

Termobarometrie

Metamorfnní facie

minerální asociace v metamorfnních horninách jsou zejména výsledkem složení horniny (litologie, protolit) a intenzity metamorfózy (teplota, tlak...)

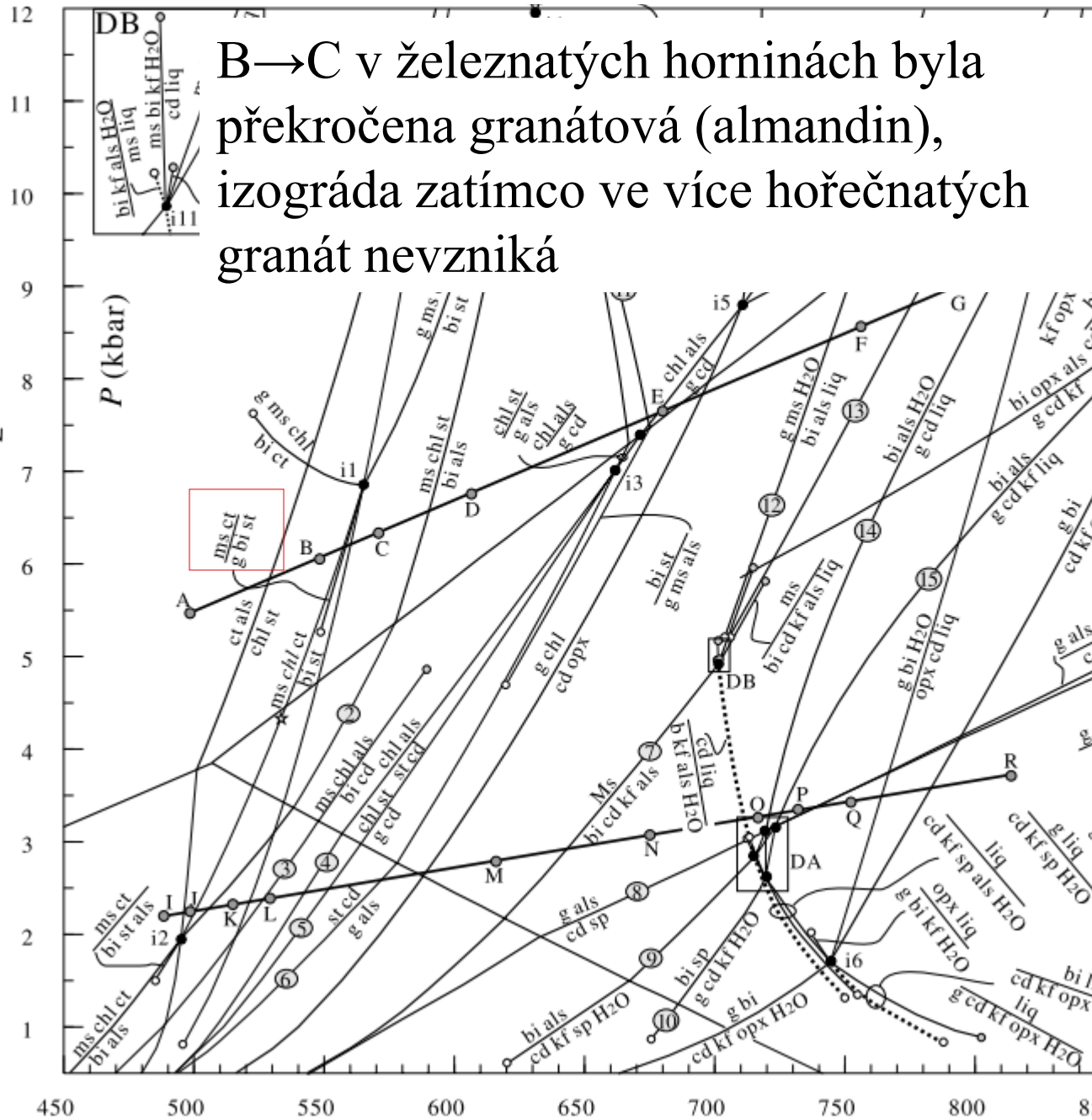
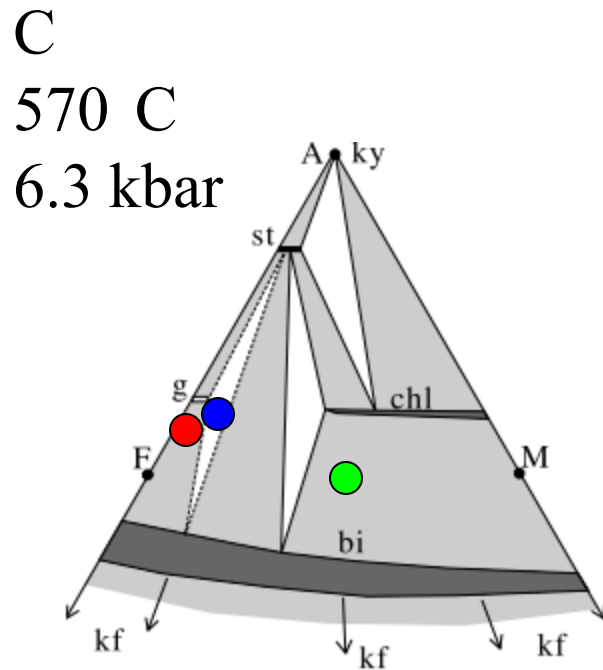
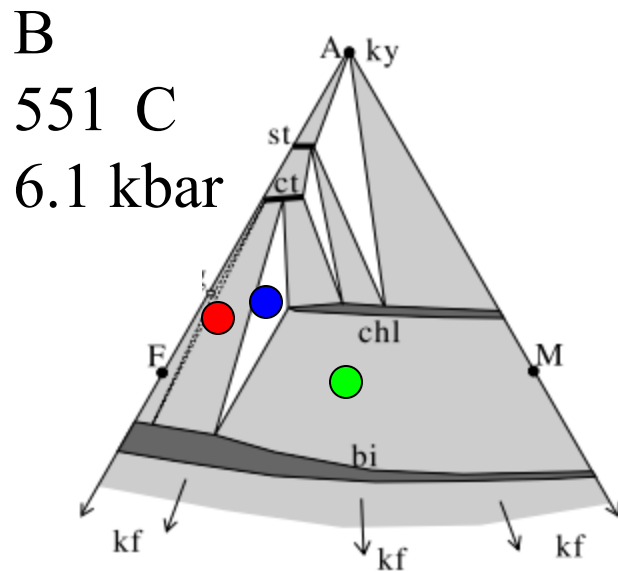
proto jsou minerální asociace a složení koexistujících minerálů používány pro kvantifikaci P-T podmínek

