

Zpracování petrologických dat metodami matematické morfologie na příkladu klasifikace vulkanických hornin v diagramu Q—Ab—Or

BOŽENA KUNOVÁ,* JOSEF MIKEŠ,** FRANTIŠEK PATOČKA*

* Ústav geologie a geotechniky ČSAV, V Holešovičkách 41, 182 00 Praha 8

** Ústav teoretických základů chemické techniky ČSAV, Rozvojová 135, 160 00 Praha 6

Doručené 15. 4. 1985

Обработка петрологических дат методами математической морфологии на примере классификации вулканических пород в диаграмме Q—Ab—Or

Было пересчитано более чем 400 силикатовых анализов мезозойских, кенозойских вулканических пород известного петрографического зачленения и данные нанесены в трёхугольную диаграмму Q—Ab—Or. При использовании методов математической морфологии было в этой диаграмме вычленено поле главных вулканических ассоциаций (т. е. толеитовых, алкалическо-известковистых и алкалических, или же шошонитовых) и основных породных типов (классифицированных по содержанию SiO_2). Преимуществом этого метода является объективное определение положения и формы указанных полей по сравнению с интуитивным ограничением, которого обычно используют. Результаты диаграммы могут служить к простой классификации вулканических пород.

Processing of petrologic data employing methods of mathematical morphology on the example of volcanic rocks classification in the diagram Q—Ab—Or

More than 400 main element analyses of Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of known petrologic specification were recalculated to C. I. P. W. norms and plotted in triangular diagram Q—Ab—Or. Employing methods of mathematical morphology, fields of principal volcanic associations (i. e. tholeiitic, calc-alkaline and alkaline, resp. shoshonitic) and fields of main rock types (classified according to the SiO_2 content) were established in this diagram. The advantage of such procedure is in better objectivity of determination of positions and shapes of individual fields mentioned above, compared to the intuitive approach employed usually for the same purpose. Resultant diagrams can be utilised in simple classification of volcanic rocks.

Stále rozsáhlejší aplikace laboratorních metod v petrologii posledních desetiletí podstatně rozšířila sféru znalostí chemického složení vulkanických hornin. S po-

stupným narůstáním kvanta chemických analýz různých typů vulkanitů vznikla potřeba vypracovat nové petrologické klasifikace, vycházející z chemizmu hornin.

Řada petrologů (Kuno, 1966; Irvine — Baragar, 1971; Miyashiro, 1972; Jakeš — White, 1969, 1972) rozlišila podle chemismu tři hlavní asociace vulkanických hornin — tholeiitovou, alkalicko-vápenatou a alkalickou. Definovali jejich základní rozdíly, vyplývající z obsahů hlavních a stopových prvků. Joplinová (1968) zavedla další asociaci vulkanitů — shoshonitovou, která společně s Na-alkalickými vulkanity vytváří asociaci alkalickou s. l. (Miyashiro, 1972).

Popsané třídění vulkanických hornin je v podstatě dodržováno v původní podobě i pozdějšími autory (např. Jensen, 1976; Whitford et al., 1979; Gill, 1981; Baker, 1982; Mišin, 1982). V naší literatuře shrnuje charakteristiky zmíněných asociací vulkanitů vyčerpávajícím způsobem Jakeš

(1980).

Údaje chemických analýz jsou základem mnoha petrologických diagramů, v nichž příslušnost horniny k určitému typu či asociaci je dána polohou projekčního bodu jejího chemického složení (např. Kuno, 1968; Irvine — Baragar, 1971; Miyashiro, 1974; Jensen, 1976; Whitford et al., 1979).

Pole (oblasti) specifických horninových typů (asociací) jsou ve většině petrologických diagramů vymezeny podle rozložení projekčních bodů v podstatě intuitivně. Naším cílem bylo vymezit pole hlavních vulkanických asociací, t. j. tholeiitové, alkalicko-vápenaté a alkalické, resp. shoshonitové, a pole některých základních typů vulkanitů (bazaltů, bazaltických andezitů, andezitů atd. — tab. 1) v troj-

TAB. 1

Přehled označení a kvantitativního zastoupení (čísla v závorkách) jednotlivých zpracovávaných souborů silikátových analýz vulkanických hornin
Review of notation and quantitative share (numbers in brackets) of processed set of volcanic rock analyses

Horninový typ	Asociace			všechny asociace celkem 0	SiO ₂ (hmot. %)
	tholeiitová 1	alkalicko- vápenatá 2	alkalická (shoshoni- tová) 3		
bazalt 1	1 — 1 (42)	2 — 1 (20)	3 — 1 (37)	0 — 1 (99)	< 52
bazaltický andezit 2	1 — 2 (20)	2 — 2 (17)	3 — 2 (20)	0 — 2 (57)	
andezit 3	1 — 3 (20)	2 — 3 (37)	3 — 3 (54)	0 — 3 (111)	52 ~ 56
dacit 4	1 — 4 (9)	2 — 4 (23)	3 — 4 (28)	0 — 4 (60)	56 ~ 63
ryolit 5	1 — 5 (17)	2 — 5 (54)	3 — 5 (23)	0 — 5 (94)	63 ~ 69
všechny horninové typy celkem 0	1 — 0 (108)	2 — 0 (151)	3 — 0 (162)	(421)	≥ 69

úhelníkovém diagramu normativních minerálů Q, Ab a Or způsobem co nejexaktnějším — za pomoci metod matematické analýzy obrazu (matematické morfologie).

