

Diapirizmus, najmä granitoidný, a možné súvislosti

JÁN BABČAN

Geologický ústav UK, Zadunajská 15, 811 00 Bratislava

(14 obr., 2 tab. v texte)

Doručené 25. 5. 1979

Диапиризм (особенно гранитный) и возможные связи

В работе обосновано значение диапировой формы транспорта материалов. На основании анализа диапиризма каменной соли приходим к аналогии с гранитоидными и другими диапирами на определённом этапе их перемещения, когда они передвигаются в пластическом состоянии, без наличия расплавов. Различный способ внедрения гранодиоритовых диапиров замечается при их различном действии на окружающие породы. Это может быть причиной, почему гранитоидные породы являются один раз стерильные, другой раз рудоносные.

Diapirism, mainly of granitoids and possible connections

The paper emphasizes the importance of diapiric forms of the mass transport. An analysis of the physical substance of rock salt diapirism reveals analogies between the latter and that of granitoids and other diapirs in certain phases of their emplacement when intrusive bodies move in plastic state without the participation of melts. The different manner of penetration of granitoid diapirs is manifested by their different action on surrounding rocks what may explain why represent the granitoids at places sterile rock masses but ore-bearing massifs at different occasions.

Málokto si uvedomuje, že premiestňovanie zložiek endogénnych procesov, endogénna migrácia látok patrí medzi najdôležitejšie a pritom najzložitejšie geochemické, ale aj všeobecné geologické procesy. Zvykli sme si dosť jednostranne sa uspokojovať s opisom migrácie látok, najmä v geochemických súvis-

lostiach, tak ako ho svojho času podal ešte A. E. Fersman a rozšíril najmä A. A. Saukov (1954). Zdôrazňujeme pritom vnútorné a vonkajšie faktory migrácie prvkov, ale zabúdame na podstatu migrácie a vôbec na možnosti uplatnenia sa jednotlivých spôsobov migrácie látok v procesoch endogénne-

ho vzniku hornín, rúd a pod.

Vezmime si napr. migráciu látok z hlbších zón zemskej kôry alebo z plášťa. Tu už treba riešiť iné otázky a iné súvislosti, o ktorých sa, pochopiteľne, za čias Fersmana uvažovalo ináč ako dnes.

Pre migráciu látok v dimenzii spodná kôra — vrchná kôra alebo plášť — kôra sa dnes prichádza s teóriou diapirického premiestňovania alebo prenikania. Diapirizmus pôvodne predstavoval premiestňovanie tuhých látok spôsobom zodpovedajúcim vlastne tečeniu. Dnes sa do diapirizmu zaraďuje aj premiestňovanie tavenín. Všeobecne však diapirizmus, a to tak tuhých látok, ako aj tavenín nie je všestranne teoreticky podložený.

V tomto príspevku sa pokúsime zhrnúť niektoré doterajšie teoretické závery o diapirizme, zovšeobecniť ich a využiť na vysvetlenie niektorých geologických javov.

Diapirizmus ako geologický proces

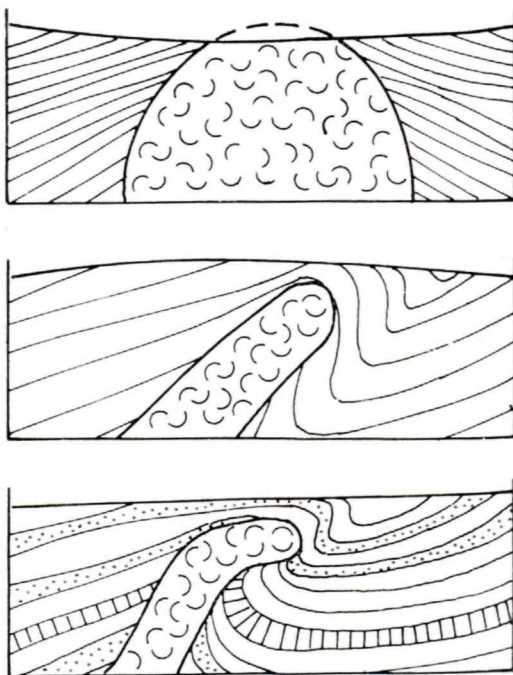
Termín diapirizmus zaviedol do geologickej praxe už v roku 1910 rumunský geológ českého pôvodu L. Mrazec (A. Holmes 1965). Termín je od gréckeho slova *διαπειρω*, v doslovnom preklade prerážam. Pôvodne sa pod pojmom diapirizmus rozumel osobitný typ vrásnenia spočívajúci v prerážaní vyšších vrstiev, zvyčajne v antiklinále, hlbšie ležiacimi, plastickejšími vrstvami antiklinálneho jadra. L. Mrazec odvodil tento typ procesov z rumunských soľných ložísk (obr. 1). Soľné diapíry najrozmanitejších tvarov boli opísané z rôznych miest, niektoré dokonca z relatívne veľkej hĺbky oceánov, napr. v Mexickom zálive z hĺbky 4000 m atď.

Podrobné pozorovania soľných diapírov ukázali, že sa diapirizmus na procesy vrásnenia neviaže. Na základe experimentov T. J. Parkera a A. N. McDovella (1955), uskutočnených na

sústave asfalty — íly, sa dnes diapirizmus vysvetľuje ako prerážanie alebo výstup plastických alebo ľahších hornín menej plastickými horninami vyvolaný tlakom nadložia, nadložných vrstiev.

Popri soľných diapíroch boli opísané aj tzv. bahenné diapíry, napr. z ústia rieky Mississippi v Mexickom zálive, ďalej z ústia rieky Sv. Magdalény v Karibskom mori na území Venezuely atď. Ich vznik sa vysvetľuje ako vytlačanie ílu, ktoré spôsobuje nadložný piesok hromadený v ústiach riek. Piesok spôsobuje lokálne preťaženie ílových sedimentov, ktoré vo forme diapíru (niekedy majú priemer až niekoľko sto metrov) prerážajú nadložné piesočné vrstvy a môžu sa dostať až nad vodnú hladinu.

Istou geologickou osobitosťou sú ľadové diapíry, tvoriace sa pri výstupe



Obr. 1. Niektoré typy soľných diapírov podľa L. Mrazeca (1915)

Fig. 1. Some types of salt diapirs according to L. Mrazec (1915)

spodnej vody vrstvami večne zamrznutej zemskej pôdy, napr. v Kanade a na Sibíri. V ústí rieky Mackenzie v severovýchodnej Kanade sa takéto útvary označujú ako pingos. Dosahujú výšku až 40 m, na úpätí majú priemer až 300 m (A. Holmes, l. c.).

