

Shrnutí

Magmatické procesy představují hlavní činitele podílející se na diferenciaci zemské kůry. Navzdory velkému množství geochemických dat a vysokému stupni porozumění geochemii magmatických hornin, zůstává fyzikální podstata vzniku, diferenciaci a krystalizace magmatu do značné míry neobjasněna. Široká variabilita textur magmatických hornin nicméně poskytuje citlivý záznam fyzikálně chemických procesů a vývoje intenzivních proměnných během krystalizace. V této práci se zabývám vývojem kvantitativních metod pro přímé modelování magmatických textur a jejich interpretaci na základě hlavních činitelů – rychlosti růstu a nukleace. Současně jsou výsledky využity pro interpretaci krystalizační historie smrčinského granitového batolitu.

Je vyvinut a implementován nový třírozměrný numerický model pro simulaci krystalizace pevné fáze z jednosložkové taveniny, která probíhá mechanismy homogenní a heterogenní nukleace a růstu zrn. Simulované textury jsou následně charakterizovány pomocí distribuce velikostí zrn, prostorových distribučních funkcí a kontaktních vztahů. Nový model umožňuje provádět simulace velké oblasti taveniny ve vysokém rozlišení, což poskytuje vysokou míru statistické reprodukovatelnosti vypočtených dat.

Naše simulace prováděné pro různé funkční závislosti rychlosti nukleace a růstu na čase ukazují že (i) na krátkých vzdálenostech jsou zrna obklopena menším počtem okolních zrn, než by odpovídalo jejich náhodnému rozmístění. To je důsledkem skutečnosti, že v okamžiku nukleace libovolného zrna mají starší krystaly již konečnou velikost a nukleace tak nemůže probíhat v oblasti, kde již existuje pevná fáze; (ii) vysoké osní poměry krystalů ve 2D řezech, odpovídající silně protaženým zrnům, jsou exponenciálně méně časté, než více izometrické řezy. Větší anizometrie je přitom typická pro menší, a tedy mladší a intersticiální zrna. Přesný tvar distribuce osních poměrů není příliš citlivý na historii nukleační a růstové rychlosti; (iii) lineární distribuce velikostí zrn, odpovídající přírodním vzorkům, mohou vzniknout působením různých párů rychlostí nukleace a růstu, mezi jinými konstantní rychlostí růstu a exponenciálně rostoucí rychlostí nukleace; (iv) „zvonovitý“ tvar křivek rychlostí nukleace a růstu, popsáný Gaussovou funkcí, vede k lineární distribuci velikostí zrn pouze, pokud maximum rychlosti růstu předchází maximum rychlosti nukleace. Roste-li vzájemný posun obou rychlostních funkcí, zlepšuje se přímota výsledné distribuce velikostí

zrn a současně se zkracuje interval, kdy může efektivně probíhat krystalizace. To v extrémním případě vede k zastavení nárůstu krystalinity a vzniku hemikrystalických textur, když rychlost růstu poklesne na velmi nízké hodnoty dříve, než rychlost nukleace začne výrazně stoupat. Ze „zvonovitých“ rychlostních funkcí tak vedou k realistickým texturám pouze ty s vysokým vzájemným posunem obou maxim, a tedy s tendencí k neúplnému vykrytalování. Proto předpokládáme, že pokud „zvonovité“ rychlostní funkce představují přijatelný model krystalizačního vývoje, je tomu tak v případě rychle chladnoucí těles, kde reprezentují nárůst rychlostí spojený s rostoucím podchlazením pod likvidus a následné zablokování kinetických procesů s klesající teplotou; (v) mezi kontaktními charakteristikami existují minimálně dva skalární parametry, jejichž hodnota je invariantní a nezávislá na historii nukleační a růstové rychlosti. Tyto parametry jsou sklon závislosti průměrné vzdálenosti sousedního zrna na jeho velikosti a extrapolovaný průměrný počet sousedů zrna s nulovou velikostí. V budoucích aplikacích mohou být hodnoty invariantních parametrů použity k rozpoznání efektu heterogenní nukleace nebo míry mechanické agregace krystalů v tavenině; (vi) různé páry rychlostí nukleace a růstu mohou vést k textuře s identickou distribucí velikostí zrn. Na základě provedených simulací předpokládáme, že textury s totožnou distribucí velikostí zrn se shodují i v ostatních kvantitativních charakteristikách. To naznačuje, že distribuce velikostí zrn poskytuje kompletní charakteristiku textury vzniklé homogenní nukleací a růstem krystalů, a současně znemožňuje zpětné určení obou rychlostních funkcí pouze na základě studia texturních parametrů.

Časový vývoj rychlostí nukleace a růstu lze určit na základě texturních charakteristik jednoznačně pouze s využitím dodatečných podmínek. V této práci volíme jako dodatečný parametr časový vývoj krystalinity a odvozujeme matematický aparát pro výpočet obou rychlostí. Výpočty provedené pro různé kvazilineární závislosti krystalinity na čase ukazují, že (i) rychlost nukleace nelineárně roste s časem; (ii) na začátku a na konci krystalizace nabývá růstová rychlost velmi vysokých hodnot. Tento jev je důsledkem malé plochy rozhraní taveniny a pevné fáze při nízkém i vysokém stupni vykrytalování. Na malé ploše rozhraní musí růstová rychlost nabývat vysokých hodnot, aby vykrytalovaný objem narůstal podle libovolného kvazilineárního trendu; (iii) ve středních hodnotách krystalinity, tj. při maximálním povrchu fázového rozhraní, nabývá rychlost růstu minimálních hodnot a systém se nachází nejbliže termodynamické rovnováže.