Metodika zpracování dat

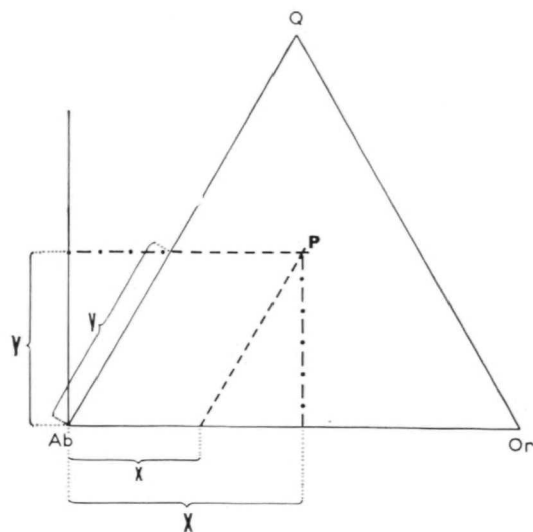
V práci vycházíme ze zobrazení silikátových analýz vulkanických hornin v trojúhelníkovém diagramu normativních minerálů Q, Or a Ab, vypočtených podle systému CIPW (in Hejtman, 1956 a Jarchofský — Patočka, 1983); výsledky jsou přepočteny na základ 100 %. Celkem bylo k dispozici 421 silikátových analýz, charakterizujících složení vulkanitů náležejících k různým petrografickým typům a vulkanickým asociacím (tab. 1). Analýzy jsou převzaty z prací autorů citovaných v dodatku I. Veškeré zpracování dat bylo provedeno počítačově s využitím netradičních metod analýzy obrazu (matematické morfologie — Serra, 1982).

Výsledkem přepočtu každé silikátové analýzy, promítnutým do trojúhelníka Q—Ab—Or, je jeden bod v rovině. Za nezávislé údaje (souřadnice) jsme zvolili procento obsahu Or (x) a Q (y). Obsah Ab je doplňkem do 100 % : $z = 100 - x - y$.

Trojúhelníkový diagram představuje nepravoúhlý souřadný systém, ve kterém osa y svírá s osou x úhel 60° . Pro další výpočty je výhodné zavést pravoúhlé souřadnice se stejným počátkem (v levém vrcholu trojúhelníka) a se stejnou osou $x = X$ (obr. 1). Pro přepočet nepravoúhlých souřadnic na pravoúhlé platí tyto rovnice:

$$X = x + \frac{y}{2} \quad Y = \frac{\sqrt{3}}{2} y \quad [1]$$

Každému souboru dat (tab. 1) odpovídá množina bodů v definiční oblasti (poli)



Obr. 1. Bod P v trojúhelníkovém diagramu, který má souřadnice x, y , v soustavě trojúhelníka a souřadnice X, Y v systému pravoúhlém

Fig. 1. Figurative point in triangular plot with coordinates x, y , in triangular and X, Y in rectangular system

trojúhelníka. Budeme formulovat cíl dalšího zpracování jednotlivých souborů. Tím je vymezení minimální plošné oblasti, v níž leží pokud možno 90 % nebo více bodů dané množiny, čili jde o zobrazení diskrétní konečné množiny bodů do plošné oblasti. Od hledané oblasti (pole) je vhodné požadovat splnění následujících požadavků, které se týkají jejího tvaru a vyplývají ze znalosti povahy problému:

a) oblast musí být souvislá, t. j. musí sestávat pouze z jedné části a nesmí obsahovat prázdná místa („díry“);

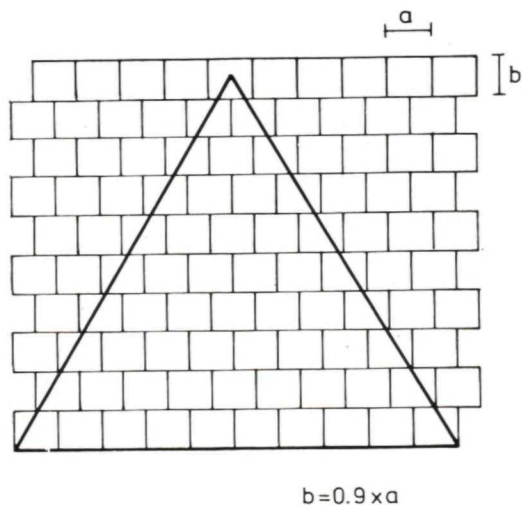
b) hranice oblasti musí mít minimální křivost, t. j. má být pokud možno zarovnaná (vyhlazená).

Pokud můžeme o skutečné hustotě rozložení bodů předpokládat, že je to funkce „dostatečně hladká“, pak lze též očekávat, že kontura oblasti nebude mít ostré výběžky ani hluboké zářezy.

Jakékoliv číslicové zpracování musí za-

čít plošnou diskretizací dat, t. j. rozdělením definiční oblasti na pravidelnou síť, „mozaiku“, resp. rastr. Každý bod (v našem případě projekce silikátové analýzy) je zařazen do jedné elementární buňky takového rastru. Celý rastr je pak reprezentován maticí. Element matice má hodnotu rovnou počtu bodů, které obsahuje odpovídající ploška rastru. Zmíněnou hodnotu můžeme tedy interpretovat jako hustotu projekčních bodů.

Při zpracování projekcí silikátových analýz v diagramu Q—Ab—Or bylo použito hexagonálního plošného rastru, který má oproti čtvercovému vyšší stupeň izotropie a umožnil interakční zpracování analyzátorem obrazu TAS firmy Leitz (Müller, 1973; Newrath — Serra, 1979). Hustota rastru je charakterizována počtem elementů N , které připadají na základnu trojúhelníka. Hrana elementární plošky je pak $a = 100/N$. Hexagonální plošný rastr má jako elementární plošku obdélník, jehož poměr stran $b/a = 0,9$.



Obr. 2. Hexagonální rastr a trojúhelníkový diagram

Fig. 2. Hexagonal raster and triangular diagram

Při zachování tohoto poměru (obr. 2) má rastr strukturu pravidelných šestiúhelníků.

