

SÚHRNNÝ REFERÁT

Granitový problém v díle W. S. Pitchera a jeho spolupracovníků

MARIE PALIVCOVÁ

Ústav geologie a geotechniky ČSAV, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8-Libeň

(2 tab. v textu)

Doručené 11. 1. 1984

Гранитовые проблемы в работе В. С. Питчера и его сотрудников.

Показаны настоящие взгляды касающиеся особенностей и формирования, именно внедрения гранитоидных тел, в смысле статьи и предложений В. С. Питчера. Подчеркнуты преимущественно противоположные вопросы — напр. вопрос физического состояния гранитных магм, их подвижности, длительности плутонического магматизма, линейamentного контроля интрузий и др. — которые обсуждаются в этой высокооцениваемой статье. Показана также и в краткости обсуждена схема автора батолитовых интрузий в различных орогенных условиях.

The granite problem in the work of W. S. Pitcher

The recent state of ideas concerning the nature and formation, especially the emplacement of granitic bodies according to Pitcher's summarizing paper and his recommendations is informatively presented. Controversial questions in this highly appreciated paper — such as physical state of granitic magmas, their mobility, duration of plutonic magmatism, lineamental control of intrusions etc. — are emphasized. The author's scheme of batholithic emplacement in different orogenic environment is shown and shortly discussed.

Opět jako ve čtyřicátých až padesátých letech se v osmdesátých letech vytváří významné centrum západní granitologie ve Velké Británii. Předním představitelem současné granitologie se stal W. S. Pitcher, v současné době profesor liverpoolské univerzity, zamlada spolupracovník H. H. Read. Podobně jako Read je představitelem školy, zakládající své představy a úvahy

v první řadě na rozsáhlých petrologicko-geologických výzkumech. Východiskem jeho syntetizujících úvah jsou bohaté zkušenosti jednak z kaledonských masívů skotsko-irských, jednak z mezozoických batolitů západoamerických.

Tyto zkušenosti Pitcher tedy získal z oblastí dvou základních rozdílných způsobů výskytu granitoidních masívů ve

fanerozoických orogenních pásmech zemské kůry: v kaledonské oblasti vystupují granity v nevelkých, většinou rozptýlených masívech (v novější Pitcherově klasifikaci převážně v podobě plutonů), v západoamerickém pobřeží naopak vytvářejí složité, souvislé, převážně mezozoické batolity, rozkládající se na velké vzdálenosti v zóně planetárního rozsahu.

Způsob, jakým autoři (Pitcher-Berger 1972) nově zpracovali klasické granity irského Donegalu — jeden z předmětů sporů v době Reada a Reynoldsové —, je vynikajícím příkladem moderní granitologické studie. Na příkladě donegalského masívu ukázali autoři (na podkladě výsledků celého kolektivu pod Pitcherovým vedením) geologickou pozici a jeho geologickou stavbu z několika dílčích intruzí a podrobně se zabývali jejich časovými vztahy, tvarem, mechanismem, povahou a podmínkami vzniku.

Během studia této kaledonské oblasti si Pitcher ujasnil, že klíčem pro výzkum granitologických problémů zůstávají — tak jako v době Cloosové — rozsáhlé komplexy granitoidních hornin západoamerického pobřeží, a přesunul zájem svůj i svých spolupracovníků na oblast peruánského batolitu (Cobbing — Pitcher 1972, Pitcher 1974, Bussel 1976, Bussel — Pitcher — Wilson 1976, Pitcher — Bussel 1977, aj.). Především tento batolit a dále pak blízké seznámení s rozsáhlými výzkumy celého západoamerického pobřeží od severního až k jižnímu pólu se staly základem řady prací o obecných problémech vzniku batolitu, zejména z hlediska tvaru, způsobu a mechanismu intruze (1975, 1978). Své představy pak Pitcher shrnul v obsáhlém prezidentském referátu londýnské geologické společnosti (1978) o povaze, výstupu a umístění granitických magmat. Uveřejněný referát (Pitcher 1979) představuje nový krok ve výzkumu granitového problému a řadí se k té početné

řadě děl (jsou jich desítky) s názvy jako „současný stav granitového problému“ či „původ granitu“. Uvedené dílo zasluhuje proto — obdobně jako dílo H. S. Yodera (1979) na poli petrologickém (srv. recenzi v Čas. mineral. geol., 29, s. 235) k současnému stavu experimentálního výzkumu vyvřelých hornin — hlubší informaci a analýzu.

Výsledkem Pitcherovy stati je pokus o geologickou klasifikaci granitoidů v orogenních podmínkách. Avšak základní poučení z této autorovy syntetizující stati lze shrnout i jinak: mylí se ti, kdo se domnívají, že granitový problém je Readovým výrokem („granity a granity“), tj. polygenní interpretací granitických hornin, vyřešen. Ačkoli Pitcher sám je rovněž zastáncem polygenního vzniku granitů, ačkoli se opírá zhruba o 350 vybraných nejvýznamnějších citací, převážně z posledních desetiletí (sovětská a vůbec východní literatura je využita minimálně), zůstávají základní problémy stejně sporné a se stejnými otazníky, jaké si kladli badatelé v padesátých letech i dříve. Závažnost Pitcherova díla vidím především v tom, že autor otazníky a paradoxy nezakrývá, naopak upozorňuje na ně. V tom lze jeho stať, přestože menšího rozsahu (ale hutného obsahu), srovnávat s dílem Raguinovým (1965). Je stejně podnětná a udivuje schopností formulovat protiklady. Je zřejmé, že granitologové, vycházející z rozsáhlých geologických zkušeností, jsou podstatně kritičtější a v závěrech opatrnější než experimentálně orientovaní petrologové, jejichž závěry jsou často příliš kategorické.

Základní problémy orogenních granitů

Vyjmenujme např. základní problémy, jimiž se Pitcher zabývá v diskutované syntéze o orogenních granitech: tvary

granitových plutonů (jejich nomenklatura, geologické tvary, modelování), problém fyzikálního stavu magmatu (granity jako roztoky, krystalová kaše, tufizity, vliv vody na krystalizaci, reologické vlastnosti magmatu, mobilita a viskozita a jejich vliv na geologickou stavbu těles), trvání plutonického magmatismu (dlouhodobost plutonismu, epizodický plutonismus), způsob segregace a intruze granitového magmatu (granity jako korové přetaveniny, příčiny zdvihu, hloubka a způsoby „vmístnění“ granitů; násilná či povolná* intruze granitového magmatu, problém kalder a diapirů), význam orogenního prostředí (dvě látkově řady granitických hornin, batolitový model pro orogenní asociace). Téměř všechny tyto problémy, včetně takové otázky, zda při vzniku batolitů panuje tlaková či tahová tektonika (srv. str. 632), zůstávají ve své podstatě na poli sporných hypotéz, často i silně kontrastních. Není však nutné upadat do skepse či agnosticismu: z Pitcherovy práce je evidentní, že milníky na cestě granitologického výzkumu — stejně jako v petrologii obecně — se stávají ty masívy nebo oblasti, které jsou důkladně zpracovány jak látkově, tak i geologicky. Peruánský batolit či donegalské granity se takovými příklady stávají.

V úvodní kapitole diskutované stati se tedy Pitcher v zásadě přiklání k Readově sentenci, že granity jsou nejednotného vzniku, a proto historie jejich vývoje nemůže být jednotná. Dvěma hlavními skupinám, granitům v anorogenním a orogenním kontextu, přičítá Pitcher různé způsoby vzniku: anorogenní granity vznikají buď diferenciací bazického magmatu, nebo natavením korového materiálu bazickým magmatem, orogenní vznikají úplným nebo částečným přetavením zemského pláště nebo spodní kůry, nebo jako konečné produkty metamorfismu. Už k tomuto Pitcherovu základnímu genetickému

členění lze poznamenat, že má evidentně četná úskalí; jednak není snadné tyto různé genetické typy rozlišit (kromě geologických kritérií se úvahy opírají hlavně o geochemii stopových prvků a izotopů, která v tomto kontextu není dosud dostatečně propracována), jednak lze najít mnohé příklady i opačného charakteru, např. magmaticko-diferenční interpretaci v orogenních podmínkách či metamorfni v anorogenních. Magmatické a metamorfni granity pak autor rozlišuje podle formy geologického výskytu. Je nepravděpodobné, že by metamorfni granity mohly vznikat in situ jinak než v souladu s okolními metamorfity (harmonické granity), zatímco disharmonické granity (massifs circonscrits ve smyslu Raguinově) představují spíše intruzi magmatu, ať je jeho původ jakýkoli. Avšak (str. 628) „dosud je velmi málo konkrétních znalostí o reologii krystalických magmat** granitového složení; obecně se předpokládá, že tato magmata mají speciální vlastnosti viskozity, které je staví stranou od ostatních tavenin“. Už z úvodních poznámek tedy vyplývá, že jeden ze základních problémů granitologie — problém fyzikálního stavu magmatu — zůstává na úrovni, která byla hlavní příčinou sporů padesátých let. Za zmínku stojí Pitcherovo hodnocení prací sovětských autorů; došli podle něho nejdále v poznání ekonomického významu Readova výroku, tedy poznání různého typu granitů ve vztahu k metalogenezi.