od minulosti do současnosti užíváno několik metod, jejichž principem jsou fázové rovnováhy

1) Petrogenetické mřížky a 2) kompatibilitní diagramy

- 1) P-T (P-X) diagramy pro zjednodušený systém (např. KFMASH, metapelite) – zobrazují univariantní reakce a invariantní body v daném systému = u konkrétní horniny se projevují jen některé z nich v závislosti na konkrétním složení
- 2) nejčastěji trojúhelníkové, či binární diagramy pro P, T = konst., které ukazují možné stabilní minerální asociace v závislosti na proporcích proměnných systémových komponent (např. AFM diagram)

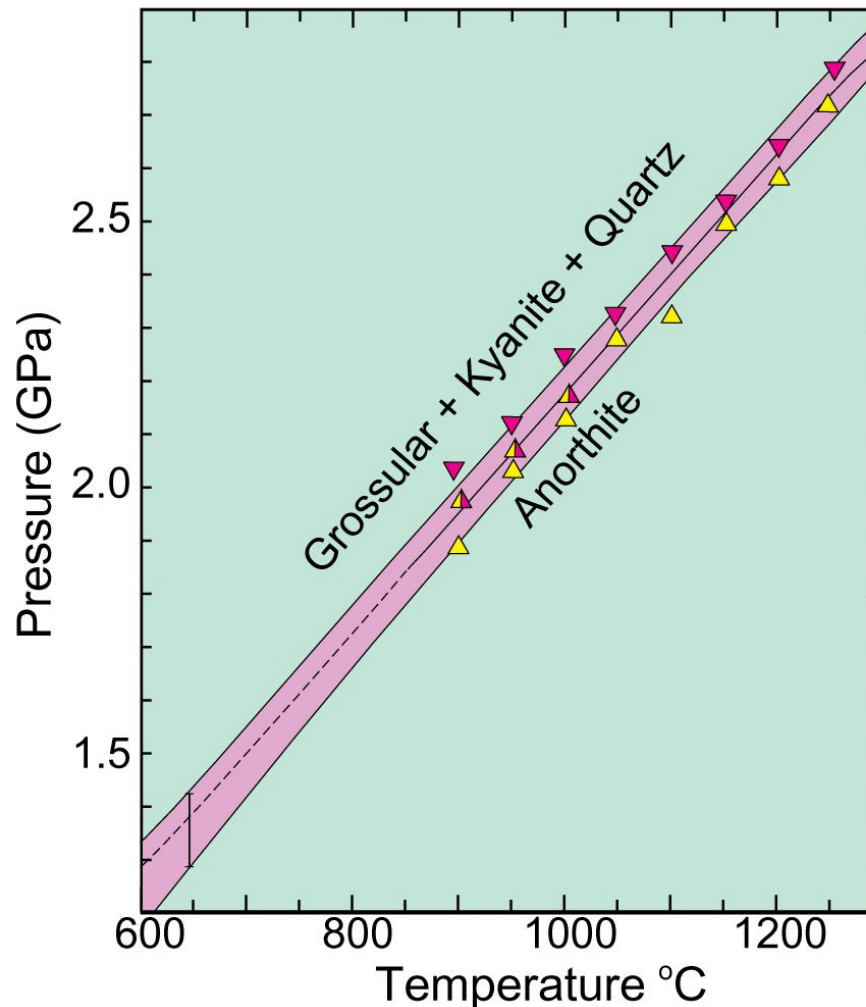
KFMASH (Wei et al., 2003), +qz, ms



Konvenční termobarometrie: Rovnováha GASP v $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

$$F = C - P + 2$$

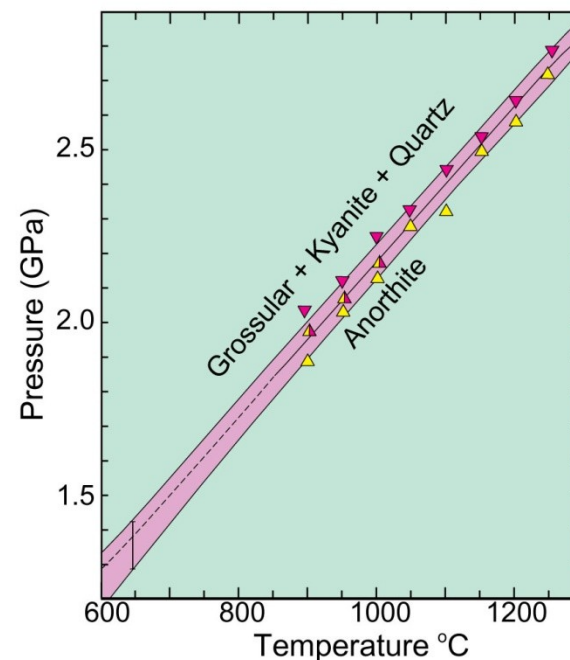
koexistence 4 fází (granát-grossular,
kyanit, křemen, plagioklas-anortit je
možná pouze podél univariantní
křivky)



Konvenční termobarometrie: Rovnováha GASP v CaO-Al₂O₃-SiO₂

pro takovouto rovnováhu platí $\Delta_r G = 0$, kde $\Delta_r G = 0 = \mu_{\text{Grs}} + 2\mu_{\text{Ky}} + \mu_{\text{Qz}} - 3\mu_{\text{An}}$
neboli součet Gibsových funkcí reaktantů je roven součtu Gibsových funkcí produktů
v tomto případě jsou reaktanty a produkty ve standardním stavu (jednotková aktivita),
píšeme