Isté analógie, najmä v tvare, aké nachádzame medzi soľnými a granitoidnými pňami, viedli už v minulosti k myšlienke pokladať aj granitoidné intrúzie za diapíry. Podobnosť ich vzniku sa odvodzovala z podobnosti tvarov, a teda z pravdepodobnosti rovnakého formovania, predovšetkým na princípe vytlačovania. Ale podstata granitoidného diapirizmu je iná, pretože podľa doterajších náhľadov, v prípade granitoidných, ale aj iných diapírov ide výhradne o výstup tavenín alebo aspoň materiálu obsahujúceho istý podiel taveniny (P. J. Vyllie 1971, J. Verhoogen et al. 1970), zatiaľ čo pri soľných diapíroch by mala vystupovať len tuhá soľ.

Dnes sa v súvislosti s novými tektonickými teóriami uvažuje o podstatne širšom uplatnení sa diapirizmu. Diapirizmus by mal vysvetľovať dopĺňanie materiálu v riftových zónach a mal by byť vo všeobecnosti jedným z najdôležitejších prejavov komunikačného spojenia, napr. medzi plášťom a zemskou kôrou. Je samozrejmé, že na tomto úseku je ešte veľa problémov, veď ani soľný diapirizmus nie je doteraz zo všetkých stránok teoreticky vysvetlený.

Diapirizmus kamennej soli a jeho fyzikálna podstata

Popri diapirických útvaroch menšieho, lokálneho významu, aké poznáme napr. z niektorých stassfurtských ložísk, sú veľké diapírové pne a dómy kamennej soli známe z rozličných miest zemskeho povrchu. Väčšina soľných diapírov sa končí pod zemským povrchom,

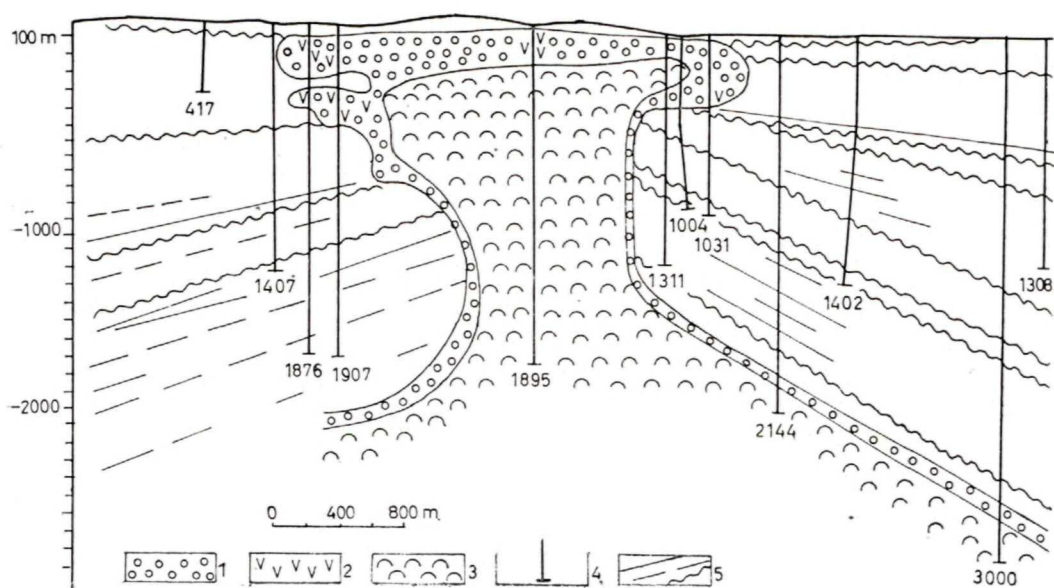
len pomerne málo ich prerazilo až na povrch. Pne a dómy kamennej soli nemajú rovnaké rozmery a ich priemer je od niekoľko sto metrov do 6 aj viac kilometrov. Napr. na pobreží Labradoru sa zistilo niekoľko veľkých soľných dómov a najväčší z nich má priemer 12 km.

Vrstvy alebo základne, z ktorých soľné diapíry vystupujú, nie sú doteraz tak detailne preskúmané ako samostatný výskyt diapírov. Prekvapujúce je, že väčšinou ide o hĺbku okolo 3000, ale aj viac metrov. Tak napr. v depresii Sixbye v Mexickom zálive v hĺbke 3510 m (L. Don Leet — S. Judson 1971) vyčnieva nad dnom mora soľný peň pokrytý rozmanitými sedimentmi, ktorý má podľa geofyzikálnych meraní základňu v hĺbke viac ako 3000 m.

Na ruskej tabuli neďaleko od Kyjeva sa zistil a detailne geologicky a seizmicky preskúmal väčší počet soľných pňov. Schematický profil jedného z nich s vyznačenými štruktúrami je na obr. 2. Pôvodná vrstva soli tu vystupuje z hĺbky okolo 2500 až 3000 m. Z približne rovnakej hĺbky vystupujú ďalšie pne tejto oblasti. Z nich napr. gesenský a lejskovský vychádzajú zo spoločného súvrstvia, pričom vlastné soľné diapíry sú od seba vzdialené okolo 28 km (E. M. Ljutkevič 1975).

Na severoamerickom pobreží Louisiany boli asi 16 km od ústia rieky Mississippi zistené 3 soľné pne (obr. 3) vyrastajúce zo spoločného základu. Základňa diapíru je v hĺbke okolo 5000 m, vzdialenosť krajných diapírov presahuje 40 km.

V Perzskom zálive je zistených viac ako 200 soľných diapírov, niektoré sú v mori, iné na iránskom pobreží. 80 z nich vychádza na povrch a väčšinou prerážajú mezozoické a terciárne vápence. Denudovaný biely povrch diapírov pripomína vzhľadom ľadovce. Niektoré soľné diapíry tu majú v prie-



Obr. 2. Seizmický a geologický profil romenského soľného pňa (E. M. Ljutkevič 1975)

1 — nerozčlenené brekcie, 2 — diabázy, diabázové brekcie, 3 — kamenná soľ, 4 — vrty, 5 — stratigraficky nesúhlasné vrstvy

Fig. 2. Seismical and geological profile of the Romenian salt diapir (E. Lutkevich 1975)

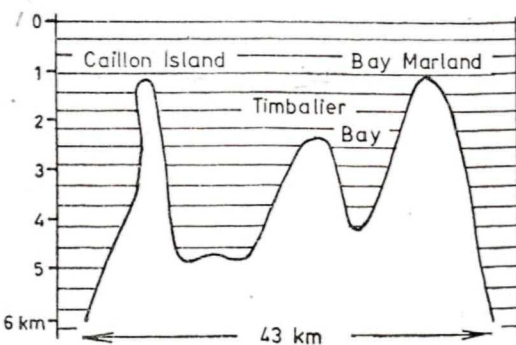
1 — undifferentiated breccia, 2 — diabase, diabase breccia, 3 — rock salt, 4 — drilling, 5 — discordant beds

mere viac ako 6,5 km a dosahujú výšku vyše 1200 m n. m.