* Termínem „vmístnění“ je překládán pojem „emplacement“; termíny „forcefull“ a „permissive“ intrusion jsou překládány jako „násilná“ a „povolná“ (permisivní) intruze.

** Termín „krystalické magma“ odpovídá Pitcherovu „crystal-bearing magma“; z dalšího je patrné, že autor uvažuje až o 50 % i více pevné fáze.

Tvary granitických teles

Pokud jde o tvary granitických těles, zabývá se Pitcher definicí plutonu a batolitu a shrnuje dosavadní znalosti o modelování těchto tvarů. Doporučuje redefinovat příliš širokou Cloosovu definici plutonu (tj. „rozsáhlé těleso granitických hornin“ v původní definici) jako „těleso magmatu nebo příbuzných magmat, která se tvořila v zásadě synchronně v rámci jediného kontaktu“. Je si však vědom určitých nesnází, protože mnohé takto definované plutony jsou složité, vícefázové, tvořené opakovanými „pulzy“ (tj. proudy magmatu z hloubky), nebo náhlými vzešty (surges — tj. diferenciálními proudy magmat rozličné mobility v rámci téhož magmatického krbu). Termín „peň“ doporučuje autor omezit jen na diskordantní vertikální tělesa cylindrického tvaru, podle Dalyho v průměru maximálně 15 km; velikost pňů je totiž omezena určitým objemem jednoho pulsu. Také plutony se zdají být limitovány co do velikosti v závislosti na petrografickém složení a geologickém prostředí. Například tonalitové plutony v cirkumpacifických batolitech, tvořené několika magmatickými pulsy, dosahují až 1000 km²; jednotlivé pulsy tonalitového magmatu však zřídka přesahují 300 km². Průměrné velikosti plutonů intermediárních granitoidů jsou kolem 150 km², pravekých granitů kolem 80 km².

Batolit je definován jako „shluk plutonů“ (str. 629), uspořádaných často lineárně a nahromaděných jako důsledek určitého řídicího strukturního vlivu* (overriding structural control) na tvorbu magmatu a jeho intruze. Taková definice umožňuje podle Pitchera řešit mnohé záhady vzniku batolitů, jako hloubkový dosah, dobu trvání, vystupování podle oslabených preexistujících tektonických linií, a i problém prostoru je snáze pochopitelný. Příklady

batolitů jsou např. vpředu zmíněný donegalský batolit, tvořený osmi samostatnými plutony, a zejména pak složité batolity kordillerského typu, tvořené celou řadou plutonů. Přitom je třeba rozlišovat mezi strukturou batolitu a typem magmatu; typů magmatu (tzv. superjednotky, série, suity, sekvence podle různých autorů) může být například méně než plutonů.

Značně složitým problémem zůstávají *vlastní geologické tvary těles*, zejména jejich spodních částí, a jejich mocnosti. Plutony mohou mít všechny možné tvary, ale víceméně okrouhlé jsou nejčastější. Tvary závisí podle Pitchera v první řadě na rozdílech ve vodivosti magmatu a okolí. V pozdně tektonických vysoce korových silně rozlámáných režimech jsou magmata obvykle „vmísťována“ hydrostaticky (mělké) batolity podle Dalyho; kontakty plutonů jsou pak určovány zlomovou tektonikou a plutony jsou polygonální a mohou představovat i výplně dutin (např. kruhové žilné formy). Ve větších hloubkách, kde je rozdíl ve vodivosti méně výrazný, vytvářejí magmata „násilné intruze“ s mírně obloukovitými kontakty a ty bývají modelovány jako strmé, dovnitř zapadající diapirové kužely. Lze je interpretovat jako globule ve tvaru převrácené vodní kapky, montgolfiery, stoupající vzhůra (původní představa Grouta — srv. Carmichael et al. 1974, str. 575). Problém je v tom, že geologie takové dovnitř zapadající kontakty příliš nepotvrzuje. Naopak některé násilné vmístěné plutony mají tvary velkých ložních žil, popř. shlukujících se paralelních žil, prstovitě či klínovitě pronikajících do okolí. Příkladem je hlavní donegalský granit. Rozsáhlé

* Nesnadný překlad obratu: „overriding structural control“; autor má zřejmě na mysli vliv, popř. přepracování v důsledku pohybujiících se desek.

intruze proterozoických granitů rapakivi (o rozsahu až 5000 km²) mají hříbovité tvary, odkryté trojrozměrně např. v Grónsku; intrudují podle plochy mezi krystalickým podkladem a pokryvem. Avšak tyto tvary nejsou typické pro fannerozoické granity a modely tohoto typu jsou v ostrém kontrastu s alkalicko-vápenatými batolity. Pokusy určit tvary geofyzikálními metodami rovněž nebyly úspěšné, protože v hloubce ne více než 10 km mizí např. hustotní rozdíly mezi kuželovitým plutonem a okolními horninami. V několika případech, a to jak u diapiru, tak u kalderové intruze, je hloubka odhadována na pouhých 5 km; podobně i u jazykovitého tělesa donegalského granitu (4 km).

Podle Leaka (1978) musí být model stoupajících bublin odmítnut, protože většina granitických těles má naopak strmé kontakty, zapadající vně, nikoli dovnitř. Někteří autoři řeší tento problém tím, že tvar během transportu nemusí být shodný s tvarem konsolidovaného tělesa. Podobně problematický je i model „mělkého batolitu“, jak jej předpokládají někteří autoři například pro batolit Sierra Nevada; mocnost je tu odhadována na základě tíhových, tepelných a seizmických dat na méně než 10 km, přičemž je pozoruhodné, že kyselejší, mladší granitické plutony dosahují hlouběji (12 km). Přesto Pitcher i jiní autoři hledají východisko v modelu, který předpokládá ve spodní části „mělkého batolitu“ přechodnou zónu do bazických hornin, jež mohou mít obdobné fyzikální vlastnosti jako horniny granulitové facie, které někteří autoři předpokládají v podloží batolitu. Pitcherovo zdůvodnění dosahu mladších granitů a granodioritů je však značně nejasné; dosahují prý hlouběji proto, že vznikaly jako korové přetaveniny, a nejsou tedy jako např. tonality tak těsně geneticky spjatý s ba-

ziky v podloží. To však není v souladu s představou přibývání bazicity do hloubky. Protože v batolitech obvykle granitoidním intruzím předchází intruze gaber, kloní se totiž Pitcher k modelu stratifikovaného batolitu se značně složitým dnem, v němž objemy bazických hornin patrně narůstají s hloubkou. Plutony v batolitech nelze však modelovat jednoduše jako vrstvu bublin, zachycených rigidní kůrou. Pravděpodobnější je hromada, pyramida plutonů, které stoupají z hloubky a ve svrchní části sloupce mají kyselejší granitické horniny. Plutony jako celek tvoří uříznuté cylindry (kalder) nebo konkordantní „kapky“ (diapiry), charakteristické v prvním případě pro křehkou a v druhém pro vodivou kůru. Vodivost je silně ovlivněna vlhkostí okolních hornin, a tedy i tepelnými proudy v kůře. Problémem zůstává, zda existuje progresivní vývoj jednoho typu plutonů do druhého či nikoli, zda tedy existuje skutečná „granitová série“.

Představa, že jednotlivé plutony pronikají podle modelu bublin nebo pístů, odstraňuje podle Pitchera v podstatě i problém prostoru. Co však zůstává, je problém prostoru pro celý batolit v regionálním měřítku; tady se dostává do rozporu proces roztahování zemské kůry, k němuž by měl vést mechanismus vzniku batolitových plutonů, s celkovým procesem smršťování, stlačování kůry, který je pravidlem ve většině mobilních pásem.

Pitcher pak zdůrazňuje některé rozdíly, s nimiž nutno počítat při komparaci granitických diapirů se solnými a s experimentálními modely. Protože tvar plutonu je určen především kontrastem mezi vodivostí intruze a obalu, lze očekávat přechody od konkordantních diapirů do diskordantních kalder, podle toho, jak magma tuhne a současně stoupá do úrovně klesající vodivosti.

Fyzikální stav granitoidního materiálu

Celou rozsáhlou kapitolu věnuje Pitcher problému fyzikálního stavu materiálu, z něhož granitoidy vznikají a který označuje jako magma.

