Ústav geologických věd PřF MU, Brno

Prof. RNDr. Milan Novák,CSc.

G8610 Petrologie magmatických a metamorfovaných hornin

Anatexe

Osnova:

1. Dehydratační tavení
2. Tavení hornin s muskovitem (+křemen)
3. Tavení hornin s biotitem (+křemen)
4. Tavení hornin s amfibolem (±křemen)

Anatexe (tavení) je jedním z nejdůležitějších procesů probíhajících v horninách. Dochází při něm k natavení (popř. úplnému roztavení) hornin různých typů (magmatických, metamorfovaných) s různým chemickým složením (nejčastěji metapelity ale i jiné např. metadroby a amfibolity) v různých úrovních zemské kůry i v plášti. Při segregaci taveniny od protolitu tak vzniká široká škála magmatických hornin, pokud k segregaci nedojde, vznikají migmatity. Důležité je také to, že při tomto procesu dochází k zásadní redistribuci chemických prvků, hlavních i stopových, a tak tento proces zásadně podporuje diferenciaci látek v zemské kůře a zemském plášti.

1. Dehydratační tavení

Pro proces tavení je důležité chemické složení horniny a složení a množství fluidní fáze (H_2O, CO_2, F, B aj.). Protože je v běžných metamorfovaných horninách (amfibolitová facie), v nichž dochází k natavení, množství fluid v hornině nízké, je nutná pro tavení přítomnost minerálu nebo minerálů se zvýšeným obsahem vody, většinou slíd, také amfibolů popř. i jiných minerálů (např. epidot).

Obr. 1-1. PT diagramy pro natavení hornin (Patino Douce a Johnston 1991).

Důležité termíny:

solidus

subsolidus

protolit

leukosom – metatekt

mesosom

melanosom – restit

2. Tavení hornin s muskovitem (+křemen)

horniny: muskovitické ruly a popř. svory, křemen-živcové horniny s muskovitem

Systém: SiO_2-Al_2O_3-K_2O-H_2O

Byla provedena řada experimentů v solidu a subsolidu a vzhledem k relativní jednoduchosti systému, jsou výsledky různých autorů dobře srovnatelné.

Obr. 1-2. PT diagram pro natavení hornin v systému SiO_2-Al_2O_3-K_2O-H_2O (Johannes a Holtz 1996).

důležité reakce:

subsolidus

$Qtz + Msc + Ab = Alkf + Sil + H_2O$

solidus

$Qtz + Msc + Alkf + H_2O = melt$

$Qtz + Sil + Alkf + H_2O = melt$

Petrogenetický význam:

a) Muskovitické granity vznikají v poměrně úzkém poli PT podmínek - 640 °C pro 4 kbar až 700 °C pro 9-10 kbar, pokud není přítomen ve fluidech např. F a B.

b) Horniny s muskovitem produkují jen malé množství taveniny a nemohou být protolitem pro velkoobjemové granitové taveniny, hornina s 25 obj.% muskovitu vyprodukuje max. 11-12 hm.% taveniny složením blízké granitickému minimu.

3. Tavení hornin s biotitem (+křemen)
horniny: různé typy biotitických rul a metadrob
Systém: SiO_2-Al_2O_3-K_2O-MgO-H_2O

Dehydratační tavení metapelitických hornin s biotitem bylo studováno v řadě experimentů a byla jim věnována největší pozornost. Vzhledem k poněkud větší komplikovanosti systému, jsou výsledky experimentů jednotlivých autorů poněkud méně konzistentní než u muskovitických hornin.

Obr. 1-3. PT diagram pro natavení hornin v systému SiO_2-Al_2O_3-K_2O-MgO-H_2O (Johannes a Holtz 1996).

důležité reakce:
subsolidus

Qtz + Phl + Ab = Alkf + Opx + H_2O

solidus

Qtz + Phl + Ab = Alkf + Opx + melt

Qtz + Alkf + H_2O = melt

Bt + Plg 1 Qtz = Kfs + Opx + tavenina + Grt (Crd, Spl)

Obr. 1-4. Diagram teplota versus objemové množství (%) taveniny v metapelitech a křemen-živcových horninách (Johannes a Holtz 1996).

Obr. 1-5. P-T diagram znázorňující počátek tavení, horní limit stability biotitu, spodní limit stability ortopyroxenu a pole stability granátu cordieritu a spinelu (Johannes a Holtz 1996).

.

Petrogenetický význam:

a) Dehydratační tavení biotitu je velmi efektivní pro vznik taveniny především pro velké rozšíření biotitu v horninách zemské kůry.
b) Začátek tavení, množství taveniny a její složení jsou závislé na složení protolitu (např. obsah Na_2O, CaO, poměr Fe/Mg) V metapelitu může vznikat 30-60 % taveniny při teplotě 800-900 °C a tlaku asi 7 kbar, metadroby vyžadují pro efektivní tavení asi o 100 ° vyšší teploty.
c) Vyšší obsahy F, Ti a Al zvyšují pole stability biotitu do vyšších teplot a snižují množství taveniny.
d) Granát, ortopyroxen, cordierit a spinel jsou typické produkty natavení a tak vznikají Al bohaté granulity, popř. Al-přesycené restity.