Přiřazení bodu k elementu rastru (matice) se řídí vzorcí (2), v nichž index i vyjadřuje pořadí elementu v řádce (číslováno zleva doprava) a index j pořadí řádku (číslovanému zdola nahoru):

$$j = \frac{Y}{b} + 1$$

$$i = \frac{X}{a} + 1 \quad \text{pro } j = 1, 3, 5 \dots$$

$$i = \frac{X - \frac{a}{2}}{a} + 1 \quad \text{pro } j = 2, 4, 6 \dots$$

[2]

Matice hustot je klíčem k vytvoření oblastí [polí]. Pokud by byl datový soubor statisticky reprezentativní, stačilo by vzít určitou prahovou hodnotu hustoty a všechny elementy s hodnotou vyšší by představovaly hledanou oblast. V případě omezených výběrů dat vede takovýto postup k nevěrohodným závěrům. Příčinou je statistický rozptyl hodnot elementů matice hustot. Počet bodů v jednom elementu rastru $n_{i,j}$ (hodnota elementu matice) se řídí binomickým rozdělením s rozptylem rovným druhé odmocnině z očekávané hodnoty:

$$\sigma^2 = \sqrt{E(n_{ij})} \quad [3]$$

Vzhledem ke zpravidla malým hodnotám $E(n_{i,j})$ jsou rozptyly relativně veliké. To má silný vliv na tvar oblasti stanovené prahovou hodnotou hustoty.

Ke zmenšení velikosti rozptylu se běžně používá metody filtrace konvolučními filtry, většinou prostým průměrováním. Této metody jsme též použili v prvním kroku extrakce oblastí. Metoda filtrace (průměrování) spočívá v tom, že se pro každý element spočítá nová hodnota, jež je



Obr. 3. Geometrická prezentace hexagonálního průměrujícího filtru

Fig. 3. Geometric representation of a hexagonal averaging filter

obecně váženým průměrem všech hodnot definovaného okolí. Váhy jednotlivých elementů okolí definuje právě konvoluční filtr. Postup má oprávnění, pokud hodnoty matice navzájem korelují, t. j. je-li např. očekávaná hodnota jednoho elementu vysoká, pak i sousední hodnoty jsou vysoké, a podobně.

Zvolili jsme hexagonální rastr, jenž přináší výhody (ale i komplikace) při sestavování algoritmu. Matice má přirozené pravoúhlé uspořádání, ve kterém však musí být kódována hexagonální struktura rastru. Každý vnitřní element má jen šest nejbližších sousedů, a nikoliv osm, jak by formálně vyplývalo ze struktury matice. Zvolili jsme průměrující filtr, jehož geometrické uspořádání je znázorněno na obr. 3, ve kterém jsou pro zjednodušení zobrazeny jen tři „slupky“ filtru. Počet elementů filtru lze určit podle vzorce:

$$L = 3M(M + 1), \quad [4]$$

kde M je počet „slupek“ filtru.

Z obr. 3 je zřejmá výhoda hexagonálního uspořádání, které poskytuje filtry blízké kruhovému tvaru, což je mimo jiné bližší praxi grafického ručního zpracování údajů.

U všech souborů byl bez výjimky aplikován pětislupkový filtr čítající 91 elementů. To odpovídá průměru okolí asi 7,5 % co do složení, což lze považovat za přiměřený rozsah korelace. Aby bylo možné použít celočíselné aritmetiky, byla zavedena mírná odchylka od běžné definice transformace — za filtrovanou hodnotu elementu matice byl vzat součet všech hodnot z daného okolí bez dělení číslem $N = 91$. Nová matice má pak hodnoty rovné počtům bodů v pětislupkovém okolí elementů rastru. Při filtraci je třeba se vypořádat s problémem okrajových elementů, t. j. takových, jejichž okolí o velikosti „masky“ filtru neleží zcela v definiční oblasti trojúhelníkového diagramu. V konkrétních případech se to týkalo základny Ab—Or trojúhelníka Q—Ab—Or, neboť přímo na ní leží řada bodů, zatímco od ostatních stran jsou body dostatečně vzdáleny. Problém byl řešen normováním podle plochy průniku pole masky filtru s definiční oblastí trojúhelníka. Předpis pro filtraci, ve které $m_{i,j}$, resp. $n_{i,j}$ jsou hodnoty filtrovatelné, resp. původní matice, má tento tvar:

$$m_{ij} = \sum_{(kl) \in O_5 \cap \Delta} \{n_{kl} \times N(O_5) N(O_5 \cap \Delta)\} \quad [5]$$

kde k, l zamená dvojici indexů matice, O_5 značí pětislupkové okolí elementu (i, j) a symbol Δ vyjadřuje definiční oblast trojúhelníka (trojúhelníkového diagramu), $O_5 \cap \Delta$ je průnik masky filtru v pozici i, j s trojúhelníkem, $N(O)$ je počet bodů filtru, které jsou obsaženy v oblasti O . Platí tedy, že

$$N(O_5) \geq N(O_5 \cap \Delta) \quad [6]$$

Pokud je celý filtr obsažen v trojúhelníku, pak se vzorec (5) zjednodušuje takto:

$$m_{ij} = \sum_{(kl) \in O_5} n_{kl} \quad [5a]$$

TAB. 2

Dokumentace zpracování datových souborů
Documentation of data set processing

soubor	práh	stupeň uzavření	stupeň otevření	stupeň dilatace	počet bodů celkem	počet bodů mimo	pozn.
1 — 1	2	8	2	0	42	1	(1)
1 — 2	2	8	2	1	20	2	(1)
1 — 3	2	8	2	2	20	2	
1 — 4	2	8	2	4	9	1	
1 — 5	2	8	1	3	17	2	
2 — 1	3	8	2	1	20	2	
2 — 2	2	8	2	0	17	0	
2 — 3	2	8	2	0	37	3	
2 — 4	2	8	2	1	23	3	
2 — 5	2	8	2	0	54	0	
3 — 1	3	8	0	0	37	3	
3 — 2	2	8	0	2	20	4	(2)
3 — 3	2	8	2	1	54	5	(3)
3 — 4	2	8	2	0	28	3	
3 — 5	2	8	2	0	23	1	
1 — 0	2	8	2	0	108	3	(1)
2 — 0	2	8	2	0	149	0	
3 — 0	2	8	2	0	162	3	(1)
0 — 1	2	8	2	0	99	3	
0 — 2	2	8	2	0	57	4	
0 — 3	2	8	2	0	111	4	
0 — 4	2	8	2	0	60	4	
0 — 5	2	8	2	0	93	2	