S použitím relevantních termálních modelů konduktivního chladnutí a s omezením krystalizačního intervalu teplotou likvidu, resp. solidu, je možné hodnoty rychlosti růstu pro případ krystalizace blízko rovnováhy přepočítat do reálných jednotek. Z jednorozměrného modelu chladnutí hluboce uloženého deskovitého tělesa (žíly) vyplývá, že rychlost růstu závisí nepřímou úměrou na mocnosti tělesa a nelineárně narůstá od jeho středu směrem

k okraji. Rychlost růstu dále závisí na sklonu distribuce velikostí zrn; strmějším sklonům odpovídají nižší rychlosti růstu. Pro podmínky charakteristické pro lávová jezírka na Havaji náš přepočít poskytuje rychlosti v řádu 10^{-11} cm s⁻¹, což je ve velmi dobré shodě s pozorováními. Znalost rychlosti růstu umožňuje určit růstový čas zrna libovolné velikosti. V případě log-lineárních velikostních distribucí klesá růstový čas zrn náležejících k objemově nejvýznamnější frakci z 1/10 charakteristického času chladnutí tělesa v jeho středu na 1/400 v blízkosti okraje. Relativní růstový čas, v poměru k charakteristickému času chladnutí tělesa, tak záleží pouze na poloze uvnitř tělesa a nezáleží na jeho mocnosti ani na sklonu distribuce. Na základě růstové rychlosti a růstového času je možné určit vzdálenost, o kterou se krystal přemístí v tavenině v důsledku působení gravitačních sil. Tato vzdálenost roste s druhou mocninou velikosti tělesa, což implikuje větší vliv gravitační diferenciace ve velkých rezervoárech. V tělesech kilometrové mocnosti může docházet ke klesání krystalů napříč jejich polovinou dokonce při viskozitách taveniny v řádu 10^9 Pa s.

Pro aplikaci metod kvantitativní texturní analýzy na krystalizaci magmatických hornin jsme zvolili granitový batolit Smrčiny/Fichtelgebirge (Česká republika/Bavorsko). Smrčinský granitový batolit je charakteristický širokou variabilitou horninových textur, sahajících od hrubozrnných porfyrických až k jemnozrnným porfyrickým i stejnoměrně zrnitým typům. Texturní variabilita a současně dobrá geologická prozkoumanost smrčinského granitového batolitu ho staví to role ideálního testovacího objektu k pilotní aplikaci metod kvantitativní texturní analýzy na kyselé plutonické horniny. Analýza šesti vzorků z různých intruzivních jednotek a texturních typů smrčinského batolitu a jejich srovnání s výsledky numerických simulací ukazuje na výrazný vliv procesů způsobujících shlukování zrn v přírodních magmatických podmínkách. Doklady pro shlukování zrn pocházejí ze studia prostorových distribučních funkcí i kontaktních charakteristik. Intenzita shlukování je nejvyšší pro páry zrn příslušející téže fázi a relativně nižší pro krystaly různých minerálních fází. Příčinou shlukování zrn ve studovaných vzorcích může být mj. heterogenní nukleace nebo mechanická agregace, např. během gravitačního pohybu zrn taveninou. Ve prospěch mechanické hypotézy o původu shlukování svědčí i jeho relativně nízký stupeň ve vzorku, který představuje stropní facii porfyrického granitu Weißenstadt-Marktleuthen.

Studium distribucí velikostí zrn křemene, plagioklasu, draselného živce, muskovitu a biotitu ukazuje na konvexní charakter většiny křivek. Výjimečné jsou přímé log-lineární distribuce velikostí zrn všech fází ve vzorku ze stropní facie granitu Weißenstadt-Marktleuthen, které svědčí o jeho jednoduché krystalizační historii. V některých konvexních distribucích velikostí zrn lze více či méně jasně vyčlenit dva přímější segmenty, lišící se sklonem a definující hrubozrnnější a jemnozrnnější populaci krystalů. Tento tvar distribuce velikostí zrn může odrážet mechanické míšení dvou populací krystalů. Ve studovaných

případech tvoří ale hrubozrnější populace až 90 % objemu horniny, což vylučuje možnost mechanického míšení dvou suspenzí. Většina konvexních distribucí velikostí zrn, ať již s náhlou nebo pozvolnou změnou sklonu, se vyznačuje podobným sklonem v oboru nejmenších velikostí, tedy u populace zrn pocházející ze závěru krystalizace. To svědčí o podobném konečném krystalizačním vývoji studovaných vzorků, řízeným pravděpodobně specifickým vývojem intenzivních parametrů, který je ale univerzálně platný napříč jednotlivými magmatickými pulzy.

V předložené práci byl navržen a implementován třírozměrný numerický model krystalizace taveniny. Model poskytuje kvantitativní charakteristiky simulovaných textur, umožňující přímé srovnání s přírodními vzorky a zpětné určení procesů a podmínek řídících jejich krystalizaci. Z našich výsledků vyplývá, že monotónní vývoj rychlostí nukleace a růstu během krystalizace vede ke zpožděnému nárůstu krystalinity a k výrazné odchylce od rovnovážných trendů. Aplikace numerických modelů na přírodní textury svědčí o vlivu heterogenní nukleace a mechanického pohybu zrn taveninou na jejich agregaci během krystalizace granitových magmat. Distribuce velikostí zrn z různých texturních typů ze studované suity granitů ukazují na společný vývoj krystalizačních podmínek v závěru solidifikace, který je přímým odrazem společného vývoje intenzivních parametrů. Numerické přístupy pomocí dopředného a inverzního modelování magmatické krystalizace, spolu s testováním modelů na přírodních datech, tak umožňují iteračním způsobem zpřesňovat a prohlubovat naše porozumění procesům krystalizace magmatu v zemské kůře.