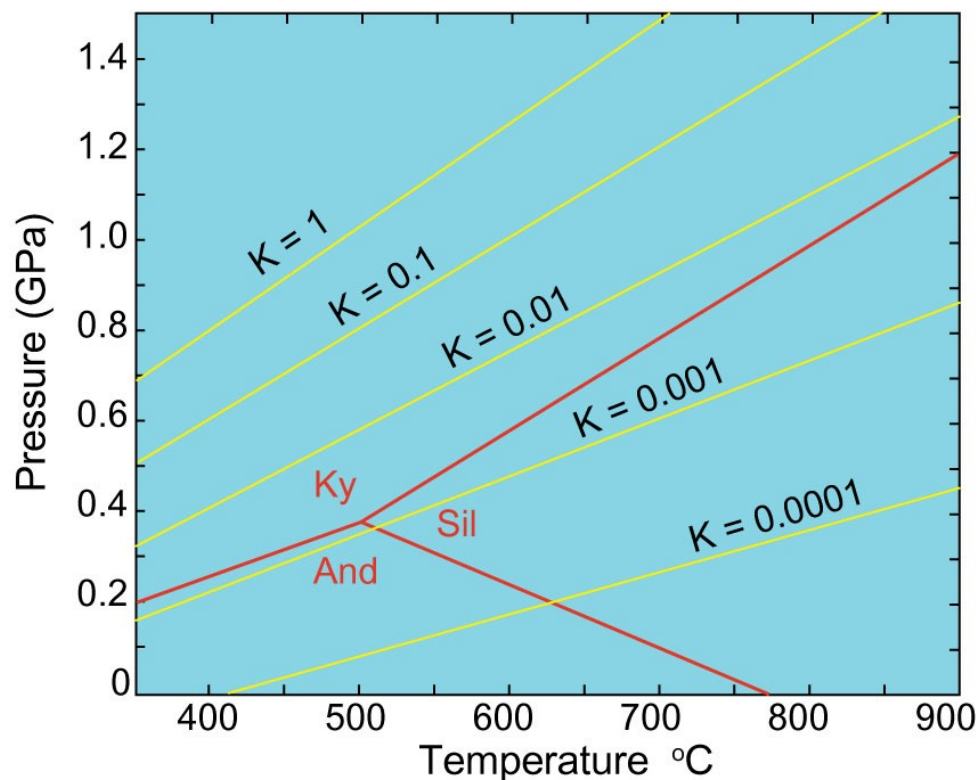
$$\Delta_r G = 0 = \mu_{\text{Grs}} + 2\mu_{\text{Ky}} + \mu_{\text{Qz}} - 3\mu_{\text{An}}$$



Rovnováha GASP v $\text{Na}_2\text{O-CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

$$F = C - P + 2$$

koexistence 4 fází (granát-Ca,Fe, kyanit, křemen, plagioklas-Ca,Na je již možná v rámci di(/tri)variantního pole)



Rovnováha GASP v $\text{Na}_2\text{O-CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

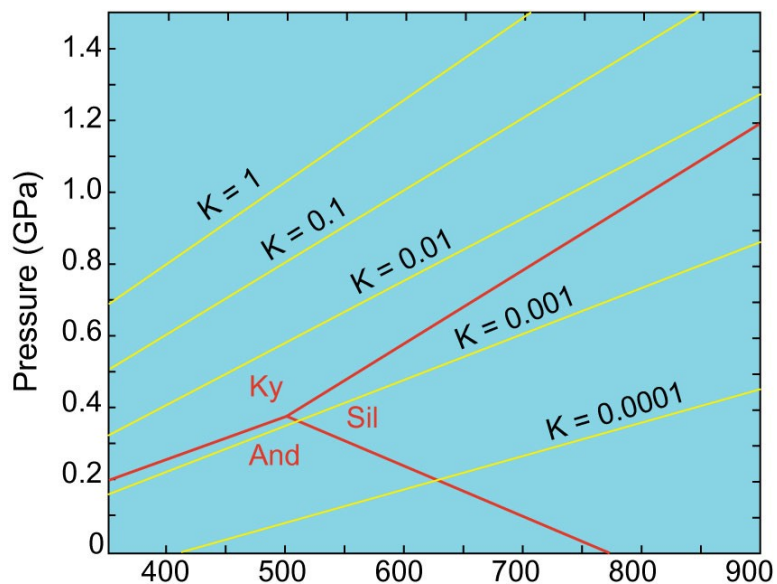
pro rovnováhu stále platí $\Delta_r G = 0$, kde $\Delta_r G = 0 = \mu_{\text{Grs}} + 2\mu_{\text{Ky}} + \mu_{\text{Qz}} - 3\mu_{\text{An}}$

aktivity grossularu a anortitu již nejsou jednotkové:

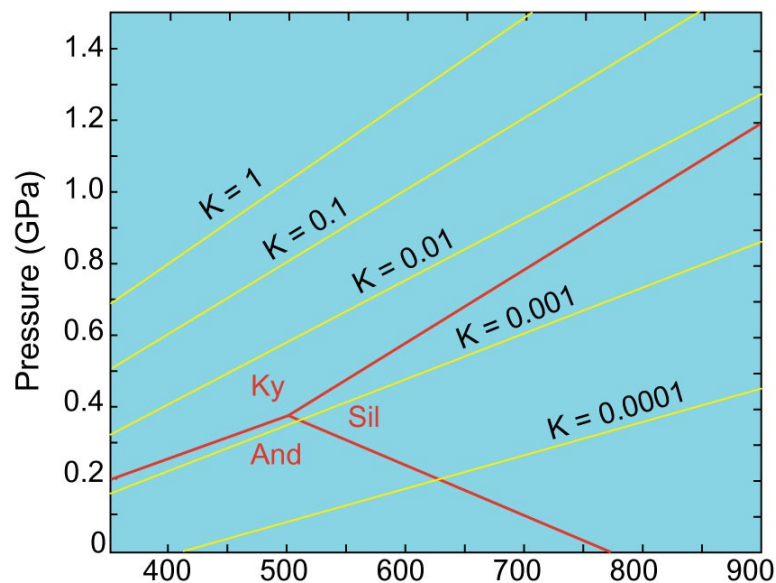
$$\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln K$$

