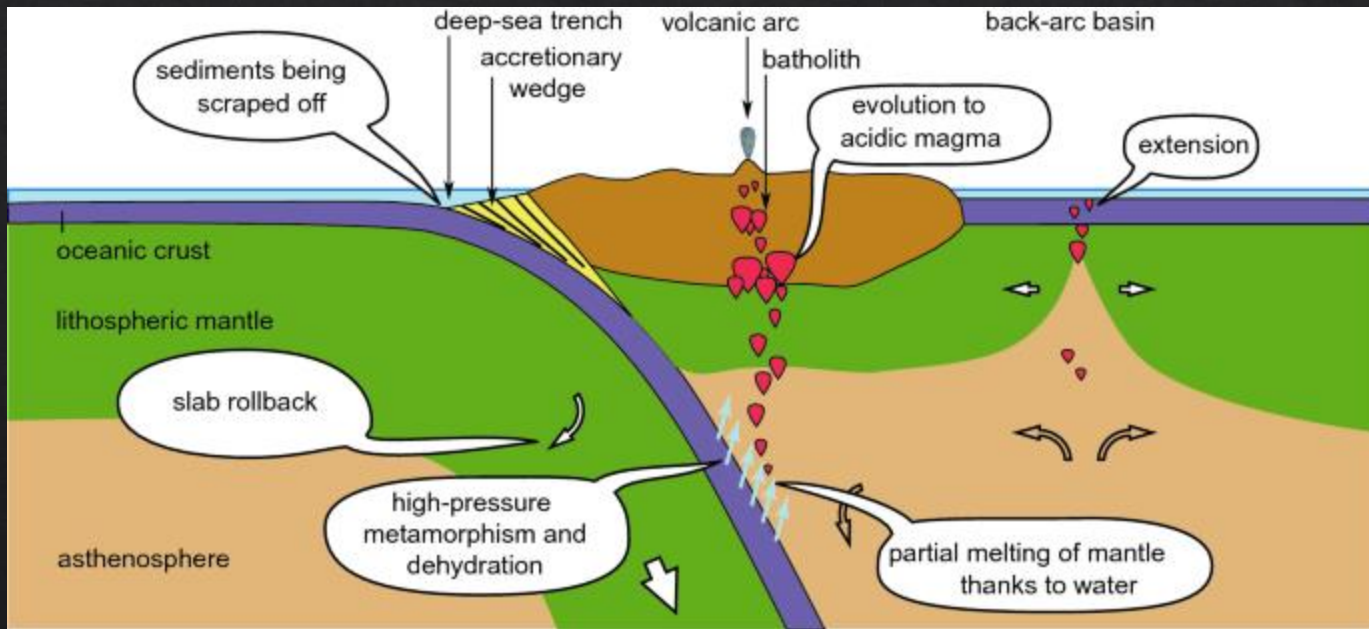
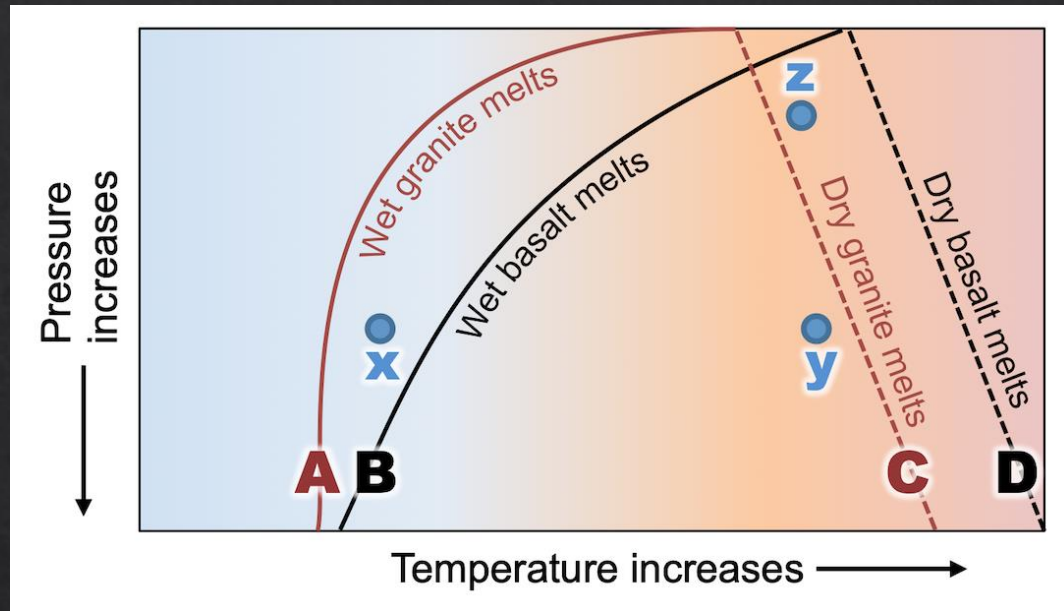
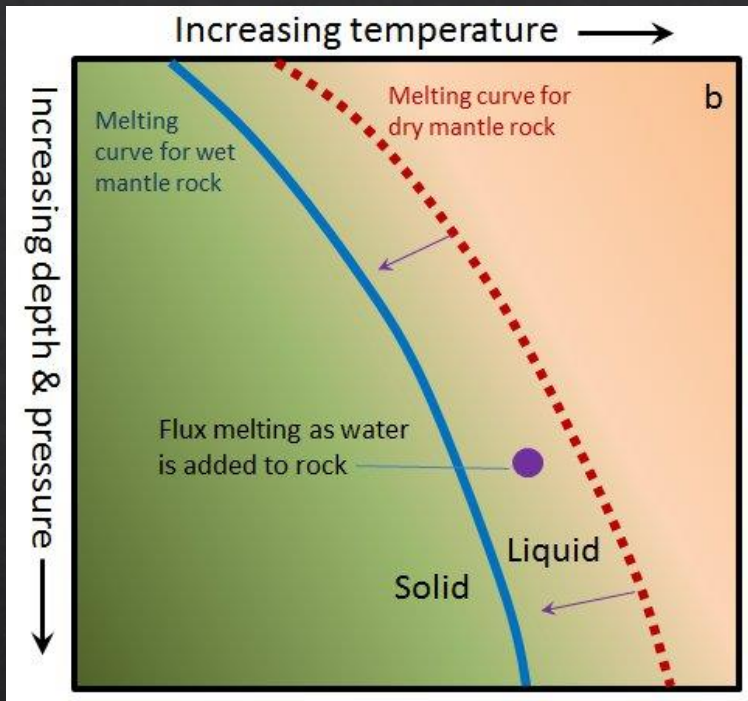


