

Ústav geologických věd PřF MU, Brno

Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

G8610 Petrologie magmatických a metamorfovaných hornin

Uzavřené *versus* otevřené systémy v geologických procesech

Osnova:

1. Úvod
2. Definice systémů
3. Proces definování systému
4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost systému
5. Mechanismus přenosu látek v otevřených systémech
6. Příklady systémů

1. Úvod

Geologické procesy mohou probíhat v uzavřených nebo v otevřených systémech. Zda se systém chová jako uzavřený nebo otevřený je zásadní otázkou pro interpretaci řady geologických procesů a ne vždy je tomuto problému věnována dostatečná pozornost.

2. Definice systémů (Rieder a Povondra 1997):

Izolovaný systém – je látkově izolován od okolí, a nemůže přijímat nebo uvolňovat energii a nemůže konat práci. Izolované systémy v geologických objektech zřejmě neexistují.

Uzavřený systém – je látkově izolován od okolí, ale může přijímat nebo uvolňovat energii a může konat práci anebo na něm může být vykonána práce jeho okolím.

Otevřený systém – může s okolím vyměňovat energii, ale i některé chemické specie (složky).

V geologické literatuře jsou požadavky na termodynamické definice obvykle respektovány poněkud méně striktně než v experimentálních pracích fyziků a chemiků a řada systémů označovaných v geologii jako uzavřené se ve skutečnosti uzavřenosti jen více či méně blíží.

3. Proces definování systému

Geologické objekty jsou většinou chemicky i texturně poměrně komplikované. Abychom mohli diskutovat otevřenost nebo uzavřenost systémů, musíme si nejdříve definovat systém, k němuž otevřenost nebo uzavřenost vztahujeme. Podobně jako u určení chemického systému hornin (např. KFMASH) a vzhledem ke komplikovanosti těchto systémů to není vždy právě jednoduché. Navíc je důležité, které složky systému sledujeme, systém totiž může být pro některé složky uzavřený a pro jiné otevřený, pak je jako celek otevřený. Z toho je zřejmé, že nás někdy zajímá uzavřenost nebo otevřenost systému jen pro určité složky.

Příklady geologických systémů:

V geologii existuje nespočet možných systémů, které si můžeme definovat, od horninových komplexů v rozměrech km až po mikroskopické inkluze v setinách mm.

a) Granitické pegmatity

Obr. 1. Řez granitickými pegmatity Věžná, Bližná a Nová Ves u Č. Krumlova, uložených v serpentinitech a mramorech

Definování jednotlivých systémů v granitických pegmatitech od objemově velkých až po malé-mikroskopické

- a) horninový komplex s pegmatitovým tělesem
- b) pegmatitové těleso
- c) jednotlivá zóna v rámci pegmatitového tělesa
- d) minerální asociace jako část pegmatitové zóny
- e) zrna minerálu

Obr. 2. Niobový rutil a produkty jeho rozpadu

4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost systému

PT podmínky

Otevřenost systémů obecně roste s rostoucí teplotou, příkladem jsou uzavírací teploty minerálů používaných pro radiometrické datování.

Obr. 3. Uzavírací teploty u minerálů používaných pro radiometrické datování

Časový faktor

Pohyb látek tedy otevřenost systémů se obecně zvyšuje s časem trvání vhodných podmínek. Velmi důležitá je také otevřenost v průběhu času, která může výrazně kolísat.

Medium, které umožní přenos

- Jednotlivé prvky nebo látky se většinou nemohou pohybovat sami, jsou přenášeny v různých komplexech složených hlavně z O a tzv., těkavých látek (F, B, Cl, S, CO₂ aj.)
- Pohyb může probíhat také difúzí kationů uvnitř krystalů jednotlivých minerálů, v tomto případě není nutné žádné medium pro přenos (platí pro mikroskopické systémy).

Prostor, v němž přenos probíhá

Medium, které nese jednotlivé kationy nebo látky, potřebuje volný prostor (póry mezi zrny, trhliny). Je-li hornina extrémně masivní, je výměna látek ztížena, naopak porézní horniny jsou velmi příhodné. Porosita popř. tektonické postižení hraje velmi významnou roli pro otevřenost určitého systému. Permeabilita je důležité pro systémy větších objemů, u mikroskopických systémů je důležitá difúze v minerálech a zde hraje větší úlohu krystalová struktura minerálů.

Krystalová struktura minerálů

Krystalové struktury minerálů obsahují pozice, které mají různou sílu vazby na ně vázaných prvků. Proto mohou obsahovat prvky (látky), které jsou lehce vyměnitelné a tedy i vhodnější pro otevření systému. Nahrazení prvku v jedné pozici může ale vyžadovat změnu i v jiné pozici. Při nepřítomnosti vhodného prvku do této pozice se může výměna zablokovat, ikdyž jsou další podmínky vhodné. To může hrát důležitou roli pro otevřenost systému a také to ukazuje, jak důležité je rozumět mineralogii námi studovaných systémů.

5. Mechanismus přenosu látek v otevřených systémech

- Infiltrace je hlavním mechanismem pro více objemové horninové systémy. Roztoky a fluida s rozpuštěnými látkami cirkulují těmi částmi hornin, kde je vyšší permeabilita (póry, trhliny a jiné oslabené zóny) a reagují s protolitem, a odnáší uvolněné prvky a látky.

- Difúze v horninách je řízena rozdíly v chemických potenciálech a fluida nesoucí prvky jsou stacionární. Difúze je méně častá a méně výkonná.