kde hodnota K je dána $a_{\text{Grs}}/(a_{\text{An}})^3$

zjednodušeně tedy distribucí Ca-Al-Si mezi plagioklas a granát



Rovnováha GASP v $\text{Na}_2\text{O-CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$



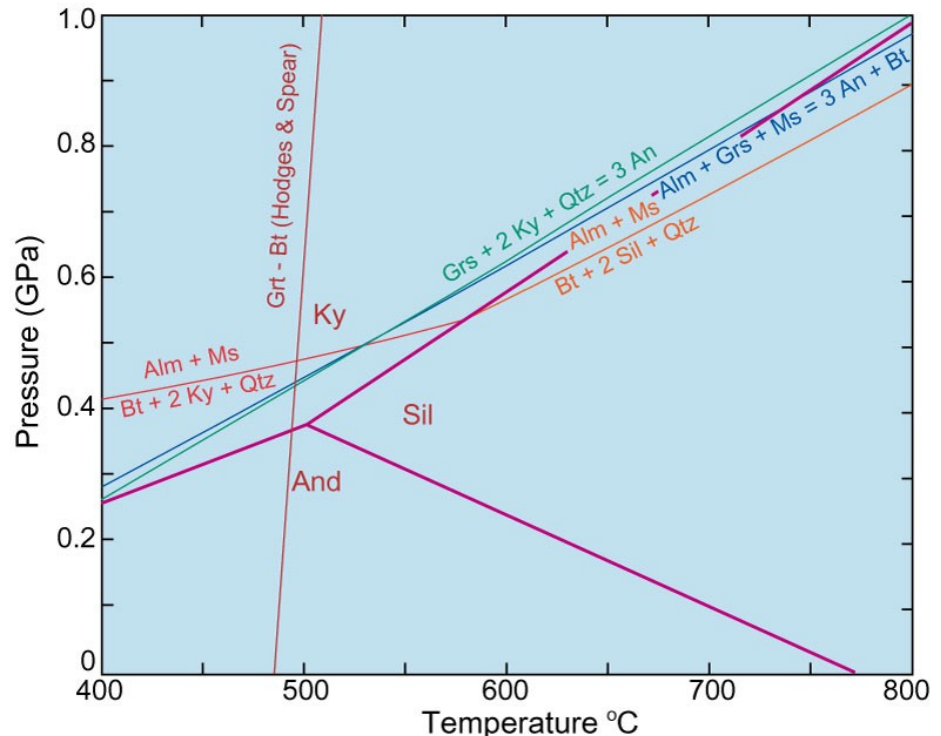
každá hodnota K představuje v P-T diagramu univariantní křivku

P-T podmínky tedy řídí distribuci Ca-Al-Si mezi plagioklas a granát a ze složení plagioklasu a granátu v hornině lze určit polohu pro jejich univariantní rovnováhu v P-T diagramu

Konvenční termobarometrie

Reakce GASP je poměrně citlivá na tlak. Naopak, některé jiné reakce jsou citlivé více na teplotu, typicky např. výměna Mg-Fe mezi granátem a biotitem. Při termobarometrii se kombinují rovnováhy citlivé na tlak* (tzv. barometry) s těmi citlivými na teplotu (termometry). Univariantní rovnováhy spočítané pro rovnovážnou minerální asociaci se ideálně v P-T prostoru protnou v invariantním bodě odpovídajícímu podmínkám ekvilibrace.

