PRVKOVÁ CHEMOSTRATIGRAFIE SVRCHNÍ KŘÍDY V OKOLÍ LETOVIC (ČESKÁ KŘÍDOVÁ PÁNEV, ČESKÁ REPUBLIKA)

ELEMENT CHEMOSTRATIGRAPHY OF THE UPPER CRETACEOUS IN THE VICINITY OF LETOVICE (BOHEMIAN CRETACEOUS BASIN, CZECH REPUBLIC)

JOSEF RIEGL, TOMÁŠ KUMPAN

Abstract

Riegl, J., Kumpan, T., 2021: Prvková chemostratigrafie křídy v okolí Letovic (česká křídová pánev, Česká republika). - Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 106, 1, 65-77 (with English summary).

Element chemostratigraphy of the Upper Cretaceous in the vicinity of Letovice (Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic)

The study provides new data on a major and trace element composition of the Upper Cretaceous Peruc-Korycany and Bílá Hora formations belonging to the Orlice-Žďár sub-basin of the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. Samples were taken in regular vertical spacing (20 and 40 cm) from three sections in the surroundings of Letovice (Březinka, Rudka u Kunštátu - Kříb, Vlkov). Lithology of the sections was logged, and six lithofacies (labelled as F1 to F6) were distinguished. The samples were powdered in an agate mill and measured by the handheld X-ray fluorescence spectrometer. Principal component analysis revealed groups of elements with common geochemical behaviour related to biogenic carbonate (Ca, Sr), detrital (Al, Zr, K, Fe, Zn, Pb), authigenic (Fe, Zn, Mn) and mixed detrital-biogenic (Si) mineral phases. A special attention was paid to examining relationship of detrital elements and facies. The uppermost part of the Peruc-Korycany Formation (Korycany Member) has the highest content of Si, K, and Fe. The basal member of the Bílá Hora Formation is characterised by the highest concentrations of Al, Ti, Zr, Zn, Mn, and Pb, and the lower and upper members of the Bílá Hora Formation have the highest content of Ca and Sr. Trends of linear regressions among Al, Zr and Ti are different for each lithostratigraphic member. The Korycany Member (facies F1), basal member of the Bílá Hora Formation (facies F2), and medium to coarse grained sandstone facies F6 of the upper member have high Fe/Al and low Ti/Al and Zr/Al ratios, compared to the marlstone to medium grained sandstone facies F3, F4, and F5 of the lower and upper members of Bílá Hora Formation. These differences are interpreted as reflecting a change of heavy minerals associations probably related to sorting mechanisms rather than to a change in a provenance. Ti is interpreted as the most typicial element proxies of grain size in the Bílá Hora Formation, where Ti (mostly incorporated in silt and fine grained fraction, and eventually in illite) decreases along with coarsening. The Ti curve reflects general coarsening upward trend represented by two cycles in the Bilá Hora Formation. The lower and upper cycles are tentatively correlated with genetic sequences TUR 1 and TUR 2, respectively, related to sea-level fluctuations in the Bohemian Cretaceous Basin.

Key words: Bohemian Cretaceous Basin, Cenomanian, Turonian, Bilá Hora Formation, geochemical proxies Josef Riegel, Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Kotlářská 2, Brno 611 37, e-mail: riegl1992@seznam.cz

Tomáš Kumpan, Department of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Kotlářská 2, Brno 611 37, e-mail: kumpan@sci.muni.cz

ÚVOD

Česká křídová pánev je epikontinentální transtenzní pánev, která vznikla během pozdně křídového eustatického maxima v raném cenomanu a zbytky její nejmladší výplně mají san-