Na rozdíl od svých pionýrských prací ve spolupráci s Readem, kdy se spíše klonil k metamorfnímu původu granitoidů, je při svých dnešních zkušenostech opatrnější. Zdůrazňuje polygenní původ magmatu, ale přímé definici se vyhýbá. Citujeme doslova: „Není snadné stanovit, zda určitý granitový pluton prošel likvidním stavem během historie svého života. Je tu celé spektrum možností: některé granity krystalují z roztoků, jiné z částečných korových přetavenin, rozmanitě naplněných restitovým materiálem, a v obou může proud schopný pohybu pokračovat do stadia téměř utuhlé krystalové kaše. Jiné granity představují mobilizáty metasomatizovaných korových hornin, které se postupně odlepují od svých metamorfních obalů. Ačkoli v terénu mohou anatektické a magmatické diapiry vypadat texturně a strukturně velmi podobně, klíč k poznání jejich genetického typu nutno hledat v tektonomagmatickém prostředí, tj. ve stanovení, zda takové granity mají vulkanické ekvivalenty, zda jsou vmístěny do metamorfního či nemetamorfovaného prostředí, zda představují konsangvinní členy magmatické série, nebo zda mají geochemické charakteristiky odpovídající jejich původu...“. Vzápětí pak autor zdůrazňuje, že nesnáze poznat fyzikální stav magmatu vznikají i v tom případě, kdy lze určit, že horniny měly magmatickou historii, protože stupeň krystaličnosti, a tedy ani jeho reologické vlastnosti *de facto* neznáme. Z celého dalšího textu vyplývá, že se kloní k představě krystalové kaše s vlastnostmi plastické hmoty, protože jinak je nesnadné objasnit geologické struktury a vnitřní stavbu, tedy k představě,

kterou Raguin označuje opatrněji jako „état mixte“ — smíšený stav. Volná charakteristika magmatu způsobuje však četné nedůslednosti, protože umožňuje Pitcherovi používat termínu „magma“ podle potřeby, jednou úzce v klasickém pojetí, podruhé široce a v různém významu. Tak jednou lze jeho magmatické granity paralelizovat s granity taveninovými (sám hovoří o roztoku, nikoli tavenině), podruhé s „migmatitickými“ či anatektickými, jindy klade termíny magmatické a anatektické granity do protikladu. Přesto je dobré si povšimnout, jak zdůrazňuje míru hypotetičnosti problému fyzikálního stavu magmatu, k němuž řada granitologů, zejména orientovaných experimentálně, zaujímá značně vyhraněné stanovisko.

Pitcher uvádí i některé názory, které považuje za extrémní, např. představu Demaye z r. 1953, že mnohé granity byly původně „sklovitá magmata“, která rekrystalovala do dnešní krystalové struktury. V tomto ohledu je pozoruhodné, že k podobnému závěru nezávisle dospěl sovětský badatel Frich-Char 1977 (Pitcher jeho práci nezná). Přestože se ke „sklovité interpretaci“ Pitcher nepřiklání, nezapomíná zdůraznit, že rekrystalizace skla je běžným a velmi rychle pokračujícím procesem zejména v mokřích podmínkách. V granitech v orogenních podmínkách nejsou doklady o původní sklovité fázi, ale na druhé straně jsou tu četné změny interpretované jako rekrystalizace (zejména megakrysty K-živců). I když interpretace metasomatických struktur je vždy nesnadná, krystaloblastické struktury mnoha granitů jsou běžné; rekrystalizace je přičítána buď novému prohrátí v důsledku postupných intruzí, nebo dlouhému chladnutí. Takové změny mohou být důsledkem teleskopie magmatické a metamorfní struktury v závěrečných hydrotermálních stadiích krystalizace, ale bývají přičítány též reakcím s vodou během poklesové

metamorfózy. Zvlášť důležité pro poznání pozdních stadií krystalizace granitů jsou též reakční struktury.

Jinou představou o povaze silně mobilního magmatu jsou tzv. tufizity. Jde o silně proplyněný materiál, obsahující úlomky krystalů a hornin; vyskytuje se v subvulkanických podmínkách. O takovém původu uvažuje Pitcher např. pro drúzovité granofyrické granity, bohaté xenolity a přecházející do intruzivních brekcií. Pro taková magmata předpokládají někteří autoři až 50 % krystalů.

Také tonalitická magmata musila být během intruze silně krystalická, jak dokazuje přítomnost restitového materiálu v nich; za takový jsou pokládány shluky biotitu a amfibolu, Ca-bohatá jádra plagioklasů a všudypřítomné bazické uzavřeniny v tonalitech. Krystalický materiál obsahovala od počátku svého vzniku patrně též mokrá granitická magmata, která se postupně stávala krystalovou kaší, nerozlišitelnou od ultrametamorfního migmatu, a obdobně s ním vytvářela diapiry.

Zvlášť dobře jsou problémy magmatické interpretace granitoidů patrný z diskuse o jejich obsahu vody a o jejich reologii. Za obecného předpokladu, že v granodioritových či tonalitových magmatech činí původní koncentrace vody kolem 2 %, a uvažíme-li, že toto i větší množství bylo nutně rychle spotřebováno krystalizací biotitu a amfibolu, nemohou tato magmata vůbec intrudovat. Nutno proto připustit, že magmata byla obohacena meteorickou vodou z metamorfní aureoly; avšak k tomu nemůže dojít v hlubších úrovních kůry, zejména je-li granulitická. Podobně je tomu i s modely přetavení zemské kůry. Při geologicky přijatelných teplotách nemůže být produkována a mobilizována tavina, která by byla méně bohatá Si než granodiorit. Proto např. tonalitická magmata jsou některými autory posuzována jako krystaly v granitickém, vodou obo-

haceném roztoku. Solidifikace mokrých granitických magmat je dále silně závislá na tlaku a zdá se, že čím je magma bohatší vodou, tím spíše musí utuhnout dříve, než dosáhne povrch, a čím více je magma granitické, tím spíše tvoří krystalovou kaši. To je jedna z možností, jak objasnit, proč granitická magmata dominují v zemské kůře, zatímco sušší bazaltická a méně křemitá intrudují do nížce tlakových oblastí nejsvrchnější kůry. To by znamenalo, že granitická magmata se mohou dostat výše k povrchu jen jako fluidizovaná. Problém je však v tom, že nikde v batolitech nelze pozorovat, že by s hloubkou byly více granitické — právě naopak, jsou spíše tonalitické.

O reologii granitů je málo známo; zdá se však, že granitická magmata se nechovají jako newtonovské roztoky, ale jako tzv. Binghamova tělesa, tj. pseudoplasticky, jako tělesa rigidní. Výzkumy v tomto směru čekají podle Pitchera další generaci; je otázka, zda dosud uváděné hodnoty viskozity granitového magmatu mají vůbec nějaký reálný podklad. Jisté však je, že rozdíly ve viskozitě, zejména ve viskozitě magmatu a okolí, mají podstatný vliv na velikost, tvar i vnitřní inhomogenity plutonu. Je však pozoruhodné, že viskozita sama má asi malý vliv na rychlost výstupu plutonu, protože těžný účinek pevného tělesa je podle některých autorů prakticky stejný jako u plynové bubliny! Výstup je proto ovlivňován především viskozitou okolí. Avšak viskozita magmatu je důležitá pro vnitřní procesy uvnitř plutonu, jako např. proudění, přenos tepla a usazování krystalů. Proto autor věnuje problémům viskozity a mobility ještě celou další kapitolu.

Viskozita a mobilita magmatu

Teoreticky by se fyzikální vlastnosti jako viskozita či mobilita magmatu měly

dát odhadnout z poklesávání uzavřenin a krystalů v magmatu. Avšak to je nesnadné z řady důvodů. Zatímco by se mělo projevit gravitační zvrstvení (layering), mnohé plutony jsou co do velikosti zrna pozoruhodně homogenní na ploše desítek km² a zvrstvení se projevuje nanejvýš koncentrací tekavých složek, např. fluóru apod. Lze to vysvětlit buď tím, že původní zvrstvení bylo zlikvidováno rekrystalizací, nebo tím, že v krystalové kaši, která se chovala pseudoplasticky, bylo nemožné. Xenolitický materiál v granitových diapirech je objemově chudý nebo špatně rozeznatelný od restitového materiálu. O asimilaci xenolitů či objemech dezintegrovaného restitového materiálu je málo prací, a i ty se přiklání k názoru, že ve vyšších patrech zemské kůry, kam pronikají granity, jsou z fyzikálního hlediska takové procesy dezintegrace málo pravděpodobné. Roje xenolitů považují někteří autoři za příklad gravitační diferenciace, protože se často vyskytují při kontaktech. Podle Pitchera jde však v takovém případě, zejména pokud tyto zóny mají lineární průběh, daleko spíše o fragmentované, tzv. synplutonické bazické žíly (viz níže). Pokud se autoři pokusili odhadnout rychlost krystalizace experimentálně z poklesu krystalů či uzavřenin v tavenině, vychází rychlost krystalizace plutonů z takových úvah příliš velká. Pitcher proto zdůrazňuje spíše nosnou schopnost magmatu, vyplývající z toho, že se magma chová pseudoplasticky. To platí i pro plutony vysokých úrovní, v nichž je patrně stopping, tj. „zamrznutí“ ker uvolněných z rozlámaného stropu při výstupu magmatu (pro takové plutony vysokých pater však Pitcher v předešlých kapitolách předpokládal naopak vysokou mobilitu!).