- citlivé na tlak jsou reakce s výraznou změnou objemu $\Delta_r V$
- na teplotu jsou naopak reakce s výraznou změnou $\Delta_r S$ a $\Delta_r H$



Konvenční termobarometrie

$\Delta_r G$ lze v termobarometrii vyjádřit pomocí měřitelných veličin:

$$0 = \Delta H_{<T>}^{\circ} - T\Delta S_{<T>}^{\circ} + \Delta V_{298}^{\circ}(P-1) + RT\ln K_X + RT\ln K_Y$$

kde $\Delta_r H$, $\Delta_r S$ (+- $\Delta_r V$) lze pro danou reakci v určitém rozpětí P-T podmínek považovat za konstantní (hodnoty jsou uvedeny u každého termobarometru) a termodynamická aktivita (reprezentovaná v rovnici K_D a K_Y) je vypočtena ze složení minerálů a aktivitního modelu* pro danou fázi

* aktivitní model je matematické vyjádření vztahu mezi koncentrací složky a její aktivitou

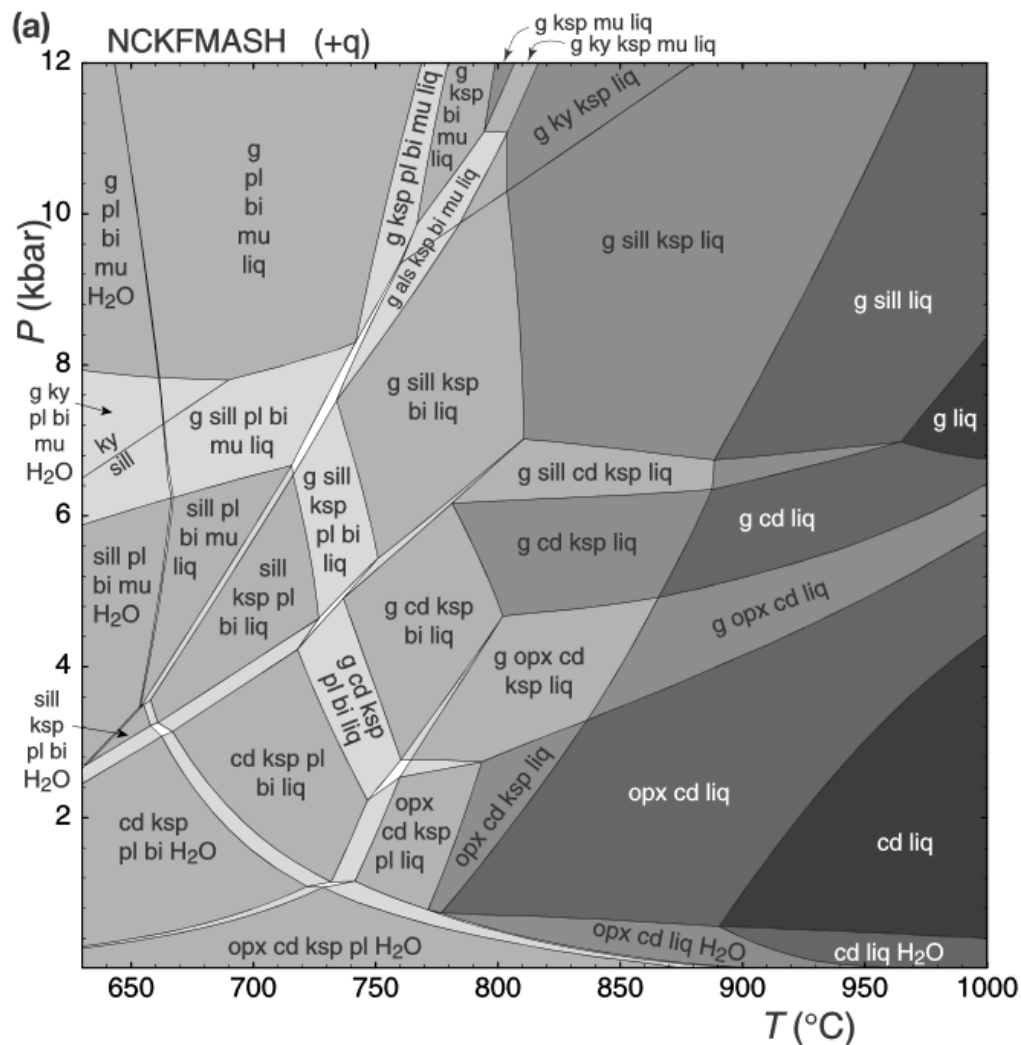
obecné vyjádření rovnovážné konstanty pro reakci $aA + bB = cC + dD$