1 — data na základně Ab — Or, 2 — lineární uzavření základny Ab — Or stupně 23, 3 — lineární dilatace ve vodorovném směru stupně 1

1 — data on Ab — Or basis, 2 — linear closing of Ab — Or basis of degree 23, 3 — linear dilatation of 1st degree in horizontal sense

Filtrovaná matice byla rozdělena až na výjimky (tab. 2) na oblasti s prahovou hodnotou 2, t. j. byly vytvořeny primární oblasti pokryté elementy, v jejichž pěti-slupkovém okolí jsou alespoň dva projekční body (s korekcí okrajových elementů). Ukázalo se, že získané oblasti většinou nevyhovují stanoveným cílům.

Proto bylo k dalšímu zpracování oblastí použito postupů analýzy obrazu — algoritmů matematické morfologie. Je třeba zdůraznit, že nadále se popisuje práce s binárními maticemi prahových hodnot, které mají již spíše geometrickou interpretaci. Zpracovaná oblast je množinou těch elementů rastru, jimž odpovídá hod-

nota 1 (doplňek má hodnoty 0). Základními operacemi matematické morfologie jsou eroze, dilatace a jejich kombinace, t. j. otevření (= eroze + dilatace) a uzavření (= dilatace + eroze). Tyto operace jsou blíže vysvětleny v dodatku II.

Prvou aplikovanou transformací bylo uzavření o velikosti strukturního elementu 8 (8 slupek hexagonálního rastru). Výsledkem je oblast, ve které byla zaplněna prázdná místa („díry“), byly spojeny izolované ostrůvky a zarovnány nerovnosti okrajů, zasahující dovnitř oblasti („fjordy“).

Další transformací bylo otevření, jež bylo provedeno (až na výjimky — tab. 2) strukturním elementem velikosti 2. Po otevření mizí výběžky vyčnívající z oblasti ven. Otevření nebylo realizováno jen v těch případech, kdy by vedlo k vyloučení významné části bodů z oblasti a nebylo by možné v rámci dalších pravidel dosáhnout požadovaných 90 % pokrytí.

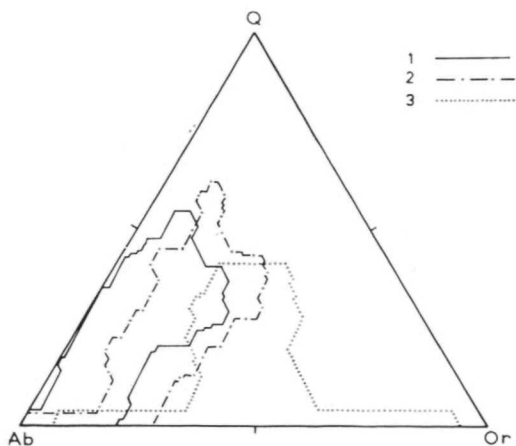
Poslední transformací byla podmíněná dilatace, která byla prováděna pouze v těch případech, kdy předchozí transformace nevedly ke splnění podmínky 90 % pokrytí. Tím došlo k rovnoměrnému rozšíření oblasti až do splnění uvedené podmínky. Stupeň dilatace byl limitován hodnotou 4. Vyšší hodnoty stupně dilatace již ztrácejí smysl — pokud by jich bylo třeba, vypovídá to spíše o nereprezentativních datech. Proto v případech, kdy nepomohlo ani vynechat otevření, ani maximální dilatace, byly ponechány oblasti pokrývající i méně než 90 % bodů (např. soubor 3—2, tab. 2). K dosažení souladu s požadavky na tvar oblasti lze využít i další transformace matematické morfologie, jako uzavření prázdných míst („děr“), konstrukce konvexní obálky.

Při aplikaci popsaných algoritmů vystal problém s daty, která leží na základně Ab—Or a jsou vlastně jednorozměrná. Tato data jsou často velmi po-

četná — mají tedy velkou lineární hustotu. Aplikace plošných strukturních elementů není adekvátní, a proto na celý soubor dat musíme pohlížet jako na sjednocení dvourozměrného a jednorozměrného podsouboru. Na podsoubor na ose X byly aplikovány tytéž postupy, avšak byl volen lineární strukturní element a bylo vynecháno otevření. Výsledná oblast je vzata jako sjednocení obou transformovaných podoblastí. V několika případech bylo též nutno učinit výjimku (tab. 2).

Diskuse

Hlavní výsledky zpracování projekcí silikátových analýz vulkanických hornin v diagramu Q—Ab—Or metodami matematické morfologie shrnují obrázky 4 až 6. Obr. 4 zachycuje pozici polí (oblastí) hlav-



Obr. 4. Pole hlavních vulkanických asociací v trojúhelníkovém diagramu normativních minerálů Q—Ab—Or. 1 — tholeiitová asociace, 2 — alkalicko-vápenatá asociace, 3 — alkalická (shoshonitová) asociace

Fig. 4. Field of main volcanic associations in triangular plot of normative Q—Ab—Or minerals. 1 — tholeiitic association, 2 — calc-alkaline association, 3 — alkaline (shoshonite) association

ních vulkanických asociací — tholeiitové, alkalicko-vápenaté a alkalické (resp. shoshonitové). Postavení oblastí základních horninových typů vymezených podle obsahu SiO_2 (bazaltů, bazaltických andezitů, andezitů atd. — tab. 1) je patrné z obr. 5; jsou zde sloučeny jednotlivé typy hornin ze všech vulkanických asociací, t. j. např. v jednom poli jsou icelandity, andezity s. s., trachyty a latity. Nejdetailnější je obr. 6, který rozlišuje oblasti dílčích typů vulkanitů jak podle procenta SiO_2 , tak podle asociace k níž hornina náleží.