Jednou z důležitých otázek je otázka, zda viskozita magmatu může být příčinou konvekčního proudění a způsobovat takto

zonálnost plutonů. Mělo by tomu tak být vzhledem k tomu, že viskozita je silně závislá i na malých teplotních rozdílech. Je známo mnoho plutonů, které mají jádro granitové a okraje granodioritové či tonalitové, s ostrými i plynulými přechody, popř. s intruzemi hornin jádra do solidifikovaného bazičtějšího okraje. V několika málo případech je ukázáno, že může jít o kontaminaci okolními horninami, ale nověji je tento jev vysvětlován spíše okrajovou akrecí vykřystalovaného materiálu v magmatu v důsledku difúze nebo přemístění volatili taveninové fáze. Tyto procesy nejsou podle novějších názorů způsobovány či podporovány gravitačním usazováním krystalů. Termální difúze je přičítána velká úloha též při vzniku vyrostlic — je příčinou variability vyrostlic, např. nestejné uspořádanosti živců, takže je není nutno objasňovat rekrystalizací či metasomatózou. Zábranou takového výkladu je však pomalost difúze. Ale o mechanismu difúze v magmatu jsou dosud jen omezené znalosti, a i to málo, co známe, se zdá, že zcela podkopává standardní kinetickou teorii.

Bylo mnoho diskusí o tom, zda konvekce v magmatu existuje a zda poskytuje vhodný výklad pro přenos materiálu. Podle Pitchera lze významnější vliv konvekce v granitových plutonech sotva prokázat. Je třeba také počítat s tím, že mechanismy diferenciace jsou závislé na fázích vývoje granitoidního komplexu a jsou jiné během částečného tavení, během výstupu do vysokých pater, během tvorby kalder apod. Pokud vliv konvekce existuje, pak je méně pravděpodobný v diapirech, ale je možný v magmatech kalder. Zejména však o něm nelze uvažovat tenkrát, jsou-li přítomny reliktní struktury (resp. reliktní stratigrafie — „ghost textures“).

Dokladem toho, že granitové magma může „téci“ ve stavu téměř solidním („quasi-solid“), jsou tzv. *synplutonické*

žily. Pitcher předpokládá, že „v době jejich intruzí okolní granitická hornina vykrystalovala, měla již svou strukturu vytvořenu, takže byla v dostatečně pevném stavu, aby se současně mohly udržet trhliny vzniklé náhlým stresem a aby se současně mohla chovat **plasticky** s postupujícím stresem“. Žilná hornina je rozlámána, rozčleněna až do budinovaných tvarů a uzavřena. Výklad vzniku tohoto záhadného a většině granitologů dobře známého protikladného jevu je tedy značně složitý. Podle mého názoru není snadné si představit vedle sebe křehkou a plastickou deformaci téže žily v témže solidifikovaném granitoidu (v Českém masívu jsou takové jevy dobře patrné v první etáži teletínských lomů středočeského plutonu) a navíc ještě následnou intruzi téže solidifikované granitoidní horniny, která zřetelně proniká do xenolitů. Nechceme-li však připustit metamorfní výklad celého jevu ve smyslu Sederholmova efektu se všemi důsledky, pak Pitcherův výklad poskytuje jednu z problematických, ale nejpřijatelnějších možností v rámci magmatické koncepce.

Pitcher dále vyslovuje pochybnosti o tom, že by se dalo na stav krystalinity magmatu usuzovat na základě *strukturních* či *stavebních znaků* plutonu. Ačkoli se teď stává velmi rozšířeným jevem ukazovat vnitřní stavbu Cloosovou metodou, zůstává problémem — tvrdí autor —, jaký má tato metoda genetický význam. Tak například Nickel i jiní se domnívají, že přednostní orientace (lineace) nemůže vznikat v doménách newtonovských proudů, ale jen v solidifikovaném stavu. I když to není názor příliš rozšířený, přednostní orientace v plutonech je podle Pitchera v podstatě důsledek metamorfního procesu. Nasvědčuje tomu zploštění xenolitů, diskordantní průběh foliace ke šlírovitosti či hlavnímu kontaktu, častý její souhlas s okolními horninami. Dochází k přestav-

bě, reorientaci (re-growth) vyrostlíc v pevném stavu během rotace do hlavní roviny, takže původní struktura může být zcela zastřena. K takové rekrytalizaci může např. dojít v okrajové zóně plutonu, zatímco v jádru může magma zůstat ještě mobilní, tj. bez orientace. Teprve v konečné fázi po úplné solidifikaci, kdy minerály jsou navzájem „propleteny“, může být deformační proces zakončen kataklázou. Protože tedy může jít o kontinuitní intruzivně deformační historii, je nereálné rozlišovat primárně magmatické a sekundárně magmatické (postmagmatické) textury. V důsledku deformací vyvolaných intruzí nelze pak rozlišit konečnou pozvolnou solidifikaci krystalujícího magmatu od pokračující migrace diapiricky intrudovaného migmatu. Výrazná přednostní orientace se vyvíjí jen za speciálních podmínek, není obecným jevem.

Trvání plutonického magmatismu

Další složitou otázkou granitového problému je otázka trvání plutonického magmatismu. V mobilních pásmech je magmatismus opakovaným procesem, obdobně jako výzdvih či sedimentace. Avšak problémem zůstává, zda je *kontinuitní* (tzn. kontakty jednotlivých pulsů představují jen krátký časový interval), nebo *diskontinuitní* (s podstatným časovým intervalem) a v tom případě buď *epizodický*, nebo *periodický* (tj. nepravidelně či pravidelně přerušovaný). Současná teorie deskové tektoniky nasvědčuje spíše celkové kontinuitě, i když pulsační charakter může být vyvolán variacemi v rychlosti *spreadingu*. Že může být magmatismus dlouhodobý, příkladem toho jsou mezo- a kenozoická mobilní pásma západních Amerik, kde lze sledovat plutonity a jejich vulkanické ekvivalenty od pozdního triasu dodnes. Lze tu pozorovat i určitý řád v prostorovém uspořádání a dlouhé

trvání aktivity i v rámci jednoho úzkého lineamentu, i určitou geochronologickou periodicitu, ale ta se s přibývajícím údaji stává stále komplikovanější. Je třeba si také uvědomit, co při geochronologickém časování plutonického procesu měříme; obvykle je to doba příchodu do určité erozivní úrovně, zatímco periody tvorby magmatu, jeho migrace kůrou a konečného chladnutí mohou trvat podle Pitchera mnoho milionů let. Některé pokusy o výpočty naznačují, že např. pluton o průměru 10 km může chladnout podle obsahu vody od 300 000 (0,5 H₂O) do 40 000 (4 % H₂O) let. Takové odhady nutno ovšem brát jen s rezervou, protože je nejpravděpodobné, že intruze představuje uzavřený či tektonicky statický systém. U některých amerických subvulkanických plutonů (kalder) lze odhadovat životnost komplexů podle asociovaných vulkanických cyklů na 1,5–4 milióny let, přibližný odhad pro segregaci a akumulaci magmatu v diapirech je kolem 6 miliónů let a proto výstup 1 milión let (pro jeden pluton); jak tomu potom musí být v rozsáhlých a mnohonásobných batolitech? Určitou epizodičnost tu naznačují geochronologické údaje, avšak zde měříme spíše výzdvih a prohrátí novými intruzemi než jednoduché chladnutí magmatu. Zdá se, že některé plutony mohou zůstat při teplotě 400–500 °C po dobu až 20 miliónů let! V severoamerických batolitech je spousta geochronologických dat, z nichž lze podle některých autorů odvodit několik epizod (3–5), zhruba s intervaly 30 miliónů let a trváním 10–20 miliónů let. Jiní autoři (např. Gilluly) trvají na tom, že tyto mezery lze vyplnit a že proces je kontinuitní. Diskuse kolem tohoto problému je velmi bouřlivá, protože se dotýká mimo jiné základů teorie deskové tektoniky. Podle ní zde dochází k produkci granitoidů na okraji subdukované desky a snaha korelovat uvedené epizody s perio-

dami spreadingu nebo se změnami rotace desek vede k chaotické představě. Je-li plutonismus v různých regionálních segmentech And epizodický — a Pitcher se přiklání k tomu, že je —, nutno z toho odvodit patrně i rozličnou rychlost spreadingu v jednotlivých segmentech (omezených transformními zlomy), a tedy různé rychlosti podsouvání; to vyvolává změny v magmatické činnosti, charakteru magmatismu a rovněž i objemu magmat. Tabulka 1 uvádí pokus o takovou korelaci na příkladě peruánského batolitu. Stupeň přetavení a povaha produktů závisí nutně i na úkolu desky. Podle Pitchera datujeme nikoli jednotlivé plutony, ale magmatické série, a jejich vývoj může být různě dlouhý (např. v Peru nejstarší kolem 18 miliónů let, poslední, nejkyselejší, kolem 5 miliónů let). Proto jsou geochronologické údaje pro posouzení vývoje plutonismu zásadního významu.

