

## CHEMICKÉ SLOŽENÍ HORNIN BŘEZINSKÉHO A PODOLSKÉHO SOUVRSTVÍ - PŘECHODOVÉ FACIE DINANT-KULM VE VISÉ DRAHANSKÉ VRCHOVINY

CHEMISTRY OF ROCKS BŘEZINA AND PODOLÍ FORMATIONS  
- DINANTIAN-CULMIAN TRANSITION FACIES OF DRAHANY UPLAND VISÉAN

DAVID BURIÁNEK, HELENA GILÍKOVÁ, JIŘÍ OTAVA

### *Abstract*

Buriánek, D., Gilíková, H., Otava, J. (2013): Chemické složení hornin březinského a podolského souvrství - přechodové facie dinant-kulm ve visé Dražanské vrchoviny. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.*, 98, 1, 79-90.

*Chemistry of rocks Březina and Podolí Formations - dinantian-culmian transition facies of Dražany Upland Viséan*

Březina and Podolí Formations represent a transition from the Lower Carboniferous calciturbiditic sedimentation in the Moravian Karst (Lišeň Formation) to the Upper Viséan siliciclastic turbidite flysch facies (Culm facies of the Rozstání Formation). The Březina shales are relatively variable in mineral and chemical composition especially in the content of carbonates (CaO = 0.53 to 0.98 wt. %). Compared with Podolí shales and typical Culmian facies shales, the clastic component of Březina shale exhibits higher degree of chemical weathering and sometimes contains admixture of volcanic material and is intercalated by volcanoclastic deposits (individual beds). Chemistry of volcanoclastics indicates rhyolitic composition and tectonic setting of active continental margin. Contents of Pb, Cu, As, Zn, Cd, Se and Sr depend on the amount of carbonate in the Březina shale. Březina shales have lower contents of Zr, Hf, and often also P, Ti. Shales of Rozstání and Podolí formations have compositions, which indicate rapid deposition of fresh clastic material in environments that were more oxygen-rich than it was in the case of Březina shale.

*Key words:* Dražany Upland, transitional facies, Březina Formation, Podolí Formation, shales, volcanoclastic, chemical composition.

David Buriánek\*, Helena Gilíková, Jiří Otava - Czech Geological Survey, Branch Brno, Leitnerova 22, 658 89 Brno, Czech Republic, \* e-mail: david.burianek@geology.cz

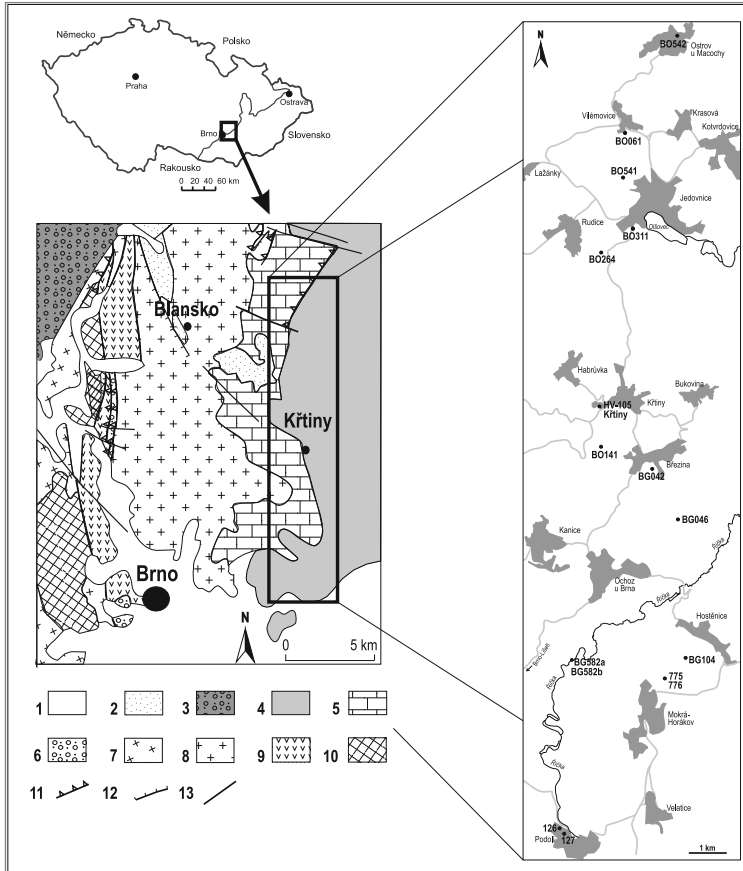
### Úvod

Březinské souvrství tvoří přechodovou facii mezi karbonátovým vývojem Moravského krasu a siliciklastickým vývojem dražanského kulmu. Zaznamenává důležité období vývoje paleozoického sedimentačního bazénu, kdy se začátkem karbonu mění architektura sedimentační pánve, což je spojeno především se sedimentací přerušovanou hiáty a přechodem calciturbiditové sedimentace na svahu pánve do siliciklastické sedimentace z turbiditních proudů. Předkládaný článek srovnává chemické složení sedimentů spodního a středního visé březinského a podolského souvrství, s nadložními svrchnoviséanskými břidlicemi a prachovci kulmské facie rozstáňského souvrství. Toto srovnání má za cíl zjistit jak se významné změny v architektuře pánve, které v tomto období proběhly, projeví na chemickém složení sedimentů.

## Metodika

Všechny studované lokality se nacházejí sv. od Brna a to v okolí obcí Březina a Mokrá-Horákov (obr. 1). Pro petrografický popis bylo použito 6 nově odebraných výbrusů.

Pro studium chemického složení hornin byly použity 2 nové a 6 starších analýz březinských břidlic a 1 analýza z polohy vulkanoklastik (tab. 1). Pro srovnání pak byly použity 2 nové a 6 starších analýz ze sedimentů rozstáňského a podolského souvrství (tab. 2). Všechna data jsou uložena v geochemické databázi ČGS. Nové horninové analýzy dvou studovaných vzorků (tab. 3) byly provedeny metodou ICP-MS v laboratořích Acme Analytic Laboratories Ltd., Vancouver, Kanada. Studované horninové analýzy byly většinou zpracovávány pomocí programu GCDKit (JANOŮSEK *et al.* 2006).



Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa a mapa s lokalizací odebraných vzorků. Legenda: 1 - kenozoikum; 2 - mezozoikum; 3 - permokarbon boskovické brázdy; 4 - kuhl Drahanské vrchoviny; 5 - devon-karbon Moravského krasu; 6 - bazální klástické sedimenty devonu; 7 - západní granodioritová oblast; 8 - východní granodioritová oblast; 9 - metabazitová zóna; 10 - metadioritová zóna; 11 - násun; 12 - přesmyk; 13 - zlom.