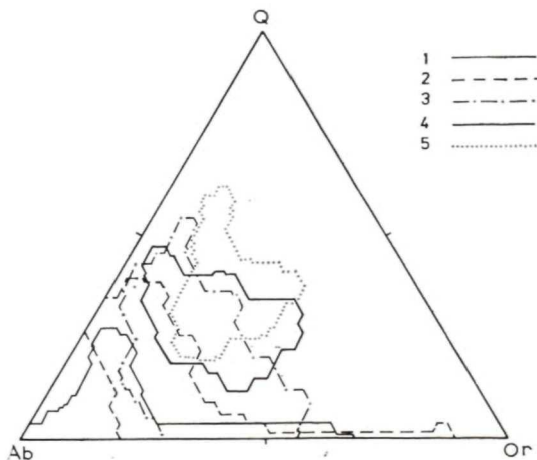
„Rozlišovací schopnost“ trojúhelníků na obr. 4 až 6, daná velikostí překryvu jednotlivých polí, je evidentně značně proměnlivá; z toho vyplývá i nestejná míra použitelnosti diagramů pro klasifikaci dílčích typů (nebo asociací) vulkanických hornin.

V obr. 4 se poměrně dobře oddělují oblasti asociací tholeiitové a alkalické (shoshonitové) a jen o něco větší je překryv druhé ze jmenovaných asociací s asociací alkalicko-vápenatou. Vzájemné překrytí polí tholeiitové a alkalicko-vápenaté asociace je však dosti velké.

Překryvy polí dílčích horninových typů na obr. 5 jsou často značné — tento diagram je tedy použitelný jen pro rozlišování vulkanitů s podstatněji rozdílnými obsahy SiO_2 . Přesto se v něm velmi dobře oddělují bazalty a andezity (soubory 0—1 a 0—3, tab. 1), přestože difference mezi spodní a horní hranicí podílů SiO_2 , které odpovídají uvedeným souborům, je pouze 4 %.

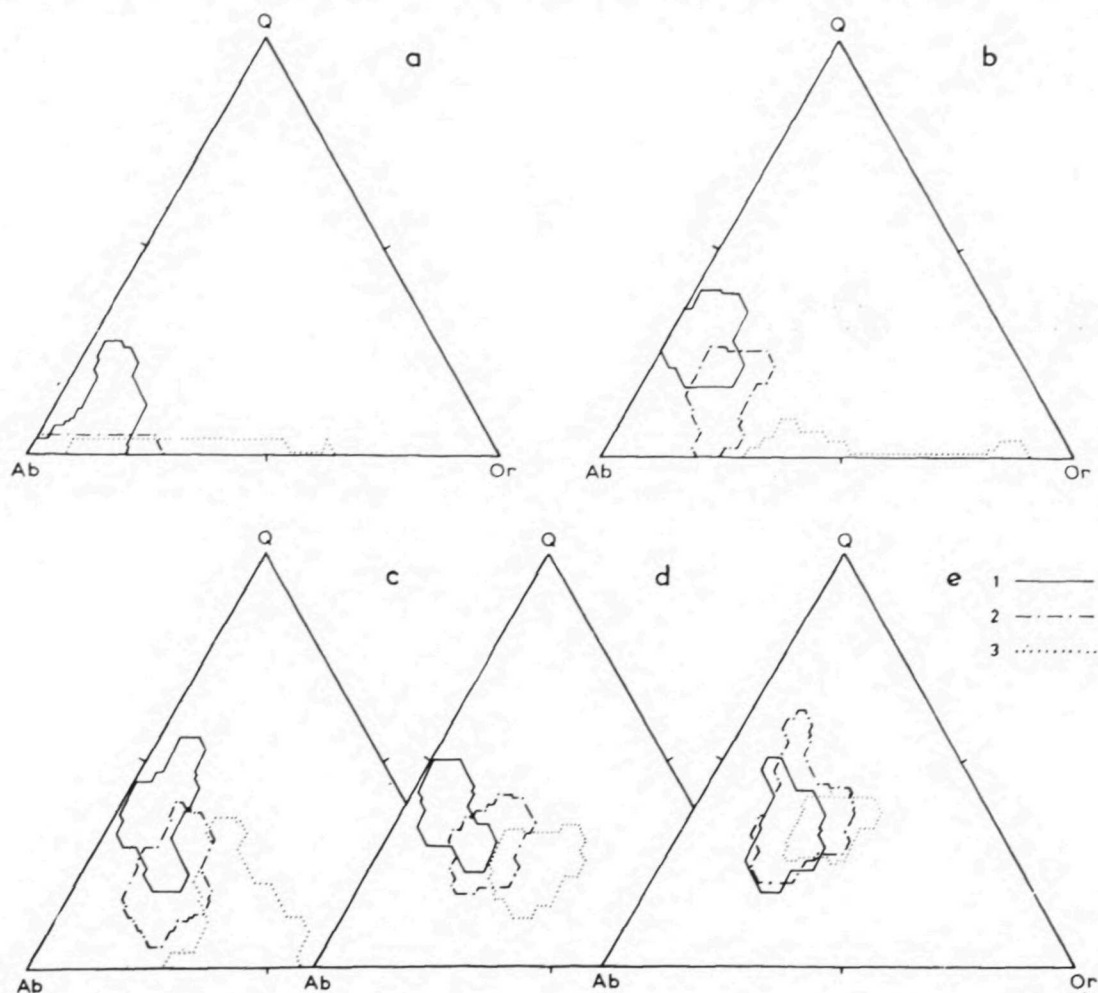
Nejlepší „rozlišovací schopnosti“ je dosaženo v diagramech na obr. 6, kde jsou vulkanity rozděleny jak podle horninových typů, tak podle základních vulkanických asociací. Velmi dobrého stupně rozlišení je dosaženo v trojúhelnících, zobrazujících vulkanity s obsahem SiO_2 v rozmezí 52 až 63% (t. j. soubory 1—2 až 3—3), poněkud horší je situace v trojúhelníku hornin s podílem SiO_2 v rozpětí 63 až 69 % (soubory 1—4 až 3—4) a s podílem SiO_2 menším než 52 % (soubory 1—1 až 3—1). U velmi kyselých vulkanických hornin (s obsahem SiO_2 větším než 69 %, t. j. u souborů 1—5 až 3—5) jsou překryvy polí tak velké, že použitelnost posledního diagramu (v obr. 6d) je sporná. Velikost překryvů oblastí asociací alkalicko-vápenaté a alkalické (shoshonitové) je ve všech trojúhelnících na obr. 6 menší než rozsah překryvů polí tholeiitové a alkalicko-vápenaté asociace.