tonské stáří (ULIČNÝ et al. 2009). Po počáteční fázi ukládání kontinentálních sedimentů došlo v pozdním cenomanu k transgresi a pánev byla vyplňována mořskými sedimenty, především klastiky, která však hojně přecházejí do karbonátových hornin. Klastický materiál byl do pánve transportován ze severně položeného mostecko-teplického ostrova, a především ze sudetských ostrovů. Z jihu dotoval pánev detritickým materiálem středoevropský ostrov, imenovitě jeho moldanubická část. Oblast pod vlivem středoevropského ostrova má odlišný litofaciální vývoj od ostatních částí pánve, označovaný jako orlicko-žďárský vývoj (např. HERČÍK et al. 1999). K jeho usazování docházelo v tektonicky založeném orlicko-žďárském depocentru (ULIČNÝ et al. 2009; ČECH 2011). V současnosti tvoří jihovýchodní cíp zbytku výplně české křídové pánve. Orlicko-žďárský litofaciální vývoj je charakterizován vápnitými, běžně jemnozrnnými a glaukonitickými pískovci. K uložení několika cyklů těchto sedimentů docházelo v prostředí epikontinentálního moře (ULIČNÝ et al. 2009). V okolí Letovic (obr. 1) je celá řada lokalit, které umožňují studovat sledy orlicko-žďárského litofaciálního vývoje na výchozech, a především odkryvech ve starých či aktivních lomech. Zachovala se zde spodní část výplně pánve, zahrnující perucko-korycanské souvrství (cenoman), bělohorské souvrství (spodní až střední turon) a část souvrství jizerského (střední až svrchní turon) (ČECH et al. 1980; ČECH 2011). Uloženiny svrchní křídy byly v okolí Letovic studovány především v 50. až 70. letech 20. století v rámci průzkumu ložisek jílovců a sklářských písků perucko-korycanského souvrství (např. Müller 1959, VACHTL 1968, VAJDÍK a VYBÍRAL 1973).

Tato zpráva přináší předběžné výsledky studia prvkového složení svrchní části perucko-korycanského souvrství (korycanských vrstev) a bělohorského souvrství, odkrytých na lokalitách Březinka, Rudka u Kunštátu – Kříb a Vlkov (obr. 1 a 2). Studium prvkového složení sedimentárních hornin je využíváno při rekonstrukcích chemicko-fyzikálních podmínek během jejich ukládání i po uložení (např. redoxní podmínky, přínos detritického materiálu a jeho provenience, diagenetické procesy; např. SAGEMAN a LYONS 2003; CRAIGIE 2018), k rychlé aproximaci některých parametrů, které lze jinými metodami stanovit obtížněji nebo vůbec (např. sledování změn zrnitosti v jemnozrnných sedimentech; např. CROU-



- Obr. 1. Zjednodušená geologická mapa zájmového území (upraveno podle CHAB *et al.* 2007). Legenda:
 1 = letovické krystalinikum; 2 = permské sedimenty; 3 = svrchní křída (perucko-korycanské souvrství);
 4 = svrchní křída (bělohorské souvrství); 5 = svrchní křída (jizerské souvrství).
- Fig. 1. Simplified geological map of the studied area (adapted from CHAB *et al.* 2007). Legend: 1 = Letovice Unit;
 2 = Permian Sediments; 3 = Upper Cretaceous (Peruc-Korycany Fm); 4 = Upper Cretaceous (Bílá Hora Fm);
 5 = Upper Cretaceous (Jizera Fm).

DACE a ROTHWELL 2015) anebo k chemostratigrafickým účelům. Cílem našeho výzkumu bylo, kromě obecné geochemické charakterizace studovaných hornin, vyhodnotit geochemická data s důrazem na informace o detritické složce sedimentu, ověřit, jaké jsou její nejlepší prvkové zástupné proměnné (proxy) a interpretovat význam jejich vertikálních změn.

MATERIÁL A METODY

Petrografický popis studovaných sedimentárních sledů a odběr vzorků probíhal ze stěn lomů po odstranění vnější zvětralé vrstvy. Vzorkovány byly profily v lomech Březinka (mocnost 56 m; vzorkováno po 40 cm; 137 vzorků; báze GPS: 49° 38' 3.61" S, 16° 35' 28.64" V; obr. 1 a 2a), Kříb v Rudce u Kunštátu (mocnost 7,6 m; pravidelný krok vzorkování 20 cm; celkem 39 vzorků; GPS: 49° 31' 27" S, 16° 31' 20" V; obr. 1 a 2b) a Vlkov (mocnost 26 m; pravidelný krok vzorkování 40 cm; celkem 66 vzorků; GPS: 49° 35' 2" S, 16° 31' 55" V; obr. 1 a 2c).