Segregace a intruze magmatu

Velkou pozornost věnuje Pitcher problému mechanismu oddělení (segregace) a intruze granitických magmat. *Představa o vzniku granitických hornin přetavením kůry* je obecně rozšířena. Je podepřena dávno prokázaným zesílením kůry v mobilních zónách, které nověji v teorii deskové tektoniky lze vysvětlit jako důsledek buď podsouvání desky (při subdukci), nebo zkrácení kůry (při kolizi). Rovněž vztah k regionálnímu metamorfismu je evidentní, i když někteří autoři (např. Autran v Pyrenejích) nověji ukazují, že není zcela bezprostřední. Paradoxní ovšem je, že na jedné straně je experimentálně dokumentována možnost vzniku granitu částečným natavením kontinentálních hornin, ale na druhé straně je stále více zdůrazňováno, že ani teplota, ani koncentrace

*Odhad vztahu mezi objemem intrudovaného magmatu a rychlosti spredingu
na příkladě peruánského batolitu (Pitcher, str. 642):*

Tab. 1

mil. roků	rychlost spredingu v cm/rok	relativní objem magmatu			
0—12	4	—	granodiorit a granit batolitu Cordillera Blanca		
12—60	2	—	malé granitoidní pně		
60—85	4	—	3. granit a granodiorit	25 %	} pobřežní peruánský batolit
85—110	17	—	2. tonalit	60 %	
110—120	5	—	1. gabra jako předchůdci	15 %	

vody v hloubce nejsou dostatečné k tomu, aby k natavení došlo; nutno připustit dodání těchto složek působením plášťových magmat. Z hlediska deskové tektoniky však musí být značný rozdíl mezi granity v mobilních zónách kolizního a subdukčního typu. V prvních je dostatek vody z dehydratace slid během metamorfismu, v druhých je nutný přínos. Nedostatek tepla a těžkých složek vedl mnohé autory ke zpochybnění korového původu granitoidů a naopak k vážným úvahám o jejich plášťovém původu. Například podle Wyllieho jen granitové a granodioritové taveniny mohou být korové, nikoli však dioritové a tonalitové. Rovněž relativní homogenita granitu svědčí proti anatektickému původu podle řady autorů, zatímco jiní, např. Raguin, předpokládají homogenizaci mobilizátů; Talbit např. nověji považuje za mocného činitele takové homogenizace termální konvekci. Také izotopy Sr, Pb a obsahy REE nověji zpochybňují korový původ granitů — nasvědčují plášťovému vzniku nebo aspoň míšení s plášťovým materiálem. Pitcher se tu opět projevuje jako zkušený granitolog — geolog, když takové závěry na základě izotopů či stopových prvků označuje jako nové dogma; někteří autoři je nadšeně aplikují i na západoamerické batolity, bez

ohledu na to, že izotopický charakter spodní kůry je ve skutečnosti neznámý. Co však je zřejmé, je skutečnost, že geochemické výzkumy stále více ukazují na geochemické rozdíly granitů v závislosti na geologickém prostředí.

Pokud jde o *přechodné kontakty*, považované často za důkaz vzniku granitoidů in situ, ty se dnes ve většině případů ukazují spíše jako reakce mezi okolními horninami a intruzivním magmatem. Ale i v takových magmatických komplexech, které se zdají být jednoznačnými příklady vzniku granitů segregací a anatexí, je nověji prokazována zděděná deformační stavba, což zcela odporuje představě anatektického vzniku magmatu. Pitcher však hned opatrně dodává, že tím nechce zpochybňovat klasické případy anatexe (za takový příklad považuje např. podle Mehnerta granitoidy Schwarzwaldy), a staví se kladně k Mehnertově schématu polygenního původu granitických hornin. Ultrametamorfní vznik však nelze podle Pitchera aplikovat na vznik granitů v batolitových dimenzích. Pro okrajové deskové batolity (na rozdíl od interních deskových batolitů) nelze uplatňovat ani jednoduchou představu Readovy granitové série, zejména ne pro alkalicko-vápenatou sérii. V případě batolitů se Pitcher přiklání

k modelu, podle něhož jak kůra, tak i plášť přispívají k jejich dnešní povaze. Vznikají podle něho nejspíše lokalizovaným přetavením spodní kůry za účasti tepla a vody; tyto složky dodávají magmata subkrustálního původu. Z toho vyplývá, že povaha kůry pod batolitem je rozhodující pro typ a relativní hojnost granitoidů v batolitech. Porovnáme-li tento závěr s novějšími syntetizujícími pracemi v sovětské literatuře (Lutc 1974, 1975), vidíme, že Pitcherovy závěry jsou jim velmi blízké. Lutc má však vyhraněnější názor na procesy v kůře vyvolané plášťovým materiálem; tyto procesy jsou podle něho v podstatě metamorfní, zatímco Pitcher hledá nejrůznější, nedůsledná vysvětlení. Jednou přisuzuje např. anatektickému magmatu pseudoplastický charakter, vzápětí je však posuzuje jako taveninu, se všemi znaky charakteristickými pro taveniny experimentální.

Z uvedeného vyplývá, že *parciální přetavení* potřebné pro *batolitové dimenze* musí podle Pitchera probíhat v hloubkách, které jsou zřídka odkryty erozí, a že tedy představa o segregaci a akumulaci granitoidních magmat je spekulativní. Určité indikace snad lze odvodit ze způsobu tvorby akumulace a migrace vodních bublin v ledovcích, které naznačují význam stresu v těchto procesech. Je ovšem těžko si představit takový proces v pseudoplastickém prostředí. Komagmatické série velkých objemů v cirkumpacifických batolitech hovoří ve prospěch regionálního přetavení. Jejich lokalizace v dlouhých úzkých pásmech vyžaduje produkci hlubinných, horizontálních taveninových „buněk“ odpovídajících rozměrů, patrně tubulárních a nepříliš mocných. Otázkou ovšem je, jak v každé jednotlivé buňce proces parciálního tavení probíhá. Může probíhat jako několikafázový, tj. frakcionovaným rozpouštěním (každý člen představuje další fázi přetavení), nebo jednofázový, tj. rov-

novázným rozpouštěním (každý člen plutonické série představuje diferenciaci z původně jednotného roztoku, tj. roztoku, který se vytvořil jako produkt jednoho natavení). Pro peruánský batolit se autor přiklání k druhé verzi; každá horninová řada vzniká procesem jednotlivého natavení, přičemž tavenina může zůstat dosti dlouho likvidní (podle Pitchera až po dobu 10 milionů let!), takže má dost času k diferenciaci na sérii o známé sukcesi od bazických ke kyselým. Komplikovanost, dlouhodobost a vazbu andského plutonismu na lineamenty vysvětluje Pitcher dominantním vlivem subdukované desky, na jejímž okraji je situovaný. Krátkodobější a méně široce rozprostraněný plutonismus, např. hercynský a kaledonský, není pod takovým vládnoucím (overriding) vlivem subdukce, je proto omezen v čase i objemu a je nerovnoměrně rozložen na průsečících lineamentů. Pitcher však nezastírá, že bez modelu subdukce pro andské batolity bychom se museli vrátit k hypotéze Halla 1971, 1972; podle té je korové tavení důsledkem uvolnění tlaku při prudkém zdvihu hornin zahrátých dlouhodobým poklesovým metamorfismem. Spekulativní charakter uvedených úvah je tedy evidentní. Připomeňme proto, že existují i další možnosti, jak objasnit příčiny natavení a charakter plutonů na lineamentech (srv. níže) a že jen některé plutony evropských variscid (spíše výjimečně než obecně) jsou situovány na průsečících lineamentů.

Také *příčiny výstupu magmatu* jsou na podobné hypotetické až spekulativní úrovni. Je celá řada představ o tomto mechanismu, ale žádný nelze pokládat za výlučný. Může to být tlakový gradient, ale též mechanismus vztlaku (buoyancy), plynného transportu, tektonického vytlačování, expanze při tavení, nebo seizmického načepování. Každý z nich patrně převládá v různých tektonických podmínkách. Na-

příklad vztlak je patrně nejúčinnější v prostředí katazonálního metamorfismu při vzniku anatektických domů, kdy rozdíl vodivosti mezi domem a obalem jsou minimální. Naproti tomu vytlačování (squeezing) může hrát určitou úlohu na zlomech a mechanismus tlaku vodní páry zejména ve vyšších úrovních zemské kůry (např. usnadňuje fluidizaci v kalderách, při výnosu xenolitů apod.); objemová expanze se musí uplatnit v subdukčních zónách. Viskozita naproti tomu působí v opačném směru ke všem těmto hnacím silám. Zejména nelze zapomínat, že části magmatického tělesa se mohou pohybovat vzhůru různou rychlostí, což poskytuje možnost dalšího výkladu vnitřních látkových rozdílů a vnitřních kontaktů.