Zo všetkých štruktúrnych a textúrnych znakov soľných diapirov vychodí, že sa soľ pri migrácii neroztavila ani nerozpustila, že sa musela premiestniť tečením v tuhom stave. V praxi sa tento stav označuje ako plastický, ale to presne nevystihuje podstatu vlastného procesu tečenia týchto útvarov. Teoreticky azda obstoí iba konštatovanie, že kamenná soľ „tečie“ vďaka svojej väčšej plasticite v porovnaní s nadložnými a okolnými horninami, pričom jej tečenie je výsledkom pôsobenia tlaku týchto hornín.

Na vysvetlenie podstaty tečenia tuhých látok si treba pripomenúť niektoré fyzikálne poučky. Tuhé látky, ako je známe, pri zaťažení tlakom môžu v podstate podľahnúť trom druhom deformácií. Pri pružnej deformácii tuhé teleso

pôsobením tlaku zmenší svoje rozmery a zmení tvar, ale po zrušení tlaku nadobudne pôvodný stav. Plastická deformácia nastupuje spravidla po pružnej a znamená trvalú zmenu rozmerov



Obr. 3. Schématické znázornenie sústavy soľných diapirov v oblasti Luisiany, USA (A. Holmes 1952)

Fig. 3. Schematic presentation of salt diapir system in Luisiana, U. S. A. (A. Holmes 1952)

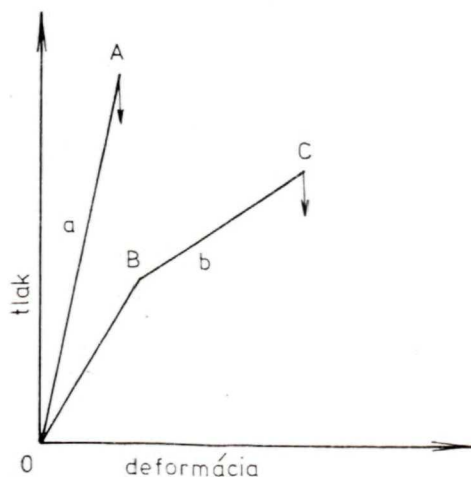
a tvaru, ale kompaktnosť materiálu, podmienená väzbami medzi časticami telesa, sa zachováva. Ak sa poruší kompaktnosť materiálu, nastáva tretia deformácia — deštrukcia, rozrušenie. Závislosť tlak — deformácia v jednotlivých prípadoch zmien schematicky znázorňuje obr. 4.

Materiály, ktorých závislosť medzi tlakom a deformáciou má tvar krivky *a*, sú v oblasti *O — A* pružné a v bode *A* nastáva ich deštrukcia. Deštrukcia sa môže prejavíť vznikom trhlín, rozpadom agregátu na menšie častice, medzizrnovým posunutím častíc atď. Krivka *b* zodpovedá materiálu, ktorý je v oblasti *O — B* pružný a v bode *B* sa stáva plastickým. Bod *C*, podobne ako bod *A* na krivke *a*, zodpovedá deštrukcii materiálu a charakterizuje vlastne jeho pevnosť. Bod *B* sa označuje ako tzv. prah tečenia, body *A* a *C* zodpovedajú medzi pevnosti daných materiálov.

Podstata pružnej deformácie tuhých látok sa vysvetľuje napätím vyvolaným pôsobením tlaku na väzby medzi elek-

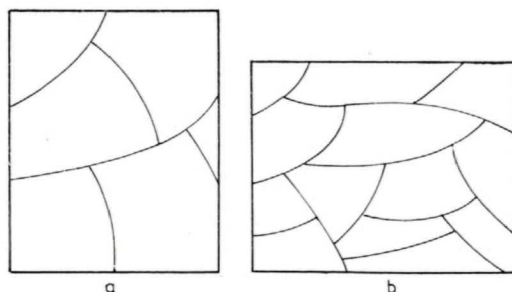
trónmi a atómami kryštálových štruktúr. Po uvoľnení tlaku napätý stav mizne a teleso sa vracia do pôvodného stavu. Pri kovoch a tuhých kryštalických látkach možno pružnú deformáciu vypočítať zo zmenených medzirovinných a medzivrstvových vzdialeností.

Plastickú deformáciu označovanú ako tečenie na rozdiel od pružnej deformácie nepodmieňuje zmena vzdialeností stavebných častíc tuhých látok a ani celkový objem sa pri nej nemení. Pri plastických deformáciách kryštalických látok, napr. kovov (obr. 5), sa mení štruktúra, a to niekoľkými základnými spôsobmi. Translačné posunutie jednotlivých častí kryštálov je výsledkom pôsobenia tlaku na istý kryštalografický smer tuhej látky. Štruktúrna mriežka sa tu nemení.



Obr. 4. Schematické znázornenie závislosti tlak — deformácia tuhých telies (podrobnosti v texte)

Fig. 4. Schematic presentation of relations between pressure and deformation in rigid bodies (explanation in the text)



Obr. 5. Pribeh plastickej deformácie kovov
Fig. 5. The course of plastic deformation of metals

Pre niektoré kryštály je základným typom plastickej deformácie zdvojčatenie, pri iných vznik rozličných typov posunu, resp. sklzu, napr. rotačného, translačného alebo rotačného s translačným a pod., ktorého výsledkom môžu byť ohnuté kryštály atď. Tento typ deformácie sa na röntgenografických záznamoch zvyčajne prejavuje rozmazaním sŕp.

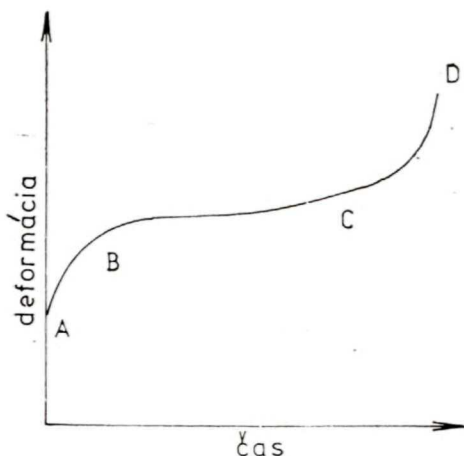
Pri teplote blízkej bodu topenia tuhých látok môže nastať deformácia spôsobená procesom samodifúzie, pri ktorej

sa v smere pôsobenia tlaku látka rozkladá alebo rozpúšťa a uvoľnené častice sa difúzne premiestňujú do nezaťaženého smeru.

V polykryštalických látkach, akými sú napr. horniny, závisí plastická deformácia od plastických deformácií jednotlivých kryštálov či zŕn a od vlastností medzikryštalických vrstiev (tmelu). V horninách sa plasticita môže prejavovať v plastických zmenách jednotlivých ich minerálov, ako aj vo vzájomných sklzoch minerálnych zŕn tvoriacich horninu.