Zdánlivým rozporem obr. 4 až 6 je, že sjednocení dílčích oblastí se přesně nekryje s oblastí vytvořenou ze sumárních dat. Jako příklad lze uvést nesouhlas sjednocení oblastí souborů 1—1 až 1—5 a oblastí souboru 1—0. Zmíněný zdánlivý rozpor vyplývá z toho, že jednotlivá data



Obr. 5. Pole hlavních petrografických typů vulkanitů v trojúhelníkovém diagramu normativních minerálů Q—Ab—Or. 1 — bazalty, 2 — bazaltické andezity, 3 — andezity, 4 — dacity, 5 — rhyolity

Fig. 5. Fields of main petrographic types of volcanites in triangular plot of normative Q—Ab—Or minerals. 1 — basalts, 2 — basaltic andesite, 3 — andesite, 4 — dacite, 5 — rhyolite



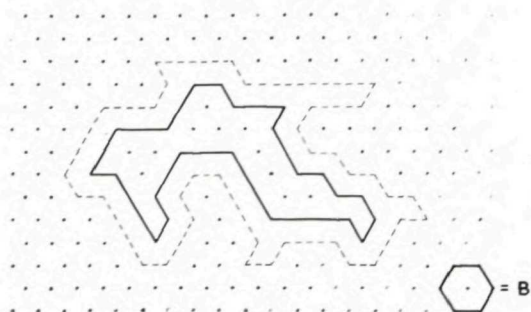
Obr. 6. Pole hlavních petrografických typů vulkanitů jednotlivých asociací v trojúhelníkovém diagramu normativních minerálů Q—Ab—Or. a — bazalty, — bazaltické andezity, c — andezity, d — dacity, e — ryolity; 1 — tholeiitová asociace, 2 — alkalicko-vápenatá asociace, 3 — alkalická (shoshonitová) asociace

Fig. 6. Fields of main petrographic types of volcanics according to single associations in triangular plot of normative Q — Ab — Or minerals. a — basalt, b — basaltic andesite, c — andesite, d — dacite, e — rhyolite, 1 — tholeiitic association, 2 — calcalkaline association, 3 — alkaline (shoshonite) association

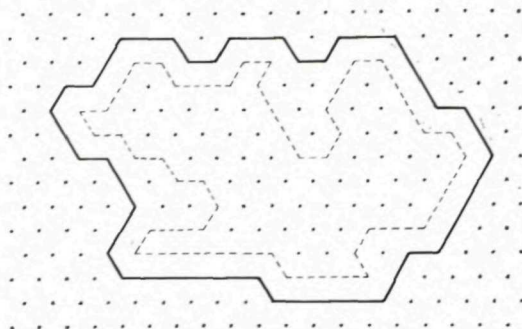
(projekce hornin) se často silně překrývají a mísí; užité transformace nejsou proto lineární.

Je nutné ještě podotknout, že zdánlivě stejnou službu jako diagram Q—Ab—Or by mohl prokázat trojúhelníkový diagram hmotnostních procent SiO_2 , Na_2O a

K_2O . Nebylo by tak potřeba složitého přepočtu na normativní minerály. Procenta normativních minerálů se však vypočítávají ze silikátové analýzy jako celku, t. j. na obsazích normativního křemene, albitu a ortoklasu se projevuje vliv podílů a vzájemných poměrů všech komponent sí-



Obr. 7. Eroze obrazce (množiny) X strukturálním elementem B (elementárním hexagonem). Původní obrazec X je ohraničen čárkovanou linií, erodovaný $X \ominus B$ plnou čarou
Fig. 7. Erosion of figure (point set) X by structural element (elementar hexagone) B. Original figure X limited by dashed line, the eroded one $[X \ominus B]$ by full line



Obr. 8. Dilatace obrazce (množiny) X strukturálním elementem B (elementárním hexagonem). Původní obrazec X je ohraničen čárkovanou linií, dilatovaný $X \oplus B$ plnou čarou
Fig. 8. Dilatation of figure (point set) X by structural element (elementar hexagone) B. Original figure X limited by dashed line, the dilated one $[X \oplus B]$ by full line

likátové analýzy. Trojúhelník Q--Ab--Or také poskytuje orientační představu o minerálním složení horniny; navíc jej lze srovnávat s obdobnými diagramy, do nichž jsou vynášeny výsledky petrologických experimentů s přirozenými a umělými silikátovými taveninami. Umožňuje tak usuzovat na tlakové a teplotní poměry vzniku hornin, jejichž složení je v něm promítnuto (Willye, 1977; Winkler, 1979).

Závěr

Zpracováním více než 400 silikátových analýz mezozoických a kenozoických vulkanických hornin metodami matematické morfologie byly v trojúhelníkovém diagramu vymezeny oblasti (pole), do nichž se promítají hlavní typy (podle obsahu SiO_2 označené zjednodušeně jako bazalty, bazaltické andezity, andezity, dacity a ryolity) a asociace (tholeiitová, alkalicko-vápenatá a alkalická, resp. shoshonitová), které se ve spektru vulkanických hornin běžně rozlišují. Výsledné diagramy jsou použitelné pro přehlednou klasifikaci vulkanitů na základě zastoupení hlavních prvků, stanovených silikátovou analýzou

a přepočtených na normativní minerály Q, Ab a Or podle systému CIPW (obr. 4, 5 a 6).