Fig. 1. Simplified geological map and map with studied samples. Explanatory: 1 - Cenozoic; 2 - Mesozoic; 3 - Permocarboneous of the Boskovice graben; 4 - Culmian of the Drahaný Upland; 5 - Devonian and Carboniferous of the Moravian Karst; 6 - Basal clastic sediment (Devonian); 7 - Western Granodiorite Area; 8 - Eastern Granodiorite Area; 9 - Metabazite Zone; 10 - Metadiorite Subzone; 11 - Thrust; 12 - Overthrust; 13 - Fault.

Tabulka 1. Obsahy hlavních prvků (hmot. %) ze studovaných vzorků vulkanoklastické horniny a březinských břidlic.

Table 1. Major elements concentration (wt. %) for studied samples volcanoclastic rock a Březina shales.

hornina	vulkanokl.	březinské břidlice							
vzorek	BG042	BG104	BG582a	BG582b	BO141	HV-105 (63,0 m)	BO061	BO541	BO542
X	-1152486	-1157590	-1157316	-1157316	-1151735	-1150774	-1143638	-1144812	-1141248
Y	-586675	-586353	-589291	-589291	-587795	-587744	-586148	-586448	-584461
lokalita	Březina	Mokrá	Ochoz	Ochoz	Březina	Křtiny	Vilémovice	Jedovnice	Ostrov u M.
SiO <sub>2</sub>	70,28	36,65	55,82	62,43	68,09	58,35	60,3	59,8	64,42
TiO <sub>2</sub>	0,27	0,43	0,56	0,73	0,55	0,79	0,8	0,8	0,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,46	8,44	13,95	16,4	14,72	18,03	18,3	17,7	15,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,92	5,01	2,52	7,9	5,42	6,35	6,7	6,2	3,49
FeO	-	-	2,7	0,03	-	1,67	0,5	0,9	1,41
MnO	0,08	0,07	0,22	0,45	0,19	0,21	0,1	0,08	0,11
MgO	1,13	1,03	1,79	1,86	1,54	2,31	2	2,06	2,54
CaO	1,99	23,62	8,06	0,59	0,54	1,13	0,50	0,60	0,54
Na <sub>2</sub> O	5,96	0,06	0,57	1,14	0,30	0,14	0,50	0,40	0,74
K <sub>2</sub> O	0,44	1,83	2,53	3,51	2,75	4,53	5,10	4,60	4,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,05	0,07	0,17	0,10	0,13	0,10	0,10	0,12
CO <sub>2</sub>	-	-	6,25	0,03	-	0,76	0,02	0,02	0,03
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	-	-	3,87	3,80	-	4,29	-	-	-
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	-	-	1,18	1,09	-	0,66	-	-	-
LOI	3,2	22,6	-	-	5,7	-	-	-	-
celkem	99,82	99,79	100,09	100,13	99,90	99,37	94,92	93,26	93,77

Tabulka 2. Obsahy hlavních prvků (hmot. %) ze studovaných vzorků podolských a rozstánských břidlic.

Table 2. Major elements concentration (wt. %) for studied samples Podolí and Rozstání shales.

hornina	podolské souvrství		břidlice a prachovce rozstánského souvrství					
vzorek	126	127	BG046	775	776	BO311	HV-105 (61, 5 m)	BO264
X	-1161763	-1161870	-1153953	-1158124	-1158124	-1146167	-1150774	-1146689
Y	-590174	-590066	-586134	-586940	-586940	-586321	-587744	-587203
lokalita	Podolí	Podolí	Březina	Mokrá	Mokrá	Jedovnice	Křtiny	Rudice
SiO <sub>2</sub>	60,83	67,21	61,82	62,41	58,75	59,07	56,66	57,4
TiO <sub>2</sub>	1,12	0,99	0,81	0,85	0,98	0,88	0,88	0,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,66	14,64	16,22	16,24	17,91	17,81	19,06	20,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,71	3,52	6,37	4,35	4,56	7,24	2,17	3,3
FeO	2,46	2,07	-	2,16	2,2	-	5,34	3,2
MnO	0,063	0,068	0,12	0,11	0,13	0,10	0,27	0,2
MgO	2,19	1,91	2,19	2,13	2,66	2,86	3,35	2,3
CaO	0,68	0,53	0,82	0,84	0,60	0,98	0,86	0,4
Na <sub>2</sub> O	1,69	1,72	1,89	2,38	1,97	2,08	1,40	1,09
K <sub>2</sub> O	3,31	2,59	3,48	2,39	3,40	3,30	3,36	4,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,18	0,14	0,14	0,13	0,17	0,13	0,1
CO <sub>2</sub>	0,29	0,08	-	0,04	0,06	-	0,48	0,01
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	4,18	4,42	-	3,87	4,52	-	4,95	-
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,97	0,28	-	0,90	1,24	-	0,64	-
LOI	-	-	5,9	-	-	5,3	-	-
celkem	99,34	100,21	99,76	98,81	99,11	99,79	99,57	93,8

## Geologický vývoj studovaných souvrství a definice jednotek

Březinské břidlice definoval DVORÁK *et al.* (1993). Tento autor původně rozlišoval kromě březinských břidlic též ostrovské radiolarity ponikevského souvrství. Později byly tyto silicity (radiolarity) zahrnuty pro nepatrnou mocnost jako poloha březinského souvrství. Samostatné vyčleňování ostrovských břidlic ztratilo opodstatnění

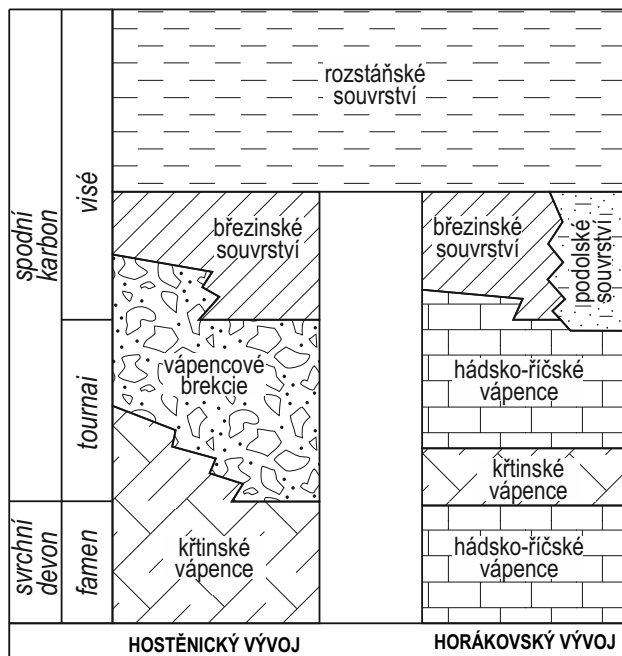
Tabulka 3. Obsahy stopových prvků (ppm) ze studovaných vzorků vulkanoklastické horniny, březinských a rozstáňských břidlic.