Vplyv teploty na všetky tri druhy deformácií tuhých telies sa dá logicky očakávať a vysvetliť. Celková pevnosť, a teda deštrukčná deformácia, sa so stúpajúcou teplotou posúva k nižšiemu tlaku. Podobne sa mení aj pružnosť telies. Plasticnosť sa pri zohrievaní vždy zvyšuje tak, že so stúpajúcou teplotou schopnosť tečenia tuhých materiálov vzrastá, ale celkove sa medze tečenia znižujú (posúvajú k nižšiemu tlaku). Vychodí to z faktu, že rastúca teplota uľahčuje priebeh všetkých procesov spätých s plastickou deformáciou.

Všetky tri druhy deformácie tuhých látok, teda pružnej, plastickej a deštrukčnej, sú vo vzťahu ku geologickým materiálom závislé od druhu materiálu, teploty, času, všestranného tlaku a v prípade hornín aj od tlaku pórovej výplne. Z toho vyplýva, že pružnosť, pevnosť ani plasticita nie sú pre horniny jednoznačnými veličinami. Príčiny názorne vysvetľuje obr. 6. Pri konštantnom tlaku môže závislosť deformácia — čas nadobudnúť všetky tri spomínané druhy. Bod A zodpovedá okamžitej pružnej deformácii materiálu. Úsek A — B sa nazýva úsekom nestacionárneho alebo primárneho tečenia, úsek B — C je úsekom pseudoviskózneho alebo sekundárneho tečenia prebiehajúceho s konštantnou rýchlosťou. V bode C sa začína úsek zrýchleného tečenia, ktorý sa končí de-



Obr. 6. Schematické znázornenie závislosti deformácia — čas pri tuhých telesách pri konštantnom tlaku (podrobnosti v texte)

Fig. 6. Schematic presentation of the relation between deformation and time in the rigid bodies at constant pressure (explanation in the text)

štrukciou materiálu v bode D.

Zo znázornenia vychodí, najmä vo vzťahu ku geologickým materiálom, mimoriadne veľká úloha časového faktora. Pre javy diapirizmu sú iste významné najmä úseky A — B — C, ktoré znamenajú, že pri nemeniacom sa tlaku môžu nastať veľké plastické deformácie geologických objektov pri dostatočne dlhom časovom priebehu. V. Menzel a V. Schreiner (1975) zistili na vzorkách priemernej stassfurtskej soli veľmi zaujímavé údaje o vzájomnej súvislosti relatívnej deformácie vzoriek (ϵ), času a použitého tlaku (obr. 7). Krivky potvrdzujú jednak súvislosť medzi veľkosťou deformácie a pôsobením tlaku, jednak uvedené súvislosti medzi veľkosťou deformácie, teda prakticky tečenia, a času.

Z predchádzajúcich úvah sa dá vyvodiť konštatovanie aplikovateľné najmä na geologické objekty, že všesmerný tlak znižuje efekt prakticky všetkých typov deformácií pri ináč rovnakom tlaku, ako to vyplýva z obr. 8. V prírode

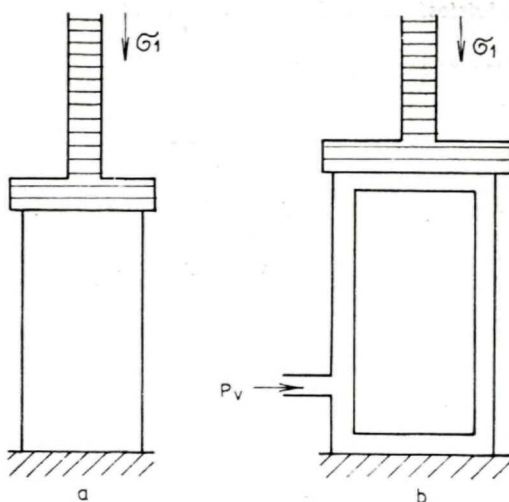
sú tieto javy evidentné. Preto sa deformačná charakteristika hornín, minerálov a pod. udáva pomocou tzv. diferenciálneho tlaku $\Delta\sigma$ vypočítaného zo vzťahu

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - P_v$$

kde $\Delta\sigma$ je diferenciálny tlak, σ_1 celkové zaťaženie skúšanej vzorky jednostranným tlakom a P_v všesmerný tlak.

V tab. 1 sú údaje o okamžitom pôsobení diferenciálneho tlaku na NaCl pri rozličnom všesmernom tlaku a pri nerovnakej teplote. Údaje sú doplnené aj hodnotami pre medzu pevnosti skúšaného materiálu.

Pórový tlak alebo tlak plyných a kvapalných látok uzavretých v póroch horniny (P_p) pôsobí proti všesmernému tlaku. Pri presnom hodnotení diferenciálneho tlaku sa pórový tlak zisťuje v nezataženej hornine a vo vzorci pre diferenciálny tlak sa prejavuje v aditívnej forme čiže



Obr. 8. Vplyv všesmerného tlaku na efekt deformácie tuhých telies a — pôsobenie jednostranného tlaku σ_1 , b — pôsobenie všesmerného tlaku P_v a jednostranného tlaku σ_1

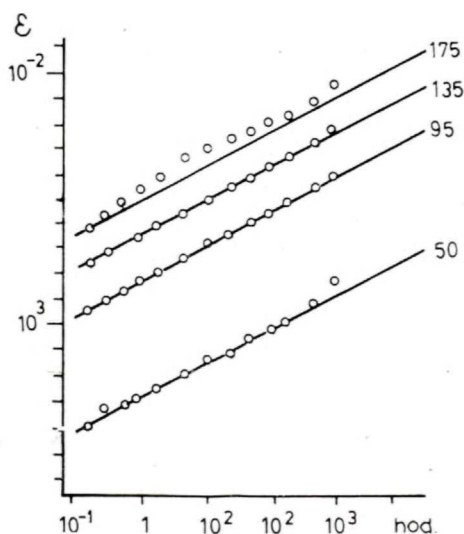
Fig. 8. The influence of hydrostatic pressure on the effect of deformation of rigid bodies a — effect uniaxial compression σ_1 , b — effect of hydrostatic pressure P_v and of uniaxial compression σ_1

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - P_v + P_p$$

Plastické deformácie látok sa vyjadrujú zložitými exponenciálnymi vzťahmi. Veľmi názorne sa tieto deformácie dajú vyčítať z kriviek závislosti diferenciálny tlak — stupeň deformácie. Obr. 9 znázorňuje priebeh deformácie vzoriek syntetického NaCl zostrojený na podklade údajov tab. 1.

Z grafu sú zreteľné všetky spomenuté súvislosti. Vyšší všesmerný tlak a nižšia teplota posúvajú plasticitu alebo tečenie kamennej soli k vyšším hodnotám diferenciálneho tlaku a naopak. Na veci nič nemení fakt, že sa v grafoch za základ zobrali hodnoty pre syntetickú soľ. Prírodné vzorky soli, ako to ukazuje tab. 1, majú príslušné hodnoty podstatne vyššie.