$$K = \frac{(a_C)^c (a_D)^d}{(a_A)^a (a_B)^b}$$

Termodynamické modelování pseudosekcí

v současné metamorfní petrologii
velmi rozšířená metoda

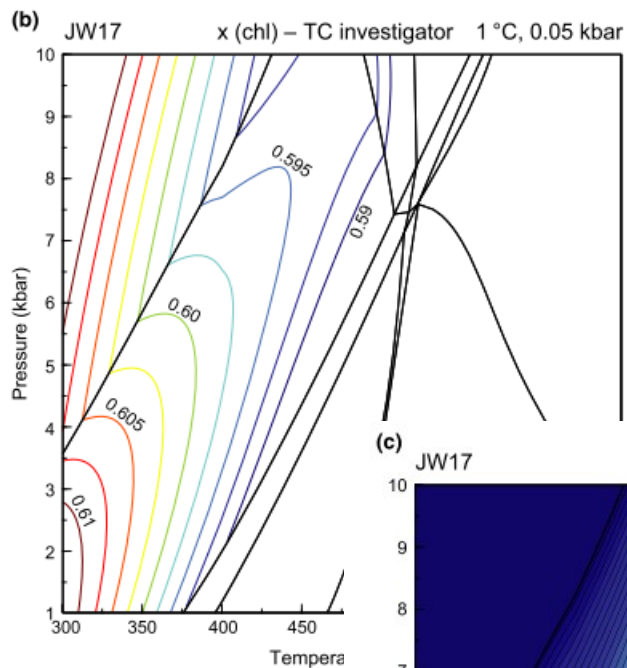
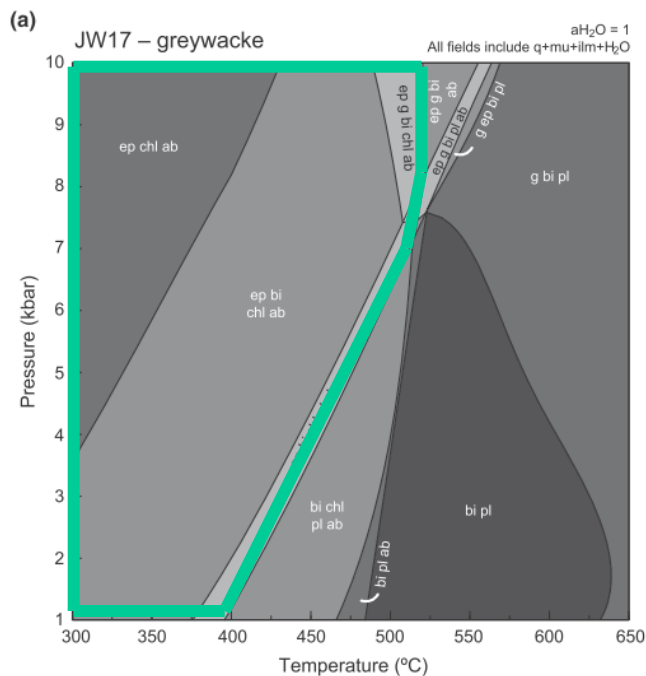
nejčastěji jde o P-T diagram, který
zobrazuje stabilní minerální
asociace pro konstantní složení –
vhodné, pokud probíhá metamorfní
vývoj v uzavřeném systému a mění
se P a T



Termodynamické modelování pseudosekcí

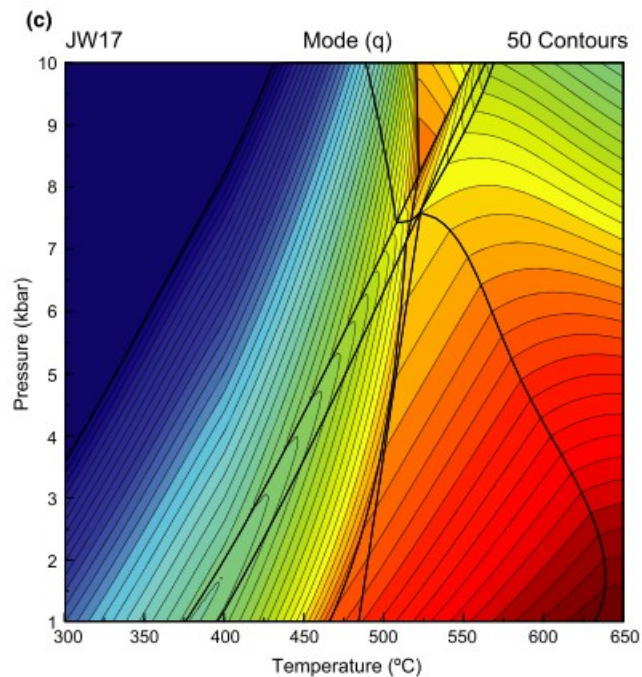
Kvantitativní informace:
modelování izoplet

stabilita chloritu v metadrobě



X_{Fe} v chloritu

mód křemene



Termodynamické modelování pseudosekcí

použití při termobarometrii:

- namodelování pseudosekce pro konkrétní horninové složení
- srovnání pozorované minerální asociace s polohou v modelu
- srovnání kvantitativní (složení pozorované vs modelované)
- eventuelně se nabízí komplementárně využít konvenční termobarometrii
- komplexní studium metamorfního vývoje = MODELOVÁNÍ ZDALEKA NESLOUŽÍ JEN PRO TERMOBAROMETRII!!

Termodynamické modelování pseudosekcí

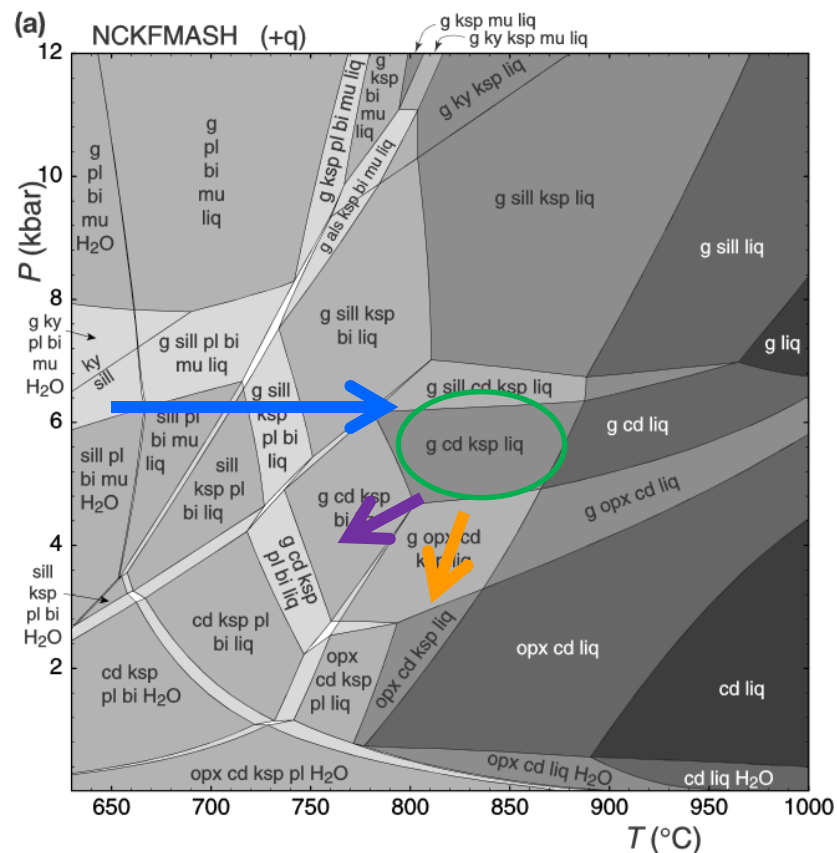
- komplexní studium metamorfního vývoje, metamorfních reakcí =
MODELOVÁNÍ ZDALEKA NESLOUŽÍ JEN PRO TERMOBAROMETRII!!

v hornině se nachází asociace
g+cd+kfs+q

kde se vzaly inkluze silimanitu v
granátu?

granát je nahrazován ortopyroxenem

granát je retrogresován biotitem

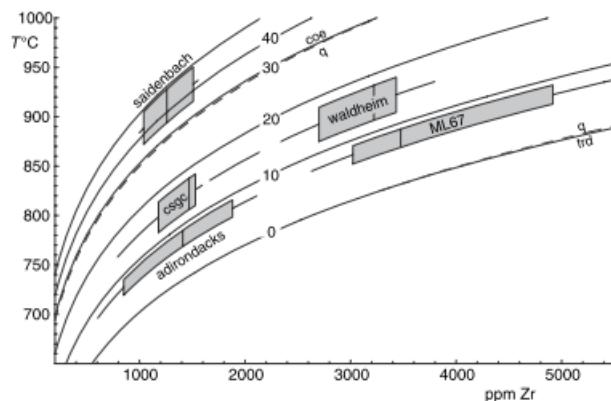


Rozpustnost stopových prvků v (horninotvorných) minerálech

- Zr v rutilu
- Ti v zirkonu
- Ti v křemeni

a další

Zr v rutilu



Tomkins et al., 2007