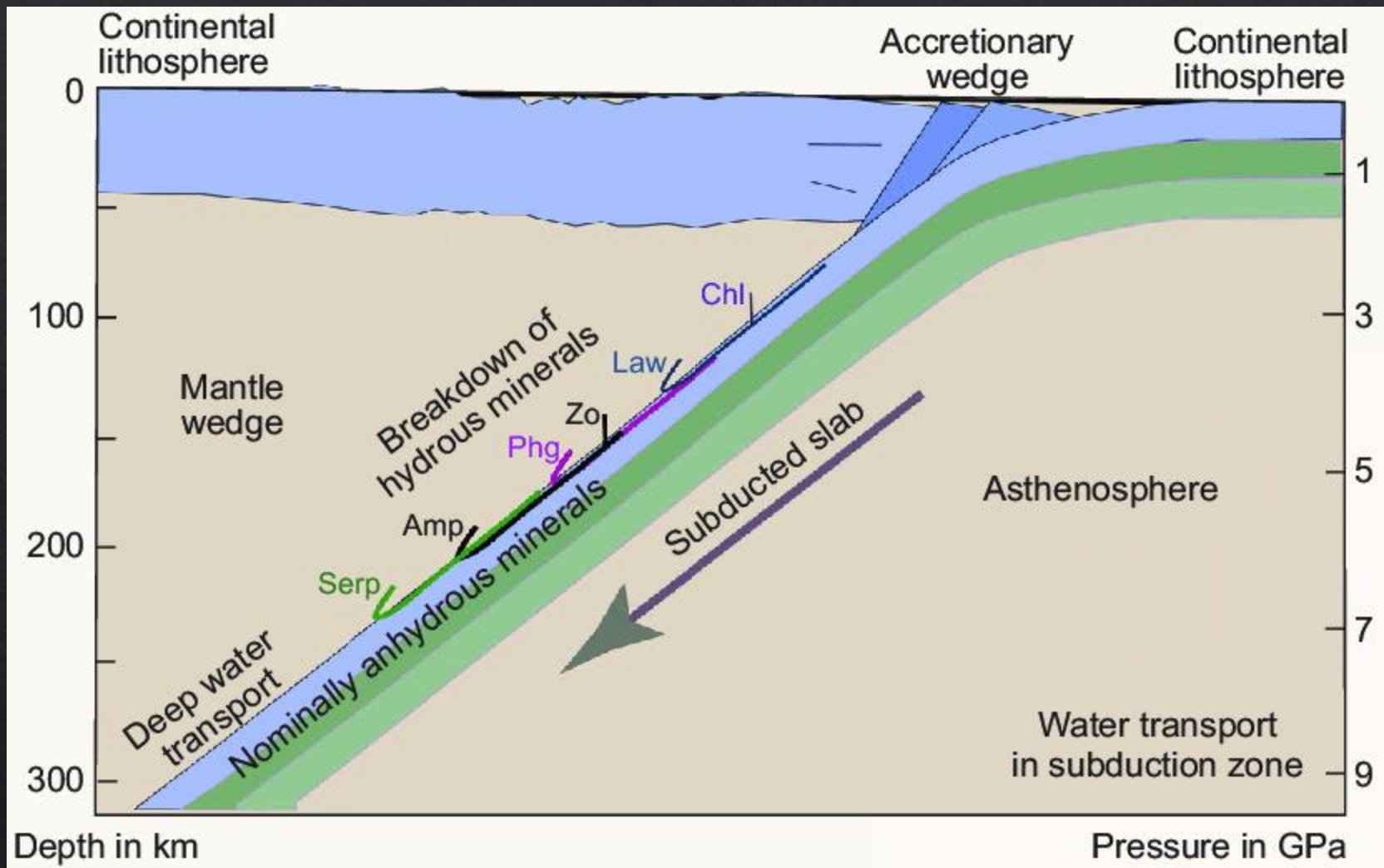
Усны даралт ихсэхэд эвтектик температур буурдаг

## F нөлөө



Онгонит 4% фтор агуулдаг ба эвтектик температур буурч хэсэг альбит магмаас талсждаг





Хлорит, лавсонит, цоизит, фенгит, амфибол, серпентин