Doteraz sme si vysvetlili príčiny a javy, ktoré diapirizmus kamennej soli vyvolávajú. Tečenie kamennej soli pod-



Obr. 7. Krivky závislosti relatívnej deformácie stassfurtskej soli a času (V. Menzel — V. Schreiner 1975)

ε — relatívna deformácia = l/l_0 , čísla pri krivkách zodpovedajú použitému tlaku 10^5 Pa

Fig. 7. Graphs of dependence between relative deformation in Stassfurt rock salt and time (V. Menzel — V. Schreiner 1975)

ε — relative deformation = l/l_0 , numbers at curves mean the used pressure = 10^5 Pa

Závislost deformácie NaCl od teploty, všesmerného a diferenciálneho tlaku, medza pevnosti (D. Handin 1966)

Dependence of NaCl deformation upon temperature, hydrostatical and differential pressure, compressive strenght (D. Hadin 1966)

Tab. 1

Teplota °C	Všesmerný tlak 10 ⁵ Pa	Diferenciálny tlak 10 ⁵ Pa				Medza pevnosti 10 ⁵ Pa	Celková deformácia %
		deformácia (%)					
		1	2	5	10		
24 ¹	0	50	100	260		260	7,7
	25	60	130	220	380	440	21,8
	100	170	370	540	680	770	28,2
	530	310	480	600	740	830	40
	1180	390	540	750	840	1080	70
	2850	540	620	840	1040	1180	15,1
24 ²	1010	110	150	220	300	580	30,5
150	1010	80	100	140	180	260	23,6
24	2020	140	160	230	320	630	29,3
150	2020	90	110	140	190	330	28,2
300	2020	80	90	90	90	100	30,8

¹ Prirodzená soľ, Texas

² Syntetická soľ

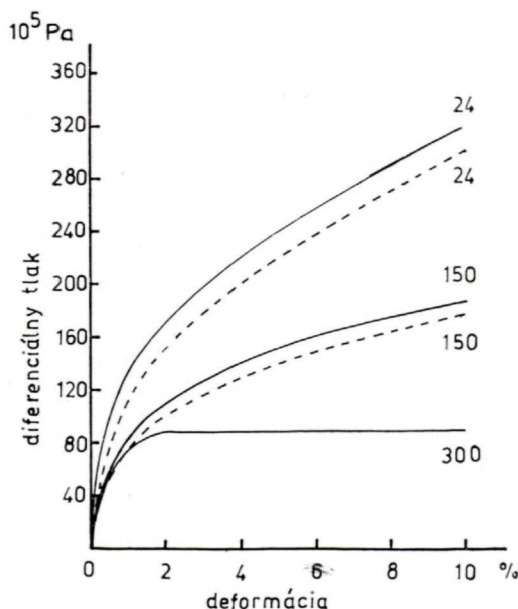
¹ — natural salt, Texas

² — synehtic salt

mieňujú plastické vlastnosti kryštálov NaCl pri ich zaťažení tlakom. Zo súvislosti medzi výsledkami pôsobenia všesmerného a diferenciálneho tlaku vychodí, že kamenná soľ môže tiecť len

tým smerom, ktorým sa môže plasticky deformovať, čiže v horninovom systéme len vo smere oslabeného pôsobenia tlaku (obr. 10).

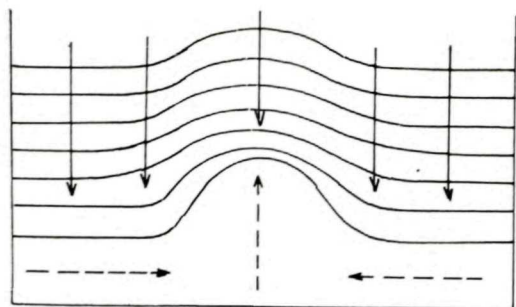
Takýmto miestom oslabeného tlaku je miesto výstupu diapíru. Dnes sa vedú spory o tom, či toto oslabené miesto je prirodzeným slabým miestom, napr. v systéme sedimentov, alebo je dôsledkom tektonickej poruchy. Vzhľadom na iné možné diapíry, napr. bahenné alebo granitoidné, môžu byť pravdepodobné obidva dôvody.



Obr. 9. Grafické znázornenie deformácie syntetického NaCl v závislosti od diferenciálneho a všesmerného tlaku a teploty

Prerušované krivky sú pre všesmerný tlak 101 MPa, neprerušované pre 202 MPa, čísla pri krivkách udávajú teplotu skúšok, podklady na zostrojenie grafu sú z tab. 1

Fig. 9. Graphical plot of deformation of synthetic NaCl depending on the differential and hydrostatic pressure and temperature. Intermittent curves indicate hydrostatic pressure of 101 MPa, continuous curves mean 202 MPa, numbers at curves represent the temperature used at tests. The graph is plotted from data in Tab. 1



Obr. 10. Schematické znázornenie pôsobenia tlakov v priebehu diapirizmu

Fig. 10. Schematic presentation of pressure effects during diapirism

V odbornej literatúre sa často stretávame s údajmi napr. o tlakoch, pri ktorých kamenná soľ tečie. Z poznatkov, ktoré sme sústredili, vyplýva, že niekedy ide o dosť skreslené údaje, pretože zvyčajne neberú do úvahy také dôležité faktory, ako je teplota a čas. Tieto faktory majú v geologických podmienkach, a to práve vo vzťahu k tvorbe diapírov, a, ako uvádzame neskoršie, nielen pri kamennej soli, neobyčajný význam.

Tlakové podmienky výstupu diapíru kamennej soli sa zatiaľ hodnotia veľmi ťažko. Podľa obr. 10 jednoznačnú hodnotu zodpovedajúcu litostatickému tlaku majú nadložné vrstvy sedimentov nad vrstvou kamennej soli a nad vystupujúcim diapírom. Tlak vystupujúceho solného pňa má charakter priestorového vektora, pričom v centrálnej časti diapíru môže výsledný tlak dosahovať značné hodnoty. Nejde už len o tlak rovnajúci sa litostatickému tlaku nadložných hornín, ale aj o prekonanie ich pevnosti a súdržnosti.

Z časového sledovania veľkosti deformácie vyplýva, že sa so vzrastajúcim časom deformácia zväčšuje, a z toho ďalej vychodí, že rovnaký deformačný účinok možno vyvolať nižším tlakom, ak pôsobí dlhší čas. Z toho sa dá vyvodiť aj záver, že rozbehnutý diapirický aparát môže mať relatívne veľkú zotrvačnosť a v prípade kamennej soli vy-

svetľuje pomerne ľahké premiestňovanie soľnej masy.

V súvislosti s pohybom diapíru treba ešte zdôrazniť jednu dôležitú spojitosť, a to trenie, ktoré deformáciu sprevádza. Trenie produkuje teplo, zvýšená teplota uľahčuje deformácie, znižuje viskozitu pohybujúcej sa soli, čo sa opäť priaznivo premieňa v diapirickom procese.