Table 3. Trace elements concentration (ppm) for studied samples volcanoclastic rock, Březina and Rozstání shales.

hornina	vulkanokl.	březinské břidlice		rozstáňské břidlice až prachovce			
vzorek	BG042	BG104	BO141	BG046	775	776	BO311
Ba	871	154	434	629	406	475	603
Co	3,8	14,0	20,0	18,2	-	-	18,0
Cr	13,7	47,9	61,6	95,8	123,0	201,0	116,3
Cu	6,0	53,2	96,2	26,0	76,0	76,0	40,1
Ni	20,0	54,4	85,0	43,3	54,0	72,0	49,5
Rb	17,5	78,5	128,8	153,7	118,0	155,0	158,3
Sr	346,4	263,8	54,5	96,3	91,0	82,0	92,3
V	26	103	79	127	134	246	124
Sn	3	2	4	4	8	5	4
Zn	45	164	85	101	121	114	102
As	3,6	53,8	5,2	12,7	17,0	18,0	19,0
U	4,1	2,8	2,6	3,3	2,9	4,1	4,3
Nb	11,3	13,2	12,3	12,6	14,0	13,0	13,1
Mo	0,2	2,1	0,5	0,3	4,0	3,0	0,3
Y	26,7	33,6	27,5	26,4	19,0	21,0	28,5
Zr	197,9	110,0	126,8	189,0	187,0	186,0	170,6
Pb	8,8	25,9	38,2	19,7	24,0	19,0	27,5
Cd	0,1	0,4	<0,1	0,1	-	-	0,1
Cs	0,8	4,5	8,6	10,6	7,1	8,0	13,3
Th	16,4	5,9	11,5	12,6	10,9	11,2	13,5
Ta	0,9	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	1,0
Hf	5,6	3,0	3,5	5,5	5,4	6,1	4,9
Sc	8,0	12,0	13,0	18,0	20,5	24,9	19,0
Sb	0,2	0,4	<0,1	0,4	1,6	<1	0,5
Ag	0,10	0,20	<0,10	0,10	0,41	0,41	<0,1
Hg	0,02	0,07	0,02	0,03	<0,05	<0,05	0,08
Tl	0,1	0,2	0,3	0,1	-	-	0,2
Bi	0,2	0,2	0,8	0,3	-	-	0,6
W	1,9	1,2	2,8	2,7	-	-	2,5
Ga	15,7	10,4	18,6	19,0	19,0	21,0	22,1
Se	0,5	1,8	<0,5	0,5	-	-	<0,5
La	40,5	27,1	41,3	23,9	45,0	39,0	34,9
Ce	84,2	54,1	79,3	58,5	70,0	81,0	73,4
Pr	9,25	6,60	9,16	5,91	-	-	8,32
Nd	33,2	26,5	32,7	24,1	-	-	30,9
Sm	5,82	5,92	6,79	4,69	6,20	7,10	6,25
Eu	0,93	1,31	1,21	0,97	1,07	1,61	1,23
Gd	4,67	6,24	5,65	4,29	-	-	5,42
Tb	0,75	1,01	0,94	0,78	<1	<1	0,94
Dy	4,24	5,53	5,15	4,50	-	-	5,76
Ho	0,88	1,07	1,06	0,91	-	-	1,09
Er	2,68	3,03	3,02	2,87	-	-	3,25
Tm	0,42	0,45	0,42	0,43	-	-	0,51
Yb	2,71	2,76	2,78	2,66	2,80	1,80	3,29
Lu	0,42	0,41	0,41	0,42	0,60	0,60	0,45

díky nálezům a určení stáří této facie na lokalitě z. od Březiny (RAK a VIKTORŮN 2012). Původní Dvořákova definice (DVOŘÁK *et al.* 1993) totiž zdůrazňovala nepřítomnost fosilií a nejisté stratigrafické zařazení ostrovských břidlic. V minulosti byly březinské břidlice téměř výhradně předmětem paleontologických výzkumů (např. CHLUPÁČ 1966), neboť obsahují hojné úlomky krinoidů, linguoidních brachiopodů, mlžů, goniatitů a zejména trilobitů.

Březinské souvrství tvoří jen několik desítek metrů mocný sj. orientovaný neprůběžný pruh, který v Moravském krasu vystupuje mezi obcemi Mokrá-Horákov, Březina a Ostrov u Macochy. Často tvoří tektonické šupiny v nejsvrchnější části líšeňského souvrství a v je-



Obr. 2. Litostratigrafické schéma studovaných souvrství (upraveno podle GILÍKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010).  
 Fig. 2. Lithostratigraphic scheme of studied formations (modified after GILÍKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010).

ho nadloží a v podloží sedimentů rozstáňského souvrství kulmské facie. Nejdůležitějšími oblastmi výskytu jsou prostory lomu „Střed“ v areálu mokerských lomů, kde vystupují jako mnohonásobně se opakující drčené tektonické šupiny. Další nově zdokumentované výskytu jsou sz. od obce Březina (např. d. b. BO141), kde byly sedimenty březinského souvrství objeveny ve stěnách sufózních závrtů v sousedství a nadloží vápenců macošského souvrství (OTAVA a ČERNÝ 2012). Silně fosiliferní březinské břidlice jsou interpretovány jako paleokrasová výplň stáří spodního až středního visé, která byla během variské orogeneze vrásněna spolu s okolními frasnými mokerskými vápenci macošského souvrství. DVORÁK *et al.* (1993) tyto sedimenty považoval za tektonickou šupinu zavrásněnou do macošského souvrství a označoval je jako bezfosilní ostrovské břidlice patrně tournaiského stáří.

Litostratigraficky náleží březinské souvrství k tzv. přechodovým faciím a sedimentovalo současně s nejmladšími faciemi líšeňského souvrství (vápencové brekcie s fosfority a silicity) a předcházelo sedimentaci kulmské turbiditní facie rozstáňského souvrství dranského kulmu (obr. 2). Už koncem ukládání sedimentů macošského souvrství se devonská sedimentační páně začala diferencovat na 2 vývoje: mělkovodnější hostěnický vývoj (sedimenty okraje šelfu a vyšší části svahu) a hlubokovodnější horákovský vývoj (sedimenty spodní části svahu). Zmíněná změna sedimentace odráží počátek tektonického neklidu a prohloubení sedimentačního prostředí (KALVODA 1997). Na hranici frasn–famen, během kellwasserského event, končí sedimentace velmi čistých vápenců vznikajících na karbonátových plošinách, v lagunách a korálových útesech. Téměř zde zanikla útesová fauna; staré platformy a útesy se lokálně vynořily a podlehly zkrasovění. Následně došlo k rozlámání, naklánění a utápění platformy a přechodu do pelagického režimu kombinací subsidence a růstu hladiny (BÁBEK *et al.* 2007). Ve spodním, lokálně až středním famenu se začaly usazovat sedimenty líšeňského souvrství, které je tvořeno hlíznatými (křtinskými) vápenci, biotritickými vápenci s vápnitými břidlicemi (hádsko-říčskými) a vápencovými brekciemi.