Evidentní je v řadě případů *výstup magmat podle velkých lineamentů*. To je zvlášť charakteristické pro kordillorské batolity (např. peruánský v délce 1600 km při šířce pouhých 60 km). Křížení s příčnými zlomy vytváří zvlášť vhodné podmínky pro výskyt tzv. hnízdovitých plutonů („nested plutons“).

Značně komplikovaný je i *problém tzv. „násilné“ a „povolné“* (v originále: „forcefull“ a „permissive“) *intruze*. Jde do určité míry o starý problém aktivního či pasivního pronikání magmatu; důraz však není položen na vlastnosti samotného magmatu, ale na tlakové pole, které je výstupem vyvoláváno, nebo které samo výstup vyvolává. V zásadě lze shrnout, že příkladem násilné intruze jsou diapiry; vyvolávají ve svém okolí deformaci, odsouvání, vyklenování, ve vyšších patrech i překocení, nadzvedávání i aktivní prorážení (piercement) okolních souvrství. Pronikání v hlubších patrech je podle Pitchera modifikováno radiálním roztahováním, jindy je popisováno radiální zkrácení, stlačení vrstev. Rozsah deformace je v expandujících diapirech Donegalu obvykle souhlasný s rozsahem termální aureoly, to zna-

mená, že plastická deformace závisela na předcházejícím prohrátí. Pozoruhodné je, že i při silném zkrácení okolních souvrství nebo xenolitů zůstává stratigrafie zřetelně zachována. Není však snadné — zejména v hlubších zónách — rozlišit deformaci vyvolanou intruzí od deformace regionálního charakteru.

Naproti tomu „povolná“, permisivní intruze magmatu je charakteristická pro kaldery a kruhové intruze; pronik magmatu je tu umožněn tahovými tektonickými silami, které vznik kalder doprovázejí. Tahové intruze jsou typické pro subvulkanické plutony. Příklady permisivního pronikání poskytují podle Pitchera kruhové žíly, které doprovázejí masívy „circonscribts“; magmata tu mohou přecházet až do fluidizovaných tufizitů, pro něž už je zapotřebí stěnová trhlinka. Není také pochyb o tom, že mnohé granitoidní plutony mechanicky nahrazovaly okolní horniny, aniž porušily jejich pozici; je to patrné v těch případech, kdy jsou odkryty stropy intruzí, zejména tam, kde byl prostor získáván subsidencí mechanicky nahrazené kůry.

Pitcher se pak znovu vrací k Leakovi (1978) a otevírá otázku, kterou v celé jeho diskusi a pro jeho schémata považují za zásadní: jsou lineamenty pouze dráhami, které umožňují výstup magmat velkých batolitů, nebo jsou přímou příčinou vzniku magmatu a těchto batolitů, tak, jak se např. domnívá Leake pro irské granity? V druhém případě totiž odpadá nutnost „přetvářejícího vlivu“ (overriding control) subdukované desky, na němž především Pitcher své schéma vybudoval. Stanovisko autorky referátu je shodné s tím, které zastává Leake a které bylo obdobně v naší literatuře rozpracováno na základě koncepce blokové stavby zemské kůry již v r. 1973 (Šťovíčková 1973). Tato teorie má přednost v tom, že je schopna objasnit příčinu vzniku plutonismu na základě

jednotného principu, a to i výskytu analogického plutonismu v různých tektonických podmínkách, andského, alpského či hercynského typu, bez závislosti na hypotetických subdukovaných deskách. Také Hallově představě uvedené vpředu je třeba věnovat větší pozornost.

Rovněž metody, jak určit *hloubku intruze*, jsou dosud podle Pitchera málo spolehlivé, i když značně pokročily a některé mohou dát určité indicie (nap. barometrie na základě stability některých minerálů, fluidních inkluzí, na základě stanovení pO_2 z poměru Fe^{II}/Fe^{III} nebo Fe/Ti , nebo Al v amfibolech, popř. z uspořádání živců apod.). Je však třeba počítat s tím, že tyto hodnoty jsou silně ovlivnitelné velkou řadou faktorů, zejména v postkonsolidačním stadiu. Spíše metamorfní aureola může dát konkrétnější představu o pt-podmínkách, ale i zde autor varuje před odvozováním hloubky intruze jako funkce rozsahu metamorfní aureoly, jak to činí někteří autoři. Úvahy odvozené kombinací z nejrozličnějších geologických a mineralogických údajů vedou pro peruánský batolit k překvapivému závěru, že plutony batolitu vystoupily v kterékoli době během celých 70 miliónů let (!) prakticky do stejné společné mělké úrovně, ne více než 5 km od povrchu. Příkladem jsou také plutony zvonovitého tvaru, které mohly být „vmístěny“ jen hydrostaticky a které jsou často tvořeny řadou hnízdivých intruzí. Z uvedeného je zřejmé, že rozlišení násilné a permisivní intruze u velkých plutonů nebude snadné; např. Daly předpokládal mechanické protavování stropů za typické právě pro intruze velkých batolitů, které jsou v dnešní terminologii označovány podle Suesse jako harmonické. Avšak takové batolity jsou obvykle diapirové, tedy tvořené násilnými, nikoli povolnými, mechanickými intruzemi. Na základě rozboru uvedeného dvojího způsobu pronikání

intruzí si autor klade otázku, zda a kdy a proč převládají *kaldery* a *kdy diapiry*. Tvorbu ovlivňuje především stupeň kontrastu vodivosti mezi magmatem a okolní horninou. Avšak není to tak jednoduché, že by tento kontrast klesal se stoupající hloubkou v kůře. Kontrast může být např. silně ovlivněn tím, zda se magma stane pseudoplastickým, či zda zůstává delší dobu značně mobilní. Tak vznikají v prvním případě diapirové batolity a v druhém kalderové batolity. Přesto diapiry převládají. Příčinu vidí autor v tom, že kontrast vodivosti mezi magmatem a okolím se z řady důvodů může snížit i v dosti vysokém patře, např. přehřátím obalových sérií v úrovni původně vysokého kontrastu, a i malé změny teploty silně ovlivňují viskozitu magmatu; tak se může např. stát, že tendence k tvorbě diapiřů se projevuje i v horninách nižší vodivosti (např. v dolomitických vápencích) výrazněji než např. ve vodivějších vulkanitech, protože vápence byly více zahřáty. To je také příčinou, proč mohou diapiry a kaldery existovat vedle sebe. Podobně mohou mechanismus intruze ovlivňovat vodivé střížné zóny na rozdíl od nevodivých rigidních bloků. Hloubka intruze tedy ovlivňuje vztah intruze a prostředí jen částečně, např. ve velmi hluboce odkrytých partiích zemské kůry (jakými jsou např. svekofenidy). Zde dochází k úplné shodě mezi intruzí a obalem a masívy tu mají povahu harmonických násilně intrudovaných diapiřů. Je třeba počítat i s tím, že mnohé tzv. diapiry mohly být původně epizonální disharmonické plutony, které mohly být později deformovány regionální deformací, že tedy i v proterozoiku mohly být původně batolity kordillerského typu (tj. s kalderami).

Pitcher pak diskutuje o mechanismu intruzí a úrovni vzniku, které poskytuje *batolitová série* západních Amerik, tj. řada

batolitů v jedné geotektonické zóně, vázaných na okraj cirkumpacifických desek. Tyto batolity by totiž měly teoreticky ukazovat analogický charakter nejen co do látkového složení, ale i co do vývoje a stavby, jestliže mají analogickou příčinu vzniku planetárního významu. Není tomu tak, jsou mezi nimi značné rozdíly. Například pobřežní batolit západních Kordiller Centrálních And je podle Pitchera převážně kalderový, batolity Peninsular Rangers a Baja California mají diapiry i kaldery, batolit Sierra Nevada je převážně z „násilných intruzí“, pobřežní pluton Britské Kolumbie má převážně diapiry a je příkladem anatexe in situ. Podobně i metamorfní prostředí, v němž batolity vystupují, je proměnlivé. Pitcher z toho vyvozuje závěr, že západoamerická batolitová série odkrývá batolity, jejichž magmatické krby byly denudovány do různých úrovní kůry, a strukturní rozdíly mezi batolity odrážejí velký kontrast vodivosti a okolí, který se mění s hloubkou v rámci jednoho metamorfního pásma.

Genetická klasifikace vzniku granitů

V závěrečné kapitole se autor zamýšlí nad dosavadním přístupem ke genetickým klasifikacím vzniku granitů. Dosavadní schémata se opírají především o modální a látkovou charakteristiku; nová klasifikace musí nutně tuto charakteristiku uvádět ve vztahu ke geologickému prostředí.