Pokusili jsme se vytvořit takovou metodu extrakce výše uvedených oblastí, která by se opírala o pokud možno jednotný algoritmus. Tento přístup je kompromisem mezi metodami klasické filtrace dat a postupem matematické morfologie. Užití metod matematické morfologie má silné oprávnění v tom, že jednotlivé soubory silikátových analýz (tab. 1) nepředstavují statisticky reprezentativní a náhodné výběry. Bylo by možné diskutovat, zda podíl obou částí je vyvážený; to bude — mimo jiné — námětem další práce. V každém případě však bylo dosaženo objektivizace ve srovnání s běžným, často intuitivním zpracováním petrologických dat.

Postupy popsané v kapitole o metodice zpracování dat mají obecnou platnost, neomezují se tedy jen na petrologická data v trojúhelníkovém zobrazení. Implementace programu je možná na kterémkoliv počítači s dostatečně velkou pamětí. Zvláště vhodné jsou grafické interakční systémy.

Dodatek I — Prameny použitých silikátových analýz

Silikátové analýzy vulkanických hornin, použité v práci, jsou převzaty z těchto publikací: Tröger (1955), Coats (1952), Kuno (1960), Yoder — Tilley (1962), Isshiki (1963), Carmichael (1964), MacDonald — Katsura (1964), Erlich (1966), Muir — Tilley (1966), Swanson (1967), Zeil — Pichler (1967), Joplin (1968), Kuno (1968), Moore (1970), Jakeš — Smith (1970), Ewart — Brian (1972), Jakeš — White (1972), Date — Tanimura (1974), Matsukuma (1974), Miyashiro (1974), Sørensen (1974), Johnson et al. (1978), Dixon — Batiza (1979), Paulo et al. (1979), Rafferty — Hemming (1979), Saunders et al. (1980), Mišin (1982).

Dodatek II — Základní transformace matematické morfologie

V práci bylo použito postupů, které jsou dnes již zcela běžné v analýze obrazu, nikoliv však ve zpracování obecných dvourozměrných dat. Jde o algoritmy matematické morfologie, aplikované na binární matice (rastrovatelné bodové množiny). Protože každý element matice má hodnotu 0 nebo 1, je nasnadě geometrická interpretace jako množiny bodů na rastru; bod patří množině X, pokud odpovídající element binární matice je 1. Jinak patří doplnku množiny X.

Základním pojmem je transformace „hit or miss“ neboli ANO/NE. Jedním z takových postupů je i stanovení prahových hodnot. Na kladenou podmínku existuje buď odpověď ANO (1) nebo NE (0). Transformace množiny X se provádí pomocí tzv. strukturního elementu, což je vhodně volená plošná struktura bodů. Strukturní element se volí specificky podle studovaného problému a slouží jako sonda k testování množiny X. U strukturního elementu se zvolí referenční bod, kterým se projede každý bod rastru. Přitom se sleduje splnění určité podmínky, kladené na dané lokální okolí bodu rastru. Je-li podmínka splněna, pak daný bod bude náležet transformované množině, není-li splněna, pak bod tvoří doplněk.

Základní transformací je eroze a dilatace. U eroze je podmínkou, aby všechny body strukturního elementu náležely množině X. Je-li alespoň jeden bod mimo X, pak bod v pozici bodu reprezentativního bude odstraněn z množiny. Je-li B strukturní element, pak množina eroze sa značí $X \ominus B$. Na obr. 7 ukážeme erozi hexagonálním strukturním elementem velikostí 1.

Opačnou (nikoliv inverzní) transformací je dilatace. Podmínkou je, aby alespoň jeden bod strukturního elementu se kryl s bodem mno-

žiny X. Pak bod v pozici bodu reprezentativního se stává bodem množiny označované $X \oplus B$. Příklad je ukázán na obr. 8.

Kombinací eroze a následné dilatace obdržíme transformaci otevření a opačné pořadí dilatace a následné eroze poskytne uzavření.

Poděkování

Velký podíl na vzniku této práce má J. Pekárková, která řídila počítačové zpracování dat. Chtěli bychom vyjádřit náš dík také bratrům RNDr. Petru a RNDr. Janu Rajlichovým za podnětné diskuse při řešení problému.

Literatúra

- Baker, P. E. 1982: Evolution and classification of orogenic volcanic rocks. In: *Andesites: Orogenic andesites and related rocks*. Ed. R. S. Thorpe. New York, J. Wiley and Sons, pp. 11 — 24.
- Coats, R. R. 1952: Magmatic differentiation in Tertiary and Quarternary volcanic rocks Adak and Kanaga islands, Aleutian islands. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63, pp. 485 — 514.
- Carmichael, I. S. E. 1964: The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in eastern Iceland. *J. Petrology*, 5, pp. 435 — 514.
- Date, J. — Tanimura, S. 1974: Dacite and rhyolite associated with the Kuroko mineralization. In: *Geology of Kuroko deposits*. Eds. Ishihara S. et al. Mining Geol. Spec. Issue, 6, pp. 261 — 265.
- Dixon, T. H. — Batiza, R. 1979: Petrology and chemistry of recent lavas in the Northern Marianas: implications for the origin of islands arc basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70, pp. 167 — 181.
- Erlich, E. N. 1966: Petrochimija Kainozoickoj Kurilo-Kamčatskoj vulkaničeskoj provinciji. *Nauka*, pp. 227. Moskva.
- Ewart, A. — Bryan, W. B. 1972: Petrography and geochemistry of the igneous rocks from Eua, Tongan islands. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, pp. 3281 — 3298.
- Gill, J. 1981: Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin, Springer Verlag. 390 p.
- Hejtman, B. 1956: Všeobecná petrografie vyvřelých hornin. Praha, ČSAV, 371 s.
- Irvine, T. N. — Baragar, W. R. A. 1971: A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, pp. 523 — 548.
- Isshiki, N. 1963: Petrology of Hachijo-jima volcano group, Seven Izu islands, Japan. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sec. 2*, 15, pp. 91 — 134.
- Jakeš, P. — Smith, I. E. 1970: High potassium calc-alkaline rocks from Cape Nel-