Granitoidný diapirizmus

Diapirizmom kamennej soli, jeho podstatou a niektorými súvislosťami sme sa zaoberali pomerne širšie, a to preto, aby sme získané poznatky mohli použiť ako modelové na vysvetlenie diapirických javov pri granitoidných intrúziách, najmä preto, že takých pomerne presvedčujúcich poznatkov, aké sme mali pri kamennej soli, pri granitoidoch prakticky niet.

Termín diapirizmus vo vzťahu ku granitoidným horninám po prvý raz použil C. E. Wegmann v r. 1930. Nehľadiac na to, že jeho vysvetlenie granitizačných procesov má obmedzený význam, patrí Wegmannovi v tomto smere priorita. Veď téměř všetky intrúzie granitoidných hornín zobrazené na rozličných rezoch a schémach už na prvý pohľad veľmi pripomínajú diapíry kamennej soli. Pretože rozšírenie a tvar granitoidných intrúzií sú všeobecne známe, nebudeme sa výskytom granitoidných diapírov podrobnejšie zaoberať, ale ako zvláštnosť pripomenieme geofyzikálnymi meraniami overenú sústavu granitoidných intrúzií Cornwallskej vrchoviny a blízkych ostrovov (obr. 11).

Pred diskusiou o širších súvislostiach granitoidného diapirizmu uvedieme niektoré údaje o mechanických vlastnostiach granitoidných hornín. V tab. 2 je niekoľko údajov o pevnosti a deforma-

Závislosť deformácie niektorých granitoidných hornín od teploty, všesmerného a diferenciálneho tlaku, medza ich pevnosti (D. Handin 1966)

Dependence of deformation of some granitoid rocks upon temperature, hydrostatical and differential pressure, compressive strenght (D. Handin 1966)

Tab. 2

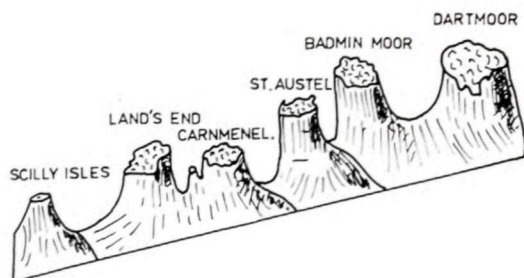
Druh horniny	Teplota °C	Všesmerný tlak 10 ⁵ Pa	Diferenciálny tlak 10 ⁵ Pa				Pevnosť 10 ⁵ Pa	Cel- ková deforma- cia ‰
			deformácia (‰)					
			1	2	5	10		
granit Silver Plan.	150 500	1010 5050	1 470 2 490	3 010 5 150	8 100	7932	3 290 8 280	2,7 17,0
granit Wasterlay	24	5070	7 250	14 700	19 800		20 800	6,4
	300	5070	6 080	11 680	16 190		16 600	8,1
	500	5070	6 030	9 000	11 250	9950	11 290	23
	800	5070	2 500	4 750	6 150	6050	6 200	15
granodiorit St. Claud Min.	150 500	1010 5070	1 470 3 230	3 600 6 090	9 250	9270	8 220 9 320	3,7 19,2
kremeň (II c.)	24	0	7 000	14 000			25 000	4,8
	24	2580	12 500	24 000			51 000	4,8
	24	5070	14 500	28 000			52 000	4,3
	500	5070	8 200	16 500			30 000	4,8
	600	5070					19 000	4
	800	5070	7 500	12 600	14 000		20 000	12,4

ciach granitoidných hornín sledovaných podobným spôsobom ako pri kamennej soli.

Z údajov tabuľky treba zdôrazniť niekoľko pozoruhodností. Rozdiely medzi hodnotami deformácie dvoch vzoriek granitov sú dosť veľké, ale podobný jav možno zaregistrovať aj pri NaCl a iných typoch hornín. Pre obme-

dzený počet základných údajov nemôžno jednoznačne tvrdiť, že napr. granodiorit vykazuje všeobecne väčšiu pevnosť, ako aj celkovú deformovateľnosť ako granit. Veľmi zaujímavé sú rozdiely v deformáciách medzi kremeňom ako podstatnou zložkou granitov a granodioritov a týmito horninami, najmä pri vyšších hodnotách všesmerného tlaku.

O plasticite granitu, a tým aj možnosti jeho tečenia sa dá usudzovať z grafického znázornenia závislosti diferenciálny tlak — deformácia na obr. 12. Je pochopiteľné, že vyššia teplota plasticitú deformáciu granitu podstatne zväčšuje a podmieňuje tak jeho tečenie. Granit môže podľa týchto údajov „tiecť“ aj v neroztavenom stave podobne ako kamenná soľ, čiže granitový diapir môže vnikáť do oslabených miest iných komplexov hornín bez toho, že by vo svojom okolí vyvolával javy kontaktného metamorfizmu, aké očakávame pri

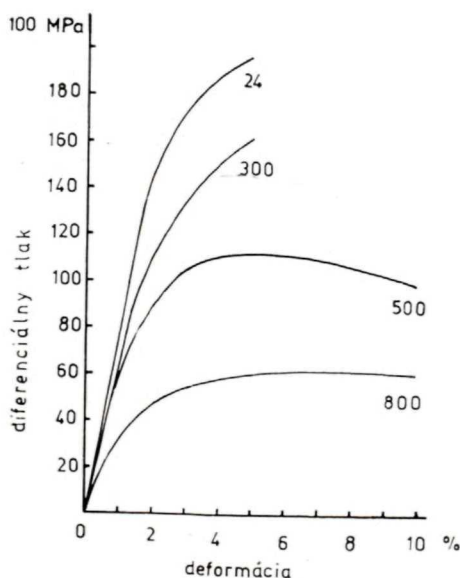


Obr. 11. Granitoidné intrúzie v Cornwalle a Devone (A. Holmes 1965)

Fig. 11. Granitoid intrusive bodies in Cornwall and Devonshire (A. Holmes 1965)

pohybe granitoidnej magmy, teda taveniny. Ako je známe, zaznamenali sa aj prípady stykov žula — okolné horniny a takéto konštatovanie môže tento jav vysvetľovať.

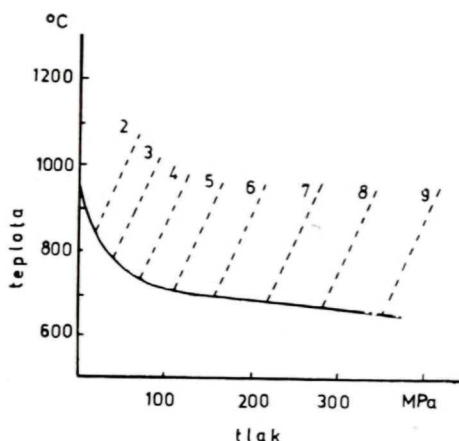
Teplotné údaje o podmienkach intenzívneho tečenia granitov (obr. 12) sa zdajú byť relatívne vysoké. Ale treba si uvedomiť, že údaje obr. 12 a tabuľky 2 sa týkajú tzv. suchého granitu, ktorý sa topí pri cca 950 °C. Prítomnosť vody však podstatne znižuje teplotu topenia granitov, ako ho ilustruje obr. 13. Prudký pokles topenia granitov nastáva už v prítomnosti relatívne nevelkého množstva vody (3—5 ‰). Nezvyčajný vplyv na parametre žulového minima ukázala prítomnosť NaCl (H. G. F. Winkler — H. V. Platen 1968). Prídavok 2 ‰ NaCl znížil teplotu topenia skúmanej prírodnej vzorky zo 700 na 570 °C.