4. Tavení hornin s amfibolem (±křemen)

horniny: amfibolity, různé typy metabazitů

Systém: SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-MgO-FeO-H_2O

Byla provedena řada experimentů, ale jejich interpretace nejsou jednoduché vzhledem ke komplikovanosti systémy ve srovnání s horninami s muskovitem i biotitem.

důležité reakce:

solidus

Amf + Plg + Qtz = Cpx + Opx + Plg (vyšší An) + tavenina + Ilm

Amf + Plg = Cpx + Opx + Plg (vyšší An) + tavenina + Ilm

Petrogenetický význam:

a) Dehydratační tavení amfibolitů začíná za nižšího tlaku, pod 10 kbar za teplot kolem 850 °C, pro vyšší tlaky i kolem 650 °C. Složení taveniny je relativně chudé Fe, Mg a Ca ve srovnání s tonality, teprve za teplot vyšších než 900 °C vznikají tonalitové taveniny.
b) Restity mají složení granátických granulitů, amfibolitů nebo pyroxenických granulitů za nižších tlaků.
c) SiO_2, K_2O a Na_2O jsou v tavenině vyšší než v protolitu, Ca, Fe a Mg se koncentrují v restitu.
d) Tonalitové magma může vznikat natavením amfibolitů.

3. Migmatity

Horniny, u nichž nedošlo k segregaci taveniny od restitu a které svým vznikem leží mezi metamorfovaným a magmatickými horninami. Podle textury, která je úzce svázána z množstvím vyprodukované taveniny je dělíme na:
oftalmity
stromatity
agmatity
nebulity
a řada dalších typů založených na texturních vztazích

Obr. 2-1. Schematický nákres jednotlivých texturních typů migmatitů.

Existují také migmatity injekční, tj. tavenina nebyla vytavena z okolní horniny ale přinesena z okolí a intrudovala podle reologicky oslabených zón do protolitu. Rozlišení obou typů může být velmi komplikované.

2. Segregace taveniny od restitu

Mechanismus segregace (oddělení) taveniny od restitu není dosud spolehlivě vysvětlen, i když jde o velmi důležitý proces v geologii. Pravděpodobně dochází k vytlačování taveniny do prostoru nižšího napětí (filter pressing).

RCMP (Rheological critical melt percentage) – množství taveniny, které vede ke zborcení horniny (kostry taveniny a restitu) a k následnému uvolnění taveniny.

Obr. 2-2. Závislost mechanické rezistence horniny na množství taveniny.

3. Chemické složení taveniny a produktivita tavení

Experimentální práce především v systémech blízkých metapelitům popř. metadrobám prokazují závislost množství vyprodukované taveniny na chemickém (mineralogickém)

složení protolitu a teplotě tavení. Vzhledem ke složitosti systému a poněkud rozdílných experimentálních přístupech nejsou výsledky publikovaných prací zcela konsistentní, níže uvedené závěry jsou ale společné většině prací.

Granitické taveniny vznikají podle zjednodušených rovnic:

Bt + Plg + Als + Qtz = Grt + tavenina
Bt + Plg + Als + Qtz = Cor + tavenina
Als + Grt = Spi + Qtz + tavenina

Tab. 2-1. Modální složení experimentálních produktů (Patino Douce a Johnston 1991).

Tab. 2-2. Chemické složení skla (Patino Douce a Johnston 1991).

Obr. 2-3. Produktivita tavení (Patino Douce a Johnston 1991).

Obr. 2-4. NKM diagram složení skla (Patino Douce a Johnston 1991).

Obr. 2-5. Variace v chemickém složení skla (Patino Douce a Johnston 1991).

Petrogenetický význam:

a) Muskovit a plagioklas se taví za relativně nižších teplot (pod 800 °C), produktivita tavení je ale nízká, do zhruba 10 %, protože i obsah obou minerálů v protolitech, především muskovitu, je poměrně nízký.
b) Biotit je zřejmě nejdůležitějším minerálem pro produkci taveniny.
c) Taveniny mají granitické složení, se zvyšováním teploty tavení se zvyšuje produkce taveniny a postupně mění také její chemické složení. V tavenině se vzrůstem teploty tavení přibývá Fe, Mg, Al a Ti, zvyšuje se poměr K/Na, tento nárůst ale není zcela pravidelný. Někdy se mění postupně, jindy téměř skokem.

4. Chemické a mineralogické složení restitů

Srovnáním chemického složení protolitu (např. metapelitu) a granitů (naše tavenina nebo sklo) je zřejmé, že restit je při tavení neustále obohacován na Al, Ti, Mg a Fe, klesá ale poměr Fe/Mg. Zároveň se mění mineralogické složení restitů, přibývá granátu, alumosilikátů (sillimanit, kyanit), oxidů Ti (rutil, ilmenit), v počátku přibývá také biotitu (s vysokým obsahem Ti) při vysokých teplotách se objevuje spinel (hercynit). Postupně se mění také chemické složení minerálů v restitu.

Obr. 2-6. Variace v modálním složení restitu (Patino Douce a Johnston 1991).

Obr. 2-7. Variace v chemickém složení biotitu (Patino Douce a Johnston 1991).

Petrogenetický význam:

a) Složení restitů se mění v závislosti na složení protolitu a především na množství vytavené a segregované taveniny. Obecně jsou restity horniny bohaté Al, Fe, Mg a Ti, naopak ubývá H_2O, složené hlavně z granátu, alumosilikátu (nejčastěji sillimanitu), rutilu a při vysokých teplotách také hercynitu. Bývá přítomen biotit, cordierit, popř. další minerály (safirín).
b) Restity patří mezi vzácné horniny, i když je jasné, že vzhledem k množství granitických hornin v zemské kůře musí být poměrně hojné. K restitům se řadí Al-bohaté granulitické horniny a jiné granátem bohaté horniny.
c) Rozpoznávání restitů v přírodě je velmi komplikované. Především proto, že při retrográdních reakcích, je-li dostatek vody popř. alkálií hlavně K, dochází k tzv. back reakcím a v restitu se zpětně objevují minerály s OH hlavně biotit.