- Difúze v minerálech, kdy dochází k pohybu atomů v rámci krystalové mřížky. Tento proces je důležitý pro systémy mikroskopické velikosti, při dostatku času a vhodných PT-podmínek, např. v plášti, může být i tento mechanismus důležitý.

Obr. 4. Mechanismu difúze v minerálech.

6. Příklady systémů

6.1. Pegmatitové žíly v serpentinitu a dolomitickém mramoru

Chemická charakteristika granitických pegmatitů a vybraných okolních hornin

	hlavní	vedlejší	stopové	těkavé
pegmatit	Si, Al, K, Na	Li, Be, Fe, Mn, Ca,	Cs,Rb,Nb,Ta,Mg	H ₂ O, B, F, P
serpentinit	Si, Mg,	Fe, Al Ca, Ti,	Cr, Ba, Ni	H ₂ O, CO ₂ , Cl
dolomit	Mg,Ca	Si,Al,Fe		CO ₂ , H ₂ O

Minerály vhodné pro studium

- obsahují v dostatečné koncentraci sledované prvky (Mg, Ca)

- přítomnost v jednotlivých zónách pegmatitu

- téměř neomezená mísitelnost i za nižších teplot

- refraktorní vlastnosti (chemická i mechanická stálost)

turmalíny

$X Y_3 Z_6 (BO_3)_3 T_6 O_{27} (O,OH)_3 (OH,F,O)$

X = Na, Ca (K)

Y = Li, Mg, Fe²⁺, Al (Mn, Zn, Ti, Fe³⁺)

Z = Al (Mg, Fe³⁺)

T = Si (Al)

Stádia vývoje pegmatitů

a) uvolnění pegmatitové taveniny (nízká viskozita, vysoký obsah rozpuštěných těkavých látek H₂O, B, F, P) z mateřského granitu a její intruze na místo krystalizace

- b) krystalizace minerálů z pegmatitové taveniny
- c) krystalizace minerálů z fluid uvolněných ze zbytkové pegmatitové taveniny
- d) tepelná a tlaková ekvibrace pegmatitového tělesa s okolními horninami

Obr. 5. Vývoj chemického složení turmalínů z vybraných pegmatitů (Bližná, Radkovice, Nová Ves)

a) Nejkomplikovanější a zatím jen velmi málo objasněné stádium vývoje. Vzhledem k tomu, že tavenina byla nenasycená na těkavé látky, mohl přenos látek probíhat pouze difúzí v tavenině, popř. mechanickým pohlcením okolních hornin, které pak byly asimilovány. Během tohoto stádia velmi pravděpodobně nevznikaly žádné minerály. Systém se choval jako otevřený.

b) Tavenina byla rychle oddělena od okolních hornin úzkou okrajovou zónou pevné horniny. Výměna látek s okolím byla omezena vznikem této zóny, dále tím, že tavenina nebyla nasyčena těkavými látkami a výměna látek s okolím mohla probíhat pouze difúzí v tavenině, a výměnu omezovala i rychlá krystalizace taveniny. Během tohoto stádia vznikaly téměř všechny minerály, výjimečně téměř 100 %. Systém se choval jako uzavřený.

c) Uvolnění těkavých látek ze zbytkové taveniny umožnilo jejich pohyb do okolních hornin. Pokud byl tlak uvolněných fluid vyšší než v okolních horninách, pohybovala se fluida pouze tímto směrem a vznikla reakční zóna složená z nově tvořených minerálů v okolní hornině na kontaktu. Pokud byl tlak fluid srovnatelný nebo dokonce nižší (pravděpodobně vzácný případ), došlo k míšení fluid a vzniku minerálů, které obsahují prvky uvolněné jak z pegmatitové taveniny, tak z okolní horniny přímo uvnitř pegmatitového tělesa. Během tohoto stádia vznikaly nové minerály, většinou méně než 5 % celkového objemu pegmatitů. Systém se choval jako otevřený.

d) Vyrovnání tlaků a teplot pegmatitového tělesa s okolními horninami vede k tomu, že pegmatit a okolní horniny jsou součástí jednoho systému. Během tohoto stádia vznikaly nové minerály při pozdně hydrotermálních a zvětrávacích procesech. Systém se choval jako otevřený.

6.2. Niobový rutil

Původně homogenní fáze

niobový rutil $(\text{Ti,Nb,Ta,Fe,Mg})\text{O}_2$

se rozpadla na:

rutil TiO_2 s nízkým obsahem Fe,Nb,Ta,

ferrocolumbit $(\text{Fe,Mg,Mn})(\text{Nb,Ta,Ti})_2\text{O}_6$

relikty původního niobového rutilu $(\text{Ti,Nb,Ta,Fe,Mg})\text{O}_2$

Obr. 2. Niobový rutil a produkty jeho rozpadu

Obr. 6. Chemické složení minerálů.

Nakolik se systém choval jako uzavřený/otevřený není zcela jasné. Přítomnost Mg ukazuje na to, že systém musel být při krystalizaci niobového rutilu nebo spíše před ní otevřený.

Závěr

Otevřenost *versus* uzavřenost je důležitá např. pro studium skarnů nebo greisenů (typické otevřené systémy), metamorfních hornin (často uzavřené systémy), granitů a pegmatitů (systémy otevřené i uzavřené), radiometrické datování a izotopická studia (nutnost uzavřeného systému). Zásadním problémem jsou také změny v uzavřenosti resp. otevřenosti daného systému v průběhu času. I když prokázání otevřenosti velmi komplikované, je v řadě případů nezbytné, neboť bez objasnění otevřenosti/uzavřenosti systému mohou být interpretace pochybné.