Obr. 12. Grafické znázornenie deformácie granitu Westerley v závislosti od diferenciálneho tlaku a teploty pri všesmernom tlaku 507 MPa (zostrojené podľa údajov tab. 2)
Fig. 12. Graphical presentation of the Westerley granite deformation depending on differential pressure and temperature at hydrostatic pressure of 507 MPa (plotted from data in Tab. 2)

V podobnom zmysle možno očakávať aj posunutie deformačných charakteristik žuly a ďalej možno predpokladať, že za prítomnosti 3—5 ‰ vody, čo nie je mnoho, sa deformácia na obr. 12 môže posunúť k teplote nižšej o 200—300 °C i viac, čo ešte viac zvýrazňuje nízku agresivnosť až neagresivnosť vystupujúceho diapíru na okolné horniny tým, že môže vystupovať v plastickom, neroztavenom stave. To môže mať iste veľký geologický význam.

V odbornej literatúre sa doteraz traduje, že po stuhnutí, po vykryštalizovaní magmy zostávajú zvyškové roztoky, ktoré môžu byť zdrojom rozličných typov mineralizácie. Ale z obr. 13 vyplývajú iné súvislosti. Kryštalizáciu



Obr. 13. Závislosť granitového minima (minimálnej teploty topenia granitu) od obsahu vody, tlaku a teploty (O. F. Tuttle — N. L. Bowen 1958)

Fig. 13. Dependence of the granite minimum (minimal temperature of the granite melting) on the water content, pressure and temperature (O. F. Tuttle — N. L. Bowen 1958)

granitu môže vyvolať aj únik vody, pretože zníženie obsahu vody posúva solidus tuhnutia granitového eutektika k vyššej teplote. Únik vody z granitovej taveniny môže byť výsledkom zníženia tlaku, ktoré nastáva pri výstupe diapíru do nižších (merané od povrchu)

oblastí kôry. Tak sa môže stať, že v pohybujucom sa diapíre klesne obsah vody natoľko, že už nemôžu vznikať hydrotermálne roztoky. Ale diapír postupuje zotrvačnosťou ďalej a takéto granitové diapíry sú vlastne sterilné. Aj to by mohlo vysvetľovať prípady ložiskovej sterility niektorých granitoidných telies.

Granitoidné diapíry, ako sme ich opísali, by takto prakticky vylučovali jeden z možných, v minulosti teoreticky predpokladaných spôsobov vzniku granitoidných hornín, a to metasomatický. V prospech metasomatickej teórie granitizácie hovorili predovšetkým dve skutočnosti — raz ostré kontakty, raz postupné prechody vo vzťahu k okolným horninám. Mechanizmus pôsobenia vystupujúceho diapíru, ktorý sme rozviedli, vysvetľuje dosť jednoznačne aj túto skutočnosť. Niektoré súvislosti v tomto smere ešte rozvedieme.

Granitoidné diapíry však a priori nevylučujú vznik granitov diferenciáciou a palingenézou. V istej etape vývinu diapírov sa môžu uplatniť súvislosti, ktoré sú znázornené na obr. 14. Na styku roztavenej magmy a sedimentov alebo parciálnym tavením sedimentov sa uvoľňujú rozličné fluidá, prehriate vodné roztoky a pod. Natavené sedimenty sa objemovo zmenšujú, klesajú, tým sa zvyšuje ich pórovitosť a priepustnosť pre uvoľnené fluidá alebo roztoky (obr. 14b).

Metamorfná voda uvoľnená pri metamorfóze okolných sedimentov a pri anatexii je veľmi agresívna. Rozpúšťajú sa v nej všetky zložky počínajúc SiO_2 zo silikátov a kremeňa a končiac všetkými rudnými prvkami.

Pórovitosť sedimentov, zväčšená teplotom magmatického kozuba, resp. roztavenej magmy, je vhodným prostredím na prenikanie fluid a roztokov. Postupne sa však póry upchávajú vylučovaním obsahu z prenikajúcich exhalácií,

či už plyných alebo kvapalných, v dôsledku čoho sa v magmatickej tavenine zvyšuje parciálny tlak vodnej pary, a tak sa znižuje teplota potrebná na tvorbu granitového eutektika. Roztavené horniny sa tak stávajú menej viskóznymi, pohyblivejšími.

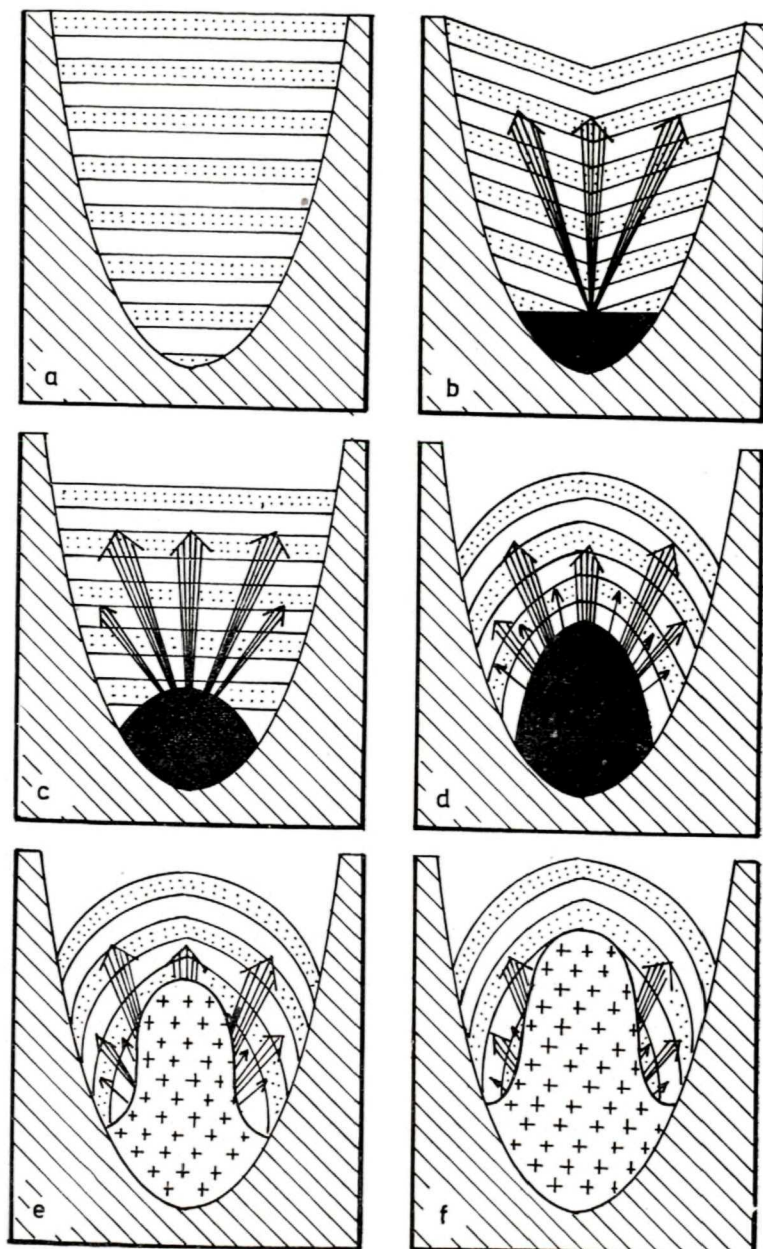
V ďalšej etape vývoja diapíru nastáva vytlačenie granitoidnej magmy (obr. 14c) v smere najnižšej pevnosti nadložených hornín, čo nemusí súhlasiť s najkratším smerom na povrch. Prenikajúci diapír pôsobí na svoje bezprostredné okolie, jeho teplotou sa uvoľňuje voda z prenikaných sedimentov a iných hornín, ňou sa extrahujú niektoré ich zložky a vo forme fluid a hydrotermálnych roztokov migrujú do okolitého prostredia. Pretože teplota magmy je nižšia ako na obr. 14b, je exhalácií podstatne menej a aj ich prenikanie do okolia je menšie.