- son, Eastern Papua. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 28, pp. 259 — 271.
- Jakeš, P. — White, A. J. R. 1972: Major and trace elements abundances in volcanics rocks of orogenic areas. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, pp. 29 — 40.
- Jakeš, P. 1980: Horninové asociace ostrovních oblouků a kontinentálních okrajů. In: *Geochemie. Red. V. Bouška — P. Jakeš — T. Pačes — J. Pokorný. Praha, Academia*, s. 280 — 284.
- Jarchovský, T. — Patočka, F. 1983: Petrologické přepočty v programech pro kapesní kalkulátory. *Metodická pomůcka vyhodnocení geologických dat (5)*. Praha, ČSVTS — Geofond, 62 s.
- Jensen, L. S. 1976: A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. *Ontario Div. Mines (Toronto)*, M. P. 66, 22, p.
- Johnson, R. W., Smith, I. E. M. — Taylor, S. R. 1978: Hot-spot volcanism in St. Andrew Strait, Papua, New Guinea: geochemistry of a Quarternary bimodal rock suite. *BMR J. of Australian Geology and Geophysics*, 3, pp. 55 — 59.
- Joplin, G. A. 1968: The shoshonite association: a review. *J. Geol. Soc. Australia*, 15, pp. 275 — 294.
- Kuno, H. 1960: High-alumina basalt. *J. Petrology*, 1, pp. 121 — 145.
- Kuno, H. 1966: Lateral variation of basaltic magma across continental margins and island arcs. In: *Continental margins and Island Arcs*. Ed. W. H. Pole. Ottawa. *Geol. Surv. Canada, Spec. Pap.*, pp. 66 — 15, 317 — 336.
- Kuno, H. 1968: Differentiation of basalt magma. In: *Basalts*. Eds. H. H. Hess — A. Poldervaart. New York, Wiley and Sons, pp. 623 — 688.
- McDonald, G. A. — Katsura, T. 1964: Chemical composition of Hawaiian lavas. *J. Petrology*, 5, pp. 82 — 133.
- Matsukuma, T. 1974: Geology of the Kuroko type stockwork deposits of the Tsuchihata mine, Iwate prefecture. In: *Geology of Kuroko deposits*. Eds. S. Ishihara et al., *Mining Geol., Spec. Issue*, 6, pp. 169 — 182.
- Mišin, L. F. 1982: Porodnyje grupy i seriji krajevych vulkaničeskich pojasov. Moskva, Nauka, 123 s.
- Miyashiro, A. 1972: Metamorphism and related magmatism in plate tectonics. *Amer. Sci.*, 272, pp. 629 — 656.
- Miyashiro, A. 1974: Volcanic rock series in island arc and active continental margins. *Amer. J. Sci.*, 274 (4), pp. 321 — 355.
- Moore, J. G. 1970: Water content of basalt erupted on the ocean floor. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 28, pp. 272 — 279.
- Muir, I. D. — Tilley, C. E. 1966: Basalts from northern part of the Mid-Atlantic ridge. *J. Petrology*, 7, pp. 193 — 201.
- Müller, W. 1973: Das Leitz-Textur-Analyse-System. *Leitz Mitt. Wiss. u. Technik, Suppl.*, 1, Nr. 4, S. 101 — 116.
- Nawrath, R. — Serra, J. 1979: Quantitative image analysis: Theory and instrumentation. *Microsc. Acta*, 82, 2, pp. 101 — 111.
- Paulo, A. — Narebski, W. — Bakun-Czubarov, N. — Prochaska, K. — Wichrowski, Z. 1979: Geology, geochemistry and petrogenesis of volcanic of Cotopaxi [Ecuador]. *Prace mineral. (Warszawa)*, 61, 62 p.
- Rafferty, J. — Heming, R. T. 1979: Quarternary alkalic and subalkalic volcanism in south Auckland, New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71, pp. 139 — 150.
- Saunders, A. D. — Tarney, J. — Weaver, S. D. 1980: Transverse geochemical variations across the Antarctic peninsula: implications for the genesis of alc-alkaline magmas. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 46, pp. 344 — 360.
- Serra, J. 1982: Image analysis and mathematical morphology. London, Academic Press.
- Sørensen, H. 1974: The Alkaline Rocks. London, Wiley and Sons, 622 p.
- Swanson, D. A. 1967: Yakima basalt of the Tieton River area, south central Washington. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 78, pp. 1077 — 1110.
- Tröger, W. E. 1985: Spezielle Petrographie der Eruptivgesteine: Ein Nomenklaturkompendium. Berlin, Verlag der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft e. V., 360 p.
- Withford, D. J. — Nicholl, L. A. — Taylor, S. R. 1979: Spatial variations in the geochemistry of Quarternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali. *Contr. Mineral. Petrol.*, 70, pp. 341 — 365.
- Willye, P. J. 1977: Mantle fluid composition buffered by carbonates in periodite CO₂ — H₂O. *J. Geol.*, 85, pp. 187 — 207.
- Winkler, G. H. F. 1979: Petrogenesis of metamorphic rocks. Berlin, Springer Verlag, 237 p.
- Yoder, H. S. — Tilley, C. E. 1962: Origin of basaltic magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *J. Petrology*, 3, pp. 342 — 535.
- Zeil, W. — Fichler, H. 1976: Die känozoische Rhyolith-Formation im mittleren Abschnitt der Anden. *Geol. Rundschau*, 57, pp. 48 — 81.