Dosavadní petrografické a geochemické výzkumy ukazují, že existují dvě kontrastní série granitických hornin; obě jsou alkalicko-vápenaté, ale první má velký rozsah co do složení, druhá naopak rozsah omezený. Série se liší poměrem gabro: diorit/tonalit: granodiorit/granit. Na základě zkušeností — zřejmě především z amerických batolitů — se Pitcher pokouší dokonce o kvantitativní odhad uve-

deného poměru — v první řadě ca 15 : 50 : 35, v druhé 8 : 12 : 80. I když to autor neuvádí, jde tedy o série rozlišované sovětskými autory jako dvě základní formální řady granitoidů, gabro-diorit-granodioritová a batolitová granitová. V Českém masívu (viz práce Klomínského — Dudka 1978, Sattrana — Klomínského 1970, Palivcové et al. 1978, 1984b, Cambela et al. 1980, Klomínského et al. 1981) jsou série označovány jako tonalitová (popř. tonalit/granodioritová) a granitová (popř. granit/granodioritová) řada, popř. se hovoří o bazičtějších a normálních granitických (eugranitických) masívech.

Tyto dvě řady (upozornil na ně už Eskola 1932) jsou dnes dokumentovány novými geochemickými či mineralogickými parametry, např. v klasifikaci na I/S granity (Chappel — White 1974), nebo podle rudních minerálů na magnetitovou a ilmenitovou řadu (Ishihara 1977), popř. i podle jiných minerálních charakteristik na řadu sfén-allanitovou a ilmenit-monzonitovou apod. (Ivanova — Butuzova 1968). Pitcher paralelizuje I a S-granity s plášťovými a korovými (ne zcela přesně, protože v originální práci se hovoří pouze o zdrojovém materiálu, z něhož granitoidy vznikají v procesu anatexe — z vyvřelého v prvním případě a ze sedimentárního v druhém). Přibližná hranice je charakterizována mj. hodnotou 0,7060 poměru izotopů $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Pitcher pak uvádí typické příklady masívů s I a S-granity; ty se mohou vyskytovat separátně i společně v těchže komplexech a indikují podle některých autorů i charakter, resp. mocnost granitické kůry. Například v australských masívech jsou I a S-granity v určitém vztahu ke geologickému charakteru plutonů (první granity tvoří harmonické plutony, druhé disharmonické), a to ve dvou oddělených pásmech, jejichž hranice je pokládána za hranici změny v povaze kůry. Podobnou situaci lze vysledovat

podle sovětských autorů v pacifickém pobřeží Dálného Východu SSSR, zatímco mezozoické andské masívy jsou převážně I-typy. Jako charakteristický modelový příklad S-typů uvádí Pitcher portugalské hercynské granity, zatímco skotské kaledonské mají přechodný charakter a komplikovanější vznik (přetavením, míšením aj.). Lze uvést řadu dokladů, že granitový magmatismus je nezávislý na čase, ale je závislý na charakteru zdroje (jeho povaze i hloubce), z něhož granity vznikají.

Základním výsledkem Pitcherova hodnocení granitového problému je *genetická klasifikace orogenních granitických masívů ve vztahu k tektonickému prostředí*. Autor rozlišuje tři typy způsobu „emplacement“ v orogenních podmínkách (tab. 2). Schéma se opírá o Zwartovu charakteristiku alpinských a hercynských orogenů a je rozšířeno o andský orogen. Charakteristika je založena na geotektonické hypotéze deskové tektoniky. Zatímco alpinotypní a andinotypní intruze jsou situovány na okrajích desek, v ostrovních

obloucích, buď v příkopu, nebo na okraji kontinentu v závislosti na subdukcí, hercynotypní představují v Pitcherově představě Pitcherově představě masívy intrakontinentálního zaobloukového bazénu. S tím souvisí i různý charakter metamorfózy i petrografický charakter hornin, jak vyplývá z tabulky 2.

Uvedený pokus Pitcherův má nesporně racionální jádro, ale je odvozen především ze znalostí masívů andských a méně již evropských masívů hercynských či alpských. Ale i k samotné charakteristice andinotypních podmínek lze mít určité dotazy, které vyplývají z jeho předešlé charakteristiky andské batolitové série; vyplývá z ní, že kalderový charakter batolitů, jaký autor pokládá za typický pro andinotypní podmínky (srv. tab. 2), je v andských batolitech spíše výjimkou než pravidlem; převládá diapirový typ batolitů.

V literatuře je dále mnoho dokladů o tom, že nejen andské, ale i některé alpské či hercynské plutonické komplexy jsou

Schéma podmínek „vmístění“ batolitů ve vztahu k orogennímu prostředí (Pitcher 1979, str. 653)

Tab. 2

alpinotypní	andinotypní	hercynotypní
v perikontinentálním příkopu (trench), v eugeosynklinálním bazénu	v kontinentálním okrajovém bazénu:	v intrakontinentálním „zaobloukovém“ bazénu:
sedimentace v okrajovém příkopu (trough)	sedimentace ve zlomové brázdě	sedimentace na svazích švu
ofiolity	andezity	—
metamorfismus glaukofanových břidlic	poklesový metamorfismus	regionální nízkotlakový metamorfismus
ultrabazika, gabra	tonality typu I	migmatity, granity typu S
batolity chybějí	disharmonické (Daly) kalderové batolity poskytující vulkány	harmonické (Suess) diapirové batolity
podsování — silné zkrácení	vertikální pohyby — minimální zkrácení	tektonické zkrácení

tvoreny látkově analogickými až identickými sériami, které se stereotypně opakují. Podle názoru autorky referátu je nepravděpodobné, že by do detailu analogické horninové série např. jihokaliifornského andského masívu, alpského Adamella a hercynského středočeského plutonu mohly mít zcela jiný petrologický, geologický, a geotektonický rámec svého vzniku (srv. Palivcová, 1984b) ve smyslu Pitcherova schématu. Ani v oblastech andských batolitů např. Severní Ameriky nechybí asociace s četnými ultrabaziky, jaká je charakteristická podle Pitchera pro alpská pásma, a bazická série všech tří uvedených masívů je nejlepším dokladem jejich podobnosti.

Autor ovšem zdůrazňuje, že jeho schéma ukazuje modelové situace; ty pak mohou být v přírodě uspořádány rozličným způsobem, např. jako následná naložená či stejně stará sousedící pásma, takže mohou vznikat „párové asociace“ např. alpinotypních a hercynotypních pásem, jak ukazují Aguire a Levi v Centrálním Chile (!). Pokud se takové rozdíly vyskytují v orogenech „naložených“, t.j. různého geologického stáří, lze je podle názoru autorky referátu ještě pochopit, i když to např. pro andská pásmná pohorí znamená radikální změny geotektonického režimu v rozdílných geologických dobách. Pokud jsou ale vymezené podmínky ve schématu tabulky 2 chápány jako modely, které se mohou vyskytovat současně vedle sebe v orogenu téhož geologického období, pak jsou takové změny geotektonického režimu stěží pochopitelné a charakteristika orogenů (str. 652), která je základem Pitcherova schématu, se stává bezpředmětnou. V tom lze vidět hlavní problém Pitcherova schématu.

Celé schéma lze podle názoru autorky referátu zjednodušit tak, že v zásadě jde o dva typy granitoidních masívů ve fanoerozoických orogenech — interblokové

(lineamentové) a intrablokové, jak na ně upozornil už Cloos, nověji řada sovětských autorů, u nás Štovičková c. l. aj. Rozdílný látkový charakter je tu pak vysvětlován přímou funkcí a dosahem hlubinných zlomů či výstupu bloků (tedy obdobně jako v interpretaci Leakové či Hallově); interblokové lineamentové masívy jsou obvykle složitější, pestřejší, bazičtější v důsledku hlubokého dosahu hlubinného zlomu než intrablokové v oblastech mocnější sialické kůry a jejího výstupu. Uvedená interpretace má tu přednost, že může analogické masívy v andském, alpském či hercynském orogenu objasnit jedním principem, bez závislosti na hypotetické deskové tektonice, subdukci či dalších jevů s touto hypotézou spojených.

Pitcherovu stať lze tedy charakterizovat jako pokus o nový přístup ke geologické, resp. geotektonické genetické klasifikaci granitoidních masívů z hlediska deskové tektoniky. Jeho celé dílo nutno hodnotit jako jeden z nejvýznamnějších příspěvků ke granitovému problému, protože se opírá o detailní moderní výzkum konkrétních plutonů a batolitů v širokém měřítku, s důrazem na jejich geologickou historii vývoje. Shrnující stať je i přes shora uvedené poznámky současně vynikající syntetizující diskusí; je podnětná svou vzácnou objektivitou a poskytuje orientaci v literatuře k téměř každé z nejdůležitějších otázek granitového problému. Sporné problémy nezakrývá, odlišné názory nepodceňuje, i když nepodporují vlastní koncepci. Přímou vybízí ke korelaci.