Obdobný vývoj diapíru je aj v ďalšej etape (14d). Diapír sa už veľmi ochladzuje, takže aj jeho metamorfný účinok a vznik napr. rudonosných a iných roztokov sú slabšie. Pozoruhodné je, že prenikajúci diapír časť žíl a iných výplní vytvorených v predchádzajúcich etapách sám pohlcuje. Je pochopiteľné, že smer prenikania diapíru a exhalácií nemusí byť taký priamočiary, ako je na schéme, a z toho vyplýva, že aj smery „pohlčovania“ primárnych, sekundárnych, terciárnych atď. emanácií môžu byť rozličné.

Tužnutie diapíru (obr. 14e) môže byť relatívne veľmi dlhým procesom, sprevádzaným opäť exhaláciami. Čo do vývoja exhalácií to môže byť síce etapa veľmi intenzívna, avšak v porovnaní s predchádzajúcimi priebehmi pri podstatne nižšej teplote. To sa musí prejavovať aj v chemickom zložení exhalácií. Zatiaľ máme k dispozícii len pomerne málo experimentov, ktoré by plne podporovali opodstatnenosť uvedených hypotéz, ale doterajšie skúsenosti sú pre-

svedčivým dôkazom opísaných konštatovaní. Napr. K. M. Feodofjev (1971) pri sledovaní uvoľňovania molybdénu

z alumosilikátov zistil, že pri 500 °C hydrotermálne roztoky uvoľnili necelé 2 ‰, pri 600 °C 33 až 96 ‰ Mo.



Obr. 14. Teoreticky predpokladaný vývoj granitového diapíru a jeho pôsobenia na okolné horniny

Fig. 14. The theoretically supposed development of the granite diapir and its action upon surrounding rock units

Záverečná etapa granitového diapirizmu môže predstavovať prenikanie úplne vykryštalizovaného diapíru (obr. 14f), ktorý už je chemicky sám prakticky inaktívny, ale môže ešte svojou zvyškovou teplotou vyvolávať rozličné premeny vo svojom okolí (vznik sekundárnych hydrotermálnych roztokov a pod.). Prenikanie diapíru má tu okrem iného opäť za následok pohlcovanie alebo stlačovanie prejavov exhalácií z predchádzajúcich etáp.

Pri posudzovaní celkového efektu granitového diapirizmu je dôležité si uvedomiť, že diapirizmus sa môže „zastaviť“ v ktorejkoľvek z uvedených etáp. A to by vlastne mohla byť jedna z príčin rozmanitosti javov spätých s diapirizmom granitoidných hornín a môže, zatiaľ, pravda, len teoreticky, vysvetľovať skutočnosti, prečo sú napr. granitoidné horniny raz sterilné, inokedy rudonosné, keď teoreticky vznik každej granitoidnej horniny „musí“ byť spätý s procesmi uvoľňovania exhalácií rozličných typov, a tým aj akumulácií rozmanitých prvkov, ložísk atď.

Recenzoval P. Jakeš

LITERATÚRA

- Feodorjev, K. M. 1971: O formirovanii gidrotermalnogo rastvora, soderžaščego volfram i molibden. In: *Mineralogija i geochimija volframovych mestoroždenij*. Leningrad, Izd. Lening. Univ., s. 310—316.
- Handin, D. 1966: Pružnosť i plastičnosť. In: *Handbook of Physical constants*. Moskva, Mir, s. 211—272.
- Holmes, A. 1965: Principles of Physical Geology. 2nd ed. New York, The Ronald Press Comp. 1288 p.
- Ljutkevič, E. M. 1975: Projavlenije tektoniki v soli zapadnoj i južnoj okrainach Russkoj plity. Leningrad, Izd. Nedra. 34 s.
- Kettner, R. 1952: Všeobecná geologie. Praha, Přírodovědecké vydavatelství. 420 s.
- Don Leet, L. — Judson, S. 1971: Physical Geology. 4th ed. New Jersey, Prentice Hall. 687 p.
- Menzel, V. Schreiner, V. 1975: Zakonomernosti mehaničeskogo povedenija kamennych solej v laboratornych i naturnych uslovijach. In: *Mechanika gornych porod*, Alma Ata, Izd. Nauka, s. 64—78.
- Mrazec, L. 1915: Les plis diapirs. Bucurest (citov. podľa R. Kettnera 1952).
- Parker, T. J. — Mc Dowell, A. N. 1955: Model studies of salt-dome tectonics. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists, 39, pp. 2384.
- Saukov, A. A. 1954: Geochemie. Praha, Nakl. ČSAV. 322 s.
- Tuttle, O. F. — Bowen, N. L. 1958: Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 — H_2O . Geol. Soc. Amer. Mem., 74, pp. 193.
- Verhoogen, J. — Turner, F. J. — Weis, L. E. 1970: The Earth. Moskva, Mir 1974, tom 1. 392 s.
- Wegman, C. E. 1930: Über Diapirismus besonders im Grundgebirge. Bull. Comm. géol. Finl. 90, S. 58—76.
- Winkler, H. G. F. — v. Platen, H. 1958: Experimentelle Gesteinsmetamorphose, II. Bildung von anatektischen Schmelzen bei der metamorphose NaCl-führender Tone. Geochem. Cosmochem. Acta (Oxford etc.), 15, S. 91—112.