- Obr. 2. Studované lokality: a) lom Březinka, odkrývající perucko-korycanské a bělohorské souvrství (rozhraní vyznačeno přerušovanou linií); b) hranice mezi perucko-korycanským a bělohorským souvrstvím na profilu Rudka u Kunštátu Kříb (vyznačeno přerušovanou linií); c) svrchní člen bělohorského souvrství s hojnými polohami rohovců, profil Vlkov.
- Fig. 2. Studied sites: a) the Peruc-Korycany and Bílá Hora formations exposure in the Březinka quarry (boundary marked by the dashed line); b) boundary of the Peruc-Korycany and Bílá Hora formations in the Rudka u Kunštátu Kříb section (boundary marked by the dashed line); c) upper member of the Bílá Hora Formation with abundant occurence of chert beds (marked by the white arrows), Vlkov section.

Odebrané vzorky byly mletím v achátovém mlýnu homogenizovány na prášek o hmotnosti cca 5 g. K stanovení prvkového složení byl použit ruční energiově disperzní rentgenově fluorescenční (ED-XRF) spektrometr Delta Premium (Innov-X, USA) v módu Geochem Vanad, na Ústavu geologických věd PřF Masarykovy univerzity. Práškové vzorky byly měřeny v kyvetách přes dno z milarové fólie po dobu 240 vteřin. Opakovatelnost měření byla kontrolována výpočtem směrodatné odchylky mezi dvaceti měřeními jednoho vzorku. Použity byly jen prvky se směrodatnou odchylkou pod 10 % od průměru, konkrétně Al (1,7 %), Si (0,6 %), K (1,5 %), Ca (0,6 %), Ti (2,6 %), Mn (2,8 %), Fe (0,4 %), Zn (5,1 %), Zr (0,6 %) a Pb (8,1 %). Naměřené prvky Cu, Th, U, P, S, Cl, Co, Ni, In, Sn a Sb nebyly použity, protože u většiny vzorků byly jejich koncentrace pod detekční limitem spektrometru. Naměřené koncentrace (kromě Si a Zr) byly vynásobeny korekčním faktorem získaným z rovnic lineárních regresí mezi prvky ze vzorků prachovců a pískovců měřených jak ED-XRF analyzátorem, tak v akreditované laboratoři Bureau Veritas, Vancouver metodou ICP-OES/MS. Polarizačním mikroskopem bylo studováno 15 krytých výbrusů, ve kterých bylo sledováno zastoupení hlavních horninotvorných minerálů.

VÝSLEDKY

Petrografie

Na základě terénního studia bylo vyčleněno celkem šest litofacií označených kódy F1 až F6. Charakteristika litofacií je doplněna jejich mikropetrografickým popisem.

F1 – jemnozrnné až hrubozrnné glaukonitické pískovce (obr. 3a)

Jsou to jemně až hrubě zrnité pískovce tmavě zelené barvy. V písčité a prachovité frakci byl ve výbrusech pozorován především křemen a glaukonit (který v některých polohách převládá), méně hojný je muskovit, sulfidy (pyrit?), a vzácně se vyskytují živce (obr. 3a). Základní hmota je jílovitá, místy impregnovaná oxyhydroxidy Fe a Mn a pozorována byla také nehojná silicifikace mezerní hmoty chalcedonem. Běžně se v pískovci vyskytují rozptýlené limonitové konkrece či laterálně stálejší krusty. Místy jsou pískovce velmi intenzivně bioturbované.

F2 – glaukoniticko-fosfatické jílovité pískovce

Jedná se o skvrnité (oranžovo-zelené) pískovce, tvořené především křemenem a vysokým obsahem glaukonitu (obr. 3b) a výskytem fosfatických konkrecí či klastů. Pískovce jsou jemně až středně zrnité a jsou velmi silně bioturbované. Základní hmota je jílovito-karbonátová.

F3 – spongilitické slínovce a vápnité prachovce

Světle šedé bioturbované slínovce a prachovce jsou uložené v lavicích o mocnostech několika decimetrů. Při zvětrávání se roubíkovitě nebo hlízovitě rozpadají. Jsou tvořené hlavně detritickým křemenem, dále spikulami porifer, méně často foraminiferami a nehojným muskovitem a glaukonitem (obr. 3c). Základní hmota je značně jílovitý mikrit, místy silicifikovaný.

F4 – spongilitické vápnité prachovce a jemnozrnné pískovce s glaukonitem

Pískovce jsou světle šedé, bioturbované a uložené jako lavice, které místy vyvětrávají v deskovité zvlněné vrstvy, místy se rozpadají hlízovitě. Tvořené jsou křemen, glaukonitem, spikulami (obr. 3c) a nehojnými karbonátovými bioklasty. Jejich základní jílovito-karbonátová hmota bývá hojně silicifikována a stejně je tomu i u následujících facií F5 a F6.

F5 – jemně až středně zrnité vápnité glaukonitické pískovce

Tyto pískovce jsou uložené v lavicích, mají světle šedou až okrovou barvu a jsou tvořené především zrny křemene a glaukonitu a proměnlivým množstvím spikul. Místy je hojná silicifikace. Jedná se o konkrecionální i laterálně stálejší polohy, 2 až 20 cm mocné, tvořené silicifikovanými a kalcifikovanými spikulami a nehojnými křemennými a kalcitovými zrny v chalcedonové základní hmotě (obr. 2c a 3e).

F6 – středně až hrubě zrnité vápnité glaukonitické pískovce

Nejhrubozrnnější studovanou litofacií bělohorského souvrství jsou světle šedé až okrové glaukonitické pískovce, které jsou lavicovité a deskovité, místy jsou šikmo zvrstvené. Ve výbrusech byly pozorovány kromě křemenných zrn, glaukonitu, spikul a muskovitu, také nehojné živce (obr. 3f). Stejně jako v litofacii F5 jsou i pro litofacii F6 charakteristické rohovce.



- Obr. 3. Mikrofotografie výbrusů dokumentovaných litofacií (grafické měřítko 500 mikronů): a) F1 hrubozrnný glaukonitický pískovec, XPL; b) F2 glaukoniticko-fosfatický jílovitý pískovec, PPL; c) F3 spongilitický slínovec, PPL; d) F4 spongilitický vápnitý prachovec až jemnozrnný pískovec s glaukonitem, XPL; e) rohovec z facie F5, XPL; f) F6 hrubozrnný vápnitý glaukonitický piskovec, XPL. Zkratky: qtz = křemen, gl = glaukonit, fs = živec, ph = fosfát, m = muskovit, fo = foraminifera, sp = spikula.
- Fig. 3. Thin section microphotographs of the documented lithofacies (graphic scale 500 microns): a) coarse grained glauconitic sandstone, XPL; b) F2 glauconitic-phosphatic argillaceous sandstone, PPL; c) F3 spongilitic marlstone, PPL; d) F4 spongilitic calcareous siltstone to fine grained sandstone with glauconite, XPL; e) chert from the facies F5, XPL; f) F6 coarse grained calcareous glauconitic sandstone, XPL. Abbreviations: qtz = quartz, gl = glauconite, fs = feldspar, ph = phosphate, m = muscovite, fo = foraminifer, sp = spicule.

Litostratigrafie

Všechny popsané litofacie jsou přítomné na profilu Březinka, na lokalitě Kříb jsou to facie F1, F2 a F3 a ve Vlkově byly dokumentovány pouze facie F3 a F4. Jako referenční lokalita této studie byl proto vybrán lom Březinka, kde je odkrytý 56 metrů mocný sled od nejvyšší části korycanských vrstev až do nejvyšší části bělohorského souvrství (obr. 2a a 4). Profil Rudka odkrývá kontakt mezi korycanskými vrstvami a