Různé facie se ukládaly v odlišných částech pánve. Sedimentace líšeňského souvrství nebyla průběžná v celé oblasti Moravského krasu, během tournai hiáty způsobené glaciostaticky nízkým stavem mořské hladiny (HLADIL *et al.* 2008). Začátek sedimentace březinského souvrství je v různých částech pánve odlišný. V hlubších oblastech šelfu (horákovský vývoj) došlo k nástupu sedimentace březinských břidlic během nejvyšší části spodního visé, kdežto v hostěnickém vývoji již dříve, při hranici tournai/visé (KALVODA 1997). Koncem středního visé jílovito-prachovito-karbonátová sedimentace březinského souvrství už místy plynule přechází do flyšových turbiditů (drob a břidlic rozstáňského souvrství drahanského kulmu; KALVODA 2002).

V rámci březinského souvrství byly v. od obce Březiny nalezeny a popsány také vulkanoklastické horniny (HLADIL *ed.* 1987). Nevystupují ve výchozech, ale nacházejí se ve formě deskovitých úlomků roztroušených na poli společně s březinskými břidlicemi (d. b. BG042; GILÍKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010). Díky špatné odkrytosti v této části není jasné, zda se jedná pouze o jednu stratigrafickou úroveň vulkanoklastik, nebo jde o více průběžných či neprůběžných poloh. V každém případě jejich mocnost nepřesahuje první metry.

Sedimenty podolského souvrství (prachovité břidlice, vápnité pískovce až písčité vápence) tvoří na povrchu sj. pruh 800 m široký a 2 000 m dlouhý v údolí Řičky v. od Brna. Na severu vystupují na povrch u Kadlecova mlýna a na J u obce Podolí u Brna, podle kterého dostaly i název. Tuto jednotku již vyčlenil DVOŘÁK (1989), avšak později byla definice podolského souvrství upřesněna jinými autory (GILÍKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010 a OTAVA a GILÍKOVÁ 2011). Podobně jako březinské souvrství zahrnujeme i podolské souvrství do přechodových facií. Usazování sedimentů podolského souvrství probíhalo v rámci hlubokovodnější pánve horákovského vývoje (obr. 2). Stáří podolského souvrství odpovídá podle paleontologických nálezů nejspodnějšímu visé až střednímu visé. Jak je zřejmé z vrtu HV-110A v Mariánském údolí i povrchové situace s. od vrtu, jedná se o alochtonní jednotku nasunutou na račické slepence myslejovického souvrství (GILÍKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010). Horní hranice podolského souvrství se jeví shodně s horní hranicí březinského souvrství jako plynulý přechod do typické kulmské facie, ovšem v tomto případě do myslejovického souvrství.

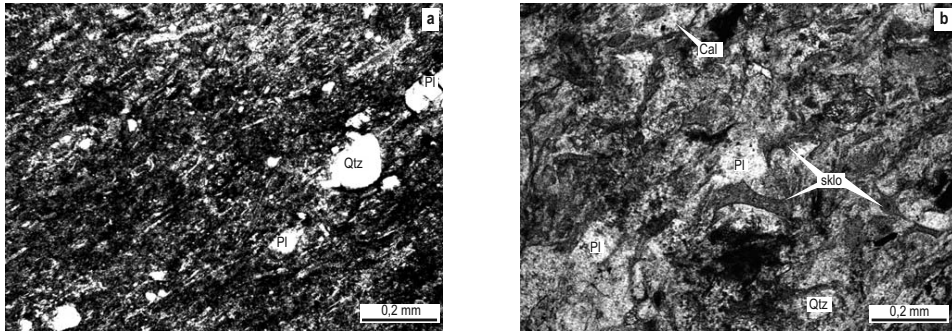
#### Litologická a petrografická charakteristika březinského souvrství

Březinské souvrství tvoří pestré zbarvené břidlice, prachovce s občasnými polohami vápenců, z nichž převažují červené, fialově hnědé, tmavě šedé a olivově zelené prachovité břidlice. Skládají se hlavně z jílových minerálů, chloritu a sericitu. Prachovitá frakce je tvořena zaoblenými klasty křemene a úlomky světlých slíd. Zejména vápnité jílovce obsahují rozptýlené zlomky jehlic křemitých hub, dále kalcisféry, pelety a vzácné úlomky krinoidů a foraminifer. Ve výplni komůrek se projevuje slabá silicifikace. Jílovce s příměsí radiolárií a spikulí křemitých hub bývají často silně impregnovány hematitem a místy přecházejí až do silicitů – radiolaritů. Běžně se zde objevují drobné akumulace organických zbytků nebo ostrohranných či polozaoblených psefitických klastů (obr. 3a). Tyto klasty jsou tvořeny živci, křemenem, případně sklovitými vulkanity s trachytickou stavbou. Makroskopicky zřetelné akumulace tvoří úlomky krinoidů, linguoidních brachiopodů, mlžů a zejména trilobitů (CHLUPÁČ 1966, RAK 2004, KALVODA *et al.* 2010). Na lokalitě d. b. BO141 z. od Březiny byly navíc popsány pro moravskoslezský spodní karbon zcela nové taxony flóry (Z. Šimůnek, pers. comm.) a četné ichnofosilie (T. Lehotský, pers. comm.).

Vzácnějším litotypem jsou mikritizované a částečně dolomitizované sparitické vápence s běžnými bioklasty a s až 20 mod. % klastů vulkanického křemene, plagioklasů, albitizovaných draselných živců a střípků zcela přeměněného vulkanického skla.

Jemnozrná vulkanoklastika jsou zřetelně laminovaná, zelenošedá, karbonatizovaná. Základní hmota složená hlavně z jílových minerálů a chloritu (původně z velké části vulkanický popel) obsahuje četné úlomky střípkovitěho vulkanického skla. Tyto střípky o velikos-





Obr. 3. Mikrofotografie (a) březinské břidlice a (b) vulkanoklastické horniny (bez analyzátoru).  
Fig. 3. Micrograph (a) Brežina shale and (b) volcanoclastic rock (without analyzer).

ti do 0,3 mm jsou sekundárně nahrazeny směsí chloritů a jilových minerálů (obr. 3b). Vzácně obsahují drobné vulkanické klasty s vyrostlicemi automorfně omezených plagioklasů (trachytická stavba). V klastickém podílu jsou dále výrazně zastoupeny ostrohranné (někdy rozlámané, většinou však automorfní) krystaly plagioklasu. Vzácně se objevují i zrna albitizovaného draselného živce. Méně často jsou přítomny ostrohranné až polozaoblené klasty křemene. Běžná jsou zrna automorfního limonitizovaného pyritu a lokálně se také objevují větší lupínky chloritu a muskovitu. V asociaci průsvitných těžkých minerálů se nachází kromě 30 mod. % idiomorfního zirkonu téměř 69 mod. % apatitu (GILÍKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010).

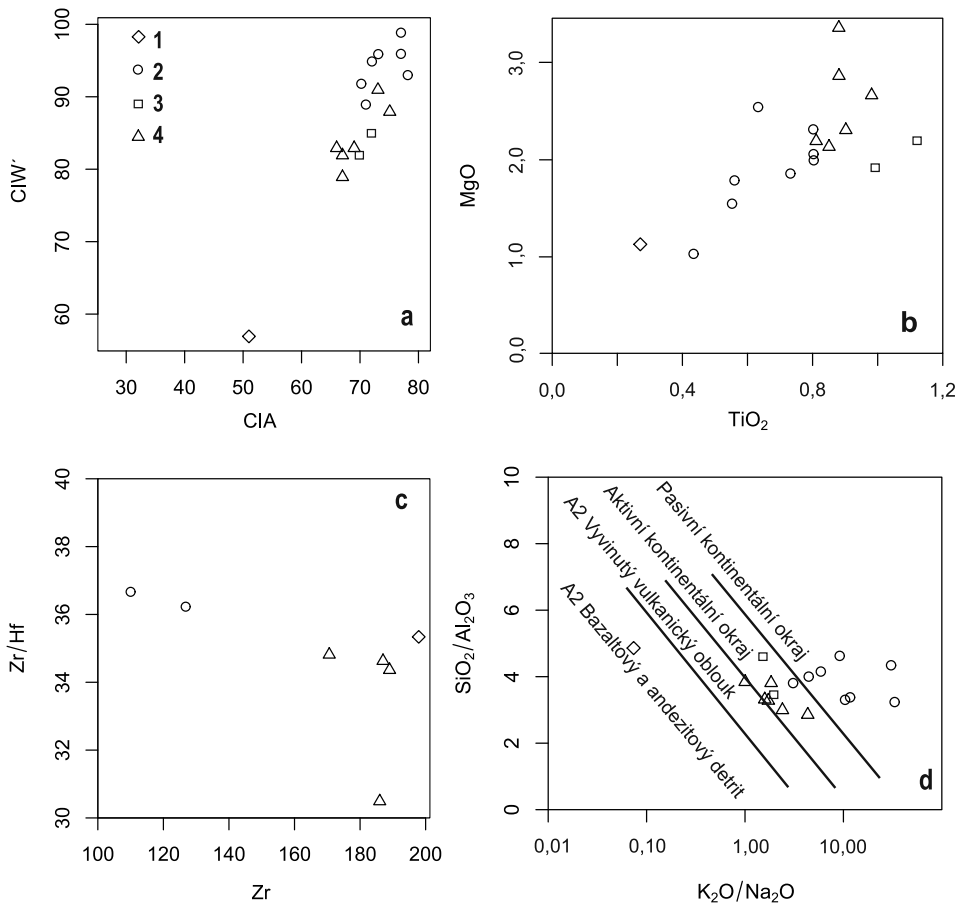
### Geochemická charakteristika

Chemické složení hornin březinského, podolského a rozstáňského souvrství (obr. 4 a 5) bylo vyhodnoceno na základě studia nových i starších analýz, přičemž nebyly zjištěny významné rozdíly mezi výsledky z různých laboratoří. Ze souvrství podolského jsou bohužel k dispozici pouze 2 starší analýzy (tab. 2). Kompletní sady stopových prvků však byly analyzovány pouze u nově odebraných vzorků, a proto je v jednotlivých diagramech zobrazen rozdílný počet analýz, a na obr. 5 dokonce nejsou zobrazeny břidlice podolského souvrství vůbec.

V březinském souvrství se díky variabilnímu zastoupení karbonátů může výrazně měnit obsah CaO (0,5–23,6 hmot. %) a také dalších hlavních oxidů (např. SiO<sub>2</sub> = 36,6–68,1 hmot. %). Právě kvůli obsahu karbonátů je nutné vypočítat množství CaO v silikátech (CaO\*), což je však možné jen u analýz se stanoveným CO<sub>2</sub> (tab. 1, 2). Proto při vyhodnocení stupně zvětvování není možné pro všechny analýzy použít index alterace CIA, jehož hodnoty jsou závislé právě na obsazích karbonátů –  $(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)) \times 100$ , vše v molárních procentech (NESBITT – YOUNG 1984, GOLDBERG 2001). U vzorků bez karbonátu nebo s uvedenou hodnotou CO<sub>2</sub> se index CIA pohybuje mezi 70 až 78 (obr. 4a). Mnohem výhodnější je z tohoto hlediska index zvětvování CIW' –  $(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O)) \times 100$ , v molárních procentech (HARNOIS 1988), který vykazuje hodnoty 89 až 99 (obr. 4a).

Karbonátem bohatá březinská břidlice (~30 mod. % kalcitu, CaO = 24 hmot. %) má ve srovnání s ostatními vzorky studovaných břidlic (rozstáňských, podolských i březinských, tab. 1, 2) vyšší obsahy Sr (264 vs. 55–96 ppm), As (54 vs. 5–19 ppm), Zn (164 vs. 85–121 ppm), Se (1,8 vs. < 0,5–0,5 ppm). Na druhou stranou má nižší obsahy P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,05 vs. 0,10–0,19 hmot. %), Ba (154 vs. 406–629 ppm) a dalších prvků. Březinská břidlice bez karbonátů má zase poměrně vysoké obsahy Pb (38 ppm) a Cu (96 ppm).

Vzorek vulkanoklastik z březinského souvrství svým chemickým složením odpovídá ryolitům (SiO<sub>2</sub> 70 hmot. % a Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O = 6,4 hmot. %). Obsahy K<sub>2</sub>O (0,4 hmot. %) jsou



Obr. 4. Chemické složení břidlice a vulkanoklastika: a - CIA vs. CIW', b - TiO<sub>2</sub> vs. MgO, c - Zr vs. Zr/Hf, d - K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (podle ROSERA a KORSCH 1986); (1) vulkanoklastická hornina, (2) březinské břidlice, (3) podolské břidlice (4) rozstánské břidlice.

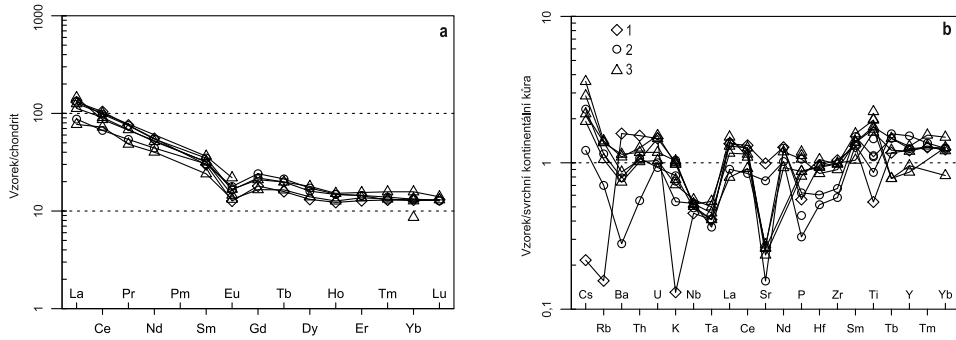
Fig. 4. Chemical composition shales and volcanoclastic: a - CIA vs. CIW', b - TiO<sub>2</sub> vs. MgO, c - Zr vs. Zr/Hf, d - K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (after ROSER and KORSCH 1986); (1) volcanoclastic rock, (2) Březina shales (3) Podolí shales, (4) Rozstání shales.

však velmi nízké a řadí je do tholeitické série (PECCERILLO a TAYLOR 1976). Vysoký obsah Na může souviset se sekundárními alteracemi, ke kterým došlo v důsledku interakce s mořskou vodou. Oproti okolním březinským břidlicím má velmi nízký poměr K/(Na+K) (0,05 vs. 0,67–0,95) a vysoký poměr Mg/(Fe+Mg) (0,54 vs. 0,29–0,32). Poměrně vysoké obsahy Th (16,4 ppm) a nízké Ta (0,9 ppm) stejně tak jako poměry Th/Yb (6,1) a Ta/Yb (0,3) nebo Th/Hf (2,9) indikují vznik vulkanických klastů v geotektonickém prostředí aktivního kontinentálního okraje (SCHANDL a GORTON 2002).

Podolské souvrství zastupují dvě starší analýzy bez stopových prvků. Tyto břidlice vykazují ve srovnání s ostatními studovanými sedimenty nejvyšší obsahy TiO<sub>2</sub> (0,99–1,12 vs. ostatní břidlice 0,27–0,98 hmot. %). Obsahy většiny dalších hlavních a stopových prvků jsou podobné jako v břidlicích rozstánského souvrství (obr. 4).

Břidlice rozstánského souvrství mají relativně stabilní obsahy CaO (0,40–0,98 hmot. %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16,2–20,2 hmot. %) a SiO<sub>2</sub> (56,7–62,4 hmot. %). Ve srovnání s březinskými břidli-





Obr. 5. Chemické složení břidlic a vulkanoklastika: a - chondritem normalizovaný REE diagram (BOYNTON 1984), b - svrchní kontinentální kůrou normalizované stopové prvky (TAYLOR - MCLANNAN 1995); (1) vulkanoklastická hornina, (2) březinské břidlice, (3) rozstánské břidlice.

Fig. 5. Chemical composition slates and volcanoclastic: a - chondrite-normalized REE plot (BOYNTON 1984), b - upper continental crust normalized trace-elements (TAYLOR - MCLANNAN 1985); (1) volcanoclastic rock, (2) Brezina shales, (3) Rozstání shales.

cemi mají většinou nižší CIA (66–74) a CIW' (79–91). Poměr  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  a další indikují vyšší stupeň zvětvování pro klastický materiál březinských břidlic ve srovnání s rozstánskými a podolskými břidlicemi. Zajímavá je z tohoto hlediska pozitivní korelace mezi  $\text{MgO}$  a  $\text{TiO}_2$  (obr. 4b). Pokud jde o HFS (tab. 3) prvky jsou patrně především odlišností v nižších obsazích Zr (110–127 vs. 171–189 ppm) a Hf (3,0–3,5 vs. 4,9–6,1 ppm) a vyšší poměr Zr/Hf v březinských břidlicích ve srovnání s břidlicemi rozstánského souvrství (obr. 4c).

Břidlice březinského, rozstánského souvrství a vulkanoklastika (tab. 3) mají podobné celkové obsahy REE (126–191 ppm). Přičemž nejvyšší obsahy REE mají vulkanoklastika. Vzájemně podobné jsou normalizované křivky vzácných zemin (BOYNTON 1984; obr. 5a), které pro všechny popisované horniny vykazují zápornou Eu anomálii ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,55\text{--}0,66$ ) a obohacení LREE ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 6,1\text{--}14,5$ ). Odlišné jsou však obsahy stopových prvků normalizované průměrnou svrchní kontinentální kůrou (TAYLOR a MCLANNAN 1995; obr. 5b). Všechny vzorky sice mají negativní Nb a Ta anomálie, avšak pouze břidlice jsou obohaceny Cs. Březinské břidlice pak navíc vykazují ochuzení o Ba, K, Sr, P, Hf, Zr a obohacení LREE (tab. 3).

## Diskuse

Pelity předflyšového i flyšového vývoje drahanského kulmu se skládají ze silikátových a křemenných zrněk nejčastěji o velikosti několika desítek mikrometrů (zrnitost se však pohybuje od jílovité až do písčité frakce). Dále jsou přítomny fylosilikáty (jílové minerály, slídy, chlority), směsi krystalických až subkrystalických silikáto-hydrooxidických sloučenin a oxihydroxidů (např. limonit), organické látky, karbonáty a samozřejmě těžké minerály. V této heterogenní směsi jsou jednotlivé prvky distribuovány značně nerovnoměrně. V klastickém podílu sedimentů bývá většina REE a řada HFSE vázána na těžké minerály, zatímco výskyt LIL prvků bývá spojován hlavně s fylosilikáty a živci (RICHARDSON a MCSWEEN 1988, NOZAKI 2001, BORGES *et al.* 2008). Určité množství těchto prvků bývá rozpuštěno v mořské nebo diagenetické vodě, z nichž se může sorbovat na jílové minerály či krystalické až subkrystalické silikáto-hydrooxidické a oxihydroxidické sloučeniny (DREVER *ed.* 1985, NOZAKI 2001). Výsledné chemické složení hornin je pak ovlivněno řadou faktorů v průběhu zvětvování, sedimentace a diagenese. Interpretace chemického složení sedimentů tak nemusí být vždy jednoznačná.

### *Vztah mezi chemickým složením a mineralogií sedimentů*

Břidlice březinského souvrství jsou z chemického hlediska poměrně variabilní skupinou hornin, což je dáno hlavně proměnlivým zastoupením karbonátů a organických zbytků. S nárůstem karbonátů v hornině klesá zastoupení P, Zr, Hf, LREE, což patrně souvisí s úbytkem těžkých minerálů (zirkonu a pak hlavně apatitu, případně monazitu). V porovnání s rozstáňskými břidlicemi mají březinské břidlice nižší obsahy Zr, Hf a velmi často také P. Avšak na druhou stranu mají podobné obsahy La, Ce, U a někdy dokonce vyšší obsahy Y (obr. 5b). To by mohlo souviset s rozdílným zastoupením těžkých minerálů jako je zirkon, monazit a xenotim.

Vulkanoklastika mají obsahy Zr, Hf, Ce, La a U podobné jako rozstáňské břidlice a mají dokonce poněkud vyšší obsahy Th. Významný podíl zirkonu a monazitu mezi těžkými minerály byl potvrzen zjištěním jejich automorfních zrn přímo ve výbrusu. Průsvitná frakce těžkých minerálů totiž obsahuje 30 mod. % idiomorfního zirkonu (GILIKOVÁ a HLADIL *eds.* 2010).

Pozitivní korelace mezi MgO a TiO<sub>2</sub> (obr. 4b) naznačuje možnost, že některé nemobilní prvky jsou vázány v klastických minerálech (Ti v břidlicích rozstáňského souvrství je patrně často vázán v ilmenitu, chloritizovaném biotitu a v dalších tmavých minerálech).

### *Zdrojová oblast sedimentů*

Vzorky březinských břidlic bez karbonátu mají vysoké indexy CIA a CIW', což potvrzuje, že jde o geochemicky vyzrálý sediment. Vyšší hodnoty indexu CIW' ve srovnání s břidlicemi rozstáňského a podolského souvrství dokazují, že materiál březinských břidlic prošel intenzivnějším zvětráváním.

Na základě chemického složení je možné odhadnout geotektonickou pozici zdroje materiálu pro studované sedimentární horniny. Podle poměru K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ROSER a KORSCH 1986) byl materiál březinských břidlic derivován z pasivního kontinentálního okraje a pro břidlice rozstáňského a podolského souvrství z aktivního kontinentálního okraje (obr. 4d). Ovšem velmi nízké obsahy Hf a poměry La/Th (4–5) v březinských břidlicích nejsou typické pro sedimentární materiál z pasivního kontinentálního okraje, ale spíše pro sedimenty s vulkanickou příměsí (FLOYD a LEVERIDGE 1987).

V době sedimentace březinských břidlic byl tedy do pánve transportován materiál, který prošel výrazným chemickým zvětráváním a zde se mísil s vulkanoklastickým materiálem. Naopak během sedimentace rozstáňského a podolského souvrství dominoval přínos materiálu s mnohem nižším stupněm chemické zralosti. Zajímavá je také změna v poměrech Zr/Hf (obr. 4c), což může naznačovat, že se změnila zdrojová oblast sedimentárního materiálu. Není však vyloučen ani vliv přínosu vulkanického materiálu, neboť vulkanoklastika mají poněkud vyšší poměr Zr/Hf než břidlice rozstáňského souvrství.

### *Sedimentační prostředí*

Vzorky březinských břidlic vykazují nevýraznou zápornou Ce anomálii ( $Ce/Ce^* = C_{eN} / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$ ) 0,97–0,98, zatím co břidlice rozstáňského souvrství nevýraznou kladnou Ce anomálii (1,04–1,18). Sedimentační prostředí březinských břidlic bylo pravděpodobně více redukční než sedimentační prostředí břidlic rozstáňského souvrství. V mořské vodě se totiž Ce<sup>III+</sup> oxiduje na méně rozpustný Ce<sup>IV+</sup> a proto sedimenty vznikající v redukčním prostředí vykazují zápornou Ce anomálii, zatím co sedimenty v oxidačním prostředí Ce anomálii nemají nebo ji mají kladnou (BELLANCA *et al.* 1997, CULLERS 2002). Samozřejmě k těmto závěrům je potřeba přistupovat s určitou dávkou opatrnosti, protože část REE je vázána v těžkých minerálech, jako je zirkon nebo apatit, a Ce anomálie tedy mohla být zděděná ze zdrojových hornin.

Březinské břidlice mají poměrně kolísavé zastoupení těžkých kovů (Pb, As, Zn, Cu, Cd, Hg). Zvýšené obsahy těchto prvků bývají vázány na sedimentační pánve, v nichž dominuje anoxické prostředí (COOKE *et al.* 2000). U dvou studovaných vzorků byl jejich obsah závislý na množství karbonátu v hornině. Břidlice s nízkým obsahem karbonátu vyka-

zovala zvýšené obsahy Pb, Cu. Břidlice bohatá karbonátem obsahovala hodně As, Zn, Cd a dokonce i Se (tab. 3). Zvýšené obsahy některých prvků, jako je Sr a Zn v březinských břidlicích s vysokým obsahem kalcitu (tab. 3), můžeme vysvětlit obecně dobrou vazbou těchto prvků na karbonáty. Jako indikátor aktivity kyslíku v sedimentačním prostředí může sloužit poměr Ni/Co (JONES a MANNING 1994), jehož hodnoty nad 5 indikují anoxické prostředí, zatím co hodnoty pod 5 oxidické prostředí. Březinské břidlice sice mají tyto poměry pouze v rozmezí 3,9–4,3, ale jsou podstatně vyšší než hodnoty pro břidlice rozstáňského souvrství (2,4–2,8). Dalším poměrně dobrým indikátorem oxidačních podmínek při sedimentaci je poměr V/Cr, protože  $V^{IV+}$  se poměrně snadno váže na organickou hmotu, a proto horniny s poměrem V/Cr nad 2 sedimentovaly v anoxickém prostředí (JONES a MANNING 1994). Březinské břidlice vykazují poměry V/Cr od 1,3 do 2,2, zatím co břidlice rozstáňského souvrství pouze v rozmezí 1,1 až 1,3.

Redukční prostředí spojené se vznikem záporné Ce anomálie a zvýšeným obsahem některých těžkých kovů je vázáno hlavně na místa s nahromaděním organických zbytků. Taková místa jsou často situována v oblastech, kde březinské břidlice tvoří paleokrasové výplně ve vápencích.

### Závěry

Březinské souvrství je přechodovým typem sedimentace mezi sedimentací kalciturbiditů líšeňského souvrství a flyšovou turbiditní siliciklastickou sedimentací rozstáňského souvrství drahanského kulmu. Vulkanoklastika zjištěná v březinském souvrství svým chemickým složením odpovídají vulkanickým horninám vzniklým v geotektonickém prostředí aktivního kontinentálního okraje. Březinské břidlice mají poměrně proměnlivé minerální a chemické složení, což je dáno hlavně variabilním obsahem karbonátů (CaO = 0,53–0,98 hmot. %). Ve srovnání s břidlicemi rozstáňského a podolského souvrství vykazují březinské břidlice vyšší stupeň chemické zralosti, místy ale obsahují příměs vulkanického materiálu. V závislosti na množství karbonátu se v březinských břidlicích mění zastoupení Pb, Cu, As, Zn, Cd, Se a Sr. V porovnání s rozstáňskými břidlicemi mají březinské břidlice nižší obsahy Zr, Hf a velmi často také P, Ti. Březinské břidlice pravděpodobně sedimentovaly v podstatně méně prokysličeném mořském prostředí než rozstáňské břidlice, případně to může též souviset s redukčními podmínkami během diagneze těchto břidlic.

### Poděkování

Autoři děkují J. Hladilovi a J. Faimonovi za kritické pročtení rukopisu. Práce byla vypracována s finanční podporou projektu ČGS 390003 (Základní geologické mapování Brněnské aglomerace v měřítku 1:25 000).

### LITERATURA

- BÁBEK, O., PŘIKRYL, T., HLADIL, J., 2007: Progressive drowning of carbonate platform in the Moravo-Silesian Basin (Czech Republic) before the Frasnian/Famennian event: facies, compositional variations and gamma-ray spectrometry. - *Facies* 53, 2, 293–316
- BELLANCA, A., MASETTI, D., NERI, R., 1997: Rare earth elements in limestone/marlstone couplets from the Albanian-Cenomanian Cison section (Venetian region, northern Italy): assessing REE sensitivity to environmental changes. - *Chem. Geol.*, 141, 141–152.
- BORGES, J. B., HUH, Y., MOON, S., NOH, H., 2008: Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East. - *Chem. Geol.*, 254, 52–72.
- BOYNTON, W. V., 1984: Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. - In: Henderson, P. (ed.), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63–114. Amsterdam.
- COOKE, D. R., BULL, S. W., LARGE, R. R., MCGOLDLICK, P. J., 2000: The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits. - *Econ. Geol.*, 95, 1–18.

- CULLERS, R. L., 2002: Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, Co, USA. - *Chem. Geol.*, 191, 305-327.
- DREVER, J. I. (ed.), 1985: The Chemistry of Weathering. - Dordrecht: D. Reidel Publ. Co.
- FLOYD, P. A., LEVERIDGE, B. E., 1987: Tectonic environment of the Devonian mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. - *J. Geol. Soc. London* 144, 531-542.
- DVOŘÁK, J., 1989: Geologie souvrství lišeňského a jeho nadloží v j. části Moravského krasu (vyhodnocení tří strukturálních vrtů Horákov). - *MS, ÚÚG Praha*. 49 str.
- DVOŘÁK, J., ŠTELCL, O., DEMEK, J., MUSIL, R., 1993: Geologie a geomorfologie Moravského krasu. In: Musil, R. ed. Moravský kras - labyrinty poznání. - GEOprogram, Adamov, 31-75.
- GILÍKOVÁ, H., HLADIL, J. (eds), BUBÍK, M., ČERNÝ, J., BURIÁNEK, D., DVOŘÁK, J., FAMĚRA, M., HAVÍŘ, J., HRDLÍČKOVÁ, K., KALVODA, J., KONEČNÝ, F., KOCIÁNOVÁ, L., KOVÁČIK, M., KRYŠTOFOVÁ, E., KRUMLOVÁ, H., KUMPAN, T., KUNCEOVÁ, E., MAŠTERA, L., MELICHAR, R., MÜLLER, P., NEHYBA, S., OTAVA, J., PECINA, V., PECKA, T., TOMANOVÁ PETROVÁ, P., POUL, I., POULOVÁ, D., REZ, J., SKÁČELOVÁ, D., SKÁČELOVÁ, Z., SLOBODNÍK, M., ŠIKULA, J., ŠRÁMEK, J., VEČEŘA, J., VÍT, J., WEINER, T., 2010: Vysvětlivky k základní geologické mapě ČR 1:25 000, list 24-413 Mokrá-Horákov. - *MS ČGS Brno*.
- GOLDBERG, K., 2001: The Paleoclimatic Evolution of the Permian of the Paraná Basin in southern Brazil. Ph.D. Dissertation, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago.
- HARNOIS, L., 1988: The CIW index: a new Chemical Index of Weathering. - *Sed. Geol.*, 55, 319-322.
- HLADIL, J. (ed.), 1987: Vysvětlivky k základní geologické mapě 1:25 000, list Mokrá-Horákov 24-413. 120 str. Manuskript. Český geologický ústav.
- HLADIL, J., KALVODA, J., ZAPLETAL, J., 2008: Spodní karbon, do konce visé. - In: Cháb, J., Breiter, K., Fatka, O., Hladil, J., Kalvoda, J., Šimůnek, Z., Štorch, P., Vašíček, Z., Zajíc, J., Zapletal, J., Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského pokryvu, 135-140, Česká geologická služba Praha.
- CHLUPÁČ, I., 1966: The Upper Devonian and Lower Carboniferous Trilobites of the Moravian Karst. - *Sbor. Geol. věd, Paleontologie*, 7, 1-143. Praha.
- JANOUŠEK, V., FARROW, C. M., ERBAN, V., 2006: Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). - *J. Petrology*, 47, 6, 1255-1259.
- JONES, B., MANNING, D. C., 1994: Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleo-redox conditions in Ancient mudstones. - *Chem. Geol.*, 111, 1-4, 111-129.
- KALVODA, J., 1997: Pechod karbonátové a kulmské sedimentace v širším okolí Mokrě. - *MS, PrF MU Brno*.
- KALVODA, J., 2002: Late Devonian - early Carboniferous foraminiferal fauna: zonation, evolutionary events, paleobiogeography and tectonic implications. - *Folia, Geologia* 39, Masaryk University Brno, 1-213.
- KALVODA, J., DEVUYST, F. X., BÁBEK, O., DVOŘÁK, L., RAK, Š., REZ, J., 2010: High resolution biostratigraphy of the Tournaisian-Viséan (Carboniferous) boundary interval, Mokrá Quarry, Czech Republic. - *Geobios*, 43, 317-331.
- NESBITT, H. W., YOUNG, G. M., 1984: Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1523-1534.
- NOZAKI, Y., 2001: Rare earth elements and their isotopes. - In: Steele, J. S., Turekian, K. K., Thorpe, S. A. (eds), *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2354-2366, Academic, London.
- OTAVA, J., ČERNÝ, J., 2012: Paleokras nebo tektonika? Březina-Vysoká, Moravský kras. - *Zprávy Vlast. Mus. v Olomouci*, 303, 118-121, Olomouc.
- OTAVA, J., GILÍKOVÁ, H., 2011: Podolské souvrství - Raison d'être. - *MS, Sborník 2. otevřeného kongresu ČGS*, 68, Monínek.
- PECCERILLO, R., TAYLOR, S. R., 1976: Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- PRICE, J. R., VELBEL, M. A., 2003: Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. - *Chem. Geol.*, 202, 3-4, 397-416.
- RAK, Š., 2004: Tribitová fauna hraničních vrstev tournai-visé z Mokrě u Brna. - *MS, diplomová práce*, PrF MU Brno.
- RAK, Š., VIKTORÝN, T., 2012: Předběžné paleontologické zhodnocení lokality Březina 3 a její srovnání s ostatními výskytmi trilobitové fauny v břidlicích březinského souvrství v Moravském krasu. - *Zprávy Vlast. Mus. v Olomouci*, 303, 128-131.
- RICHARDSON, S. M., MCSWEEN, H. Y., 1988: Geochemistry: Pathways and Processes. - New York: Prentice Hall.
- ROSER, B. P., KORSCH, R. J., 1986: Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. - *J. Geology*, 94, 5, 635-650.
- SCHANDL, E. S., GORTON, M. P., 2002: Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. - *Econ. Geol.*, 97, 629-642.
- TAYLOR, S. R., MCLENNAN, S. M., 1995: The geochemical evolution of the continental crust. - *Rev. Geophys.*, 33, 241-265.