Podobně jako dílo Dalyho, Suessovo, Harkerovo či Raguinovo a dalších klasiků nutí dále k zamyšlení nad základní úlohou granitu ve vývoji zemské kůry a celého zemského tělesa a nad příčinami trvání granitového problému. Genetická klasifikace granitoidů je v první řadě závislá na geotektonickém prostředí. Geotektonické prostředí silně ovlivňuje his-

torii vývoje i vznik granitických hornin. To je hlavní závěr Pitcherova díla. Platí to nejen pro fanerozoické orogenní granity, které diskutuje Pitcher, ale je to stejně známo i pro prekambričké granity a anorogenní granity. To tedy znamená, že názor na vývoj a vznik granitických hornin je nutně závislý na geotektonických hypotézách, bude záviset i na tom, kterou koncepci ten který badatel preferuje, a bude se měnit s vývojem geotektonických koncepcí. V tom je jedna z příčin trvání granitového problému.

Z hlediska vývoje zemské kůry je problém vzniku granitu problémem planetárního významu. Upozorňoval na to zejména Daly („Je to sial, který leží na srdci granitu“) a také Pitcher často zdůrazňuje závislost našich úvah o vzniku granitu na tom, „co leží pod granitem“. Je proto nejvýš pravděpodobné, že vznik granitu bude mít obdobně jako geotektonický vývoj Země (či obdobně jako např. anortozitické horniny v měsíční kůře) jednotnou příčinu. Formy výskytu granitických hornin naopak ukazují velkou variabilitu. To vede většinu autorů k závěrům o polygenním vzniku granitických hornin. Takový názor zastává např. i Pitcher i petrologové nejpovolanější, Turner, Verhoogen. Nověji, v přepracované „Petrologii vyvřelých hornin“ spolu s Carmichael (Carmichael et al. 1974) se ke granitovému problému vyjadřují velmi opatrně, a to takto: „Jejich (tj. granitických hornin obecně — hornin nad 10 % modálního křemene) rozšíření je tak rozsáhlé, jejich vztahy k hloubce kůry, teplotnímu prostředí, metamorfismu, tektonice, vulkanismu a proudu času tak rozmanité, že generalizace nevyhnutelně zatemňuje se zdánlivou jasností jeden z nejsložitějších jevů vyvřelé petrologie. Není divu, že názory na vznik granitických hornin fluktuovaly ve všech směrech

a že periodicky exploduje kontraverze, jak tomu bylo z podnětu Readova ve 40. letech“. Lze tedy konstatovat, že existuje rozpor mezi formou výskytu granitických hornin a mezi příčinami, podstatou jejich vzniku. Forma výskytu je velmi rozmanitá; planetární charakter jevu naopak hovoří ve prospěch jednotné příčiny, jednotné podstaty jevu. (Na tom nic nemění skutečnost, že se shora uvedení přední badatelé nevyjadřují ke generalizaci právě příznivě). Tento nesoulad mezi rozmanitou formou výskytu a pravděpodobnou jednotnou podstatou i příčinou jevu vede ke sporným interpretacím a možno v něm vidět jednu z dalších příčin granitového problému. Proto asi ještě řada autorů bude i v budoucnosti nadepisovat články k tomuto problému obdobně jako Malardoda (1970): „Granit: jedna hornina a mnoho problémů“.

VÝBĚR Z LITERATURY

- Bussell, M. A. 1976: Fracture control of high-level plutonic contacts in the Coastal Batholith of Peru. *Proc. Geol. Assoc. (London)*, 87, s. 237—246.
- Bussell, M. A. — Pitcher, W. S. — Wilson, P. A. 1976: Ring complexes of the Peruvian Coastal Batholith: a long-standing subvolcanic regime. *Canad. J. Earth Sci.*, 13, s. 1020—1030.
- Cambel, B. — Kamenický, L. — Klomínský, J. — Palivcová, M. 1980: Petrochemical correlation of granitoids of the Bohemian massif and the West Carpathians. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 31, s. 2—26.
- Carmichael, I. S. E. — Turner, F. J. — Verhoogen, J. 1974: *Igneous petrology*. New York etc., MacGraw Hill, 739 stran.
- Cobbing, E. J. — Pitcher, W. S. 1972: The Coastal Batholith of Central Peru. *J. Geol. Soc. London*, 128, s. 421—460.
- Demay, A. 1953: Sur la structure et al genèse de quelques types de microgranites et d'aprites et des granites, présentant quelques caractères microgranitiques. *19th Int. geol. Congr. Algiers*, 6, s. 139—151.
- Eskola, P. E. 1932: On the origin of gra-

- nitic magmas. *Mitt. Mineral. Petrogr.*, 42, s. 455—481.
- Frich-Char, D. I. 1977: Kristalizacija magmatičeskogo stekla i nekotorye voprosy petrogenezisa. *Moskva, AN SSSR, Izd. Nauka*, 119 str.
- Hall, A. 1971: The relationship between geothermal gradient and the composition of granitic magmas in orogenic belts. *Contr. Mineral. Petrology*, 32, s. 186—192.
- Hall, A. 1972: New data on the composition of Caledonian granites. *Mineral. Mag.*, 38, s. 847—862.
- Ishihara, S. 1977: The magnetite-series and the ilmenite-series granitic rocks. *Min. Geol. (Tokyo)* 27, s. 293—305.
- Ivanova, G. F. — Butuzova, Ye. G. 1968: Distribution of tungsten, tin and molybdenum in the granites of Eastern Transbaykalia. *Geochem. Int.*, 5, s. 572—583.
- Klomínský, J. — Dudek, A. 1978: The plutonic geology of the Bohemian Massif and its problems. *Sbor. geol. Věd, Geol.* 31, s. 47—69.
- Klomínský, J. — Palivcová, M. — Cambel, B. — Gurbanov, A. G. 1981: Petrochemical correlation and I/S classification of Variscan granitoids from the Czech massif, West Carpathians (Czechoslovakia), and the Caucasus Mts. (USSR). *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 32, 3, s. 307—315.
- Leake, B. E. 1978: Granite emplacement: the granites of Ireland and their origin. In: Bowes, D. R. — Leake, B. E. (eds.): *Crustal evolution in northwestern Britain and adjacent regions. Spec. Iss. Geol. J.*, 10, s. 221—248.
- Lutč, B. G. 1975: Chimičeskij sostav kontinentalnoj kory i verchnej mantii Zemli. *Moskva, Nauka*, 166 stran.
- Lutč, B. G. 1974: Petrologija glubinných zon kontinental'noj kory i verchnej mantii. *Moskva, Nauka*.
- Malaroda, R. 1970: Il granito: una rocca e molti problemi. *Boll. Assoc. miner. subalpina*, VII, s. 621—674.
- Palivcová, M. — Cimbálníková, A. — Hejl, V. 1978: Problemy formacionogo analiza granitoidov Češskogo massiva. *Geol. Zbor. Geol. carpath.* 29, 1, s. 43—66.
- Palivcová, M. 1984a: Bowenovo dílo „Evolution of igneous rocks“ po padesáti letech. *Čas. Mineral. Geol.*, 29, 4.
- Palivcová, M. 1984b: Basic series of an “Andinotype batholithic association” in the Variscan Central Bohemian Pluton. *Geol. Zbor. Geol. carpath.*, 35, s. 39—60.
- Pitcher, W. S. 1970: Ghost stratigraphy in intrusive granites: a review. In: Newall, G., Rast, N. (eds.): *Mechanisms of igneous intrusion. Spec. Iss. Geol. J.*, 2, s. 123—140.
- Pitner, W. S. 1974: The Mesozoic and Cenozoic batholiths of Peru. *Pacif. Geol.*, 8, s. 51—62.
- Pitcher, W. S. 1975: On the rate of emplacement of batholiths. *J. Geol. Soc. London*, 131, s. 584—591.
- Pitcher, W. S. 1978: The anatomy of a batholith. *J. Geol. Soc. London*, 135, s. 157—182.
- Pitcher, W. S. 1979: The nature, ascent and emplacement of granitic magmas. *J. Geol. Soc. London*, 136, s. 627—662.
- Pitcher, W. S. — Berger, A. R. 1972: The geology of Donegal: a study of granite emplacement and unroofing. *London, Wiley Interscience*, 435 stran.
- Pitcher, W. S. — Bussell, M. A. 1977: Structural control of batholith emplacement in Peru: a review. *J. Geol. Soc. London*, 133, s. 249—256.
- Raguin, E. 1957: Géologie du granite. *Paris, Masson*; 1965 *English transl. New York, Interscience Wiley*, 314 stran.
- Sattran, V. — Klomínský, J. 1970: Petrometallogenic series of igneous rocks and endogenous ore deposits in the Czechoslovak part of the Bohemian Massif. *Sbor. geol. Věd, ložisk. Geol. Mineral.*, 12, s. 65—154.
- Šfovíčková, N. 1973: Hlubinná zlomová tektonika a její vztah k endogenním geologickým procesům. *Studie NČSAV, Praha*, 198 stran.
- Yoder Jr. H. S. 1979: The evolution of igneous rocks. Fiftieth anniversary Perspectives. *Princeton Univ. press*, 587 stran.
- Chappel, B. W. — White, A. J. R. 1974: Two contrasting granite types. *Pacif. Geol.*, 8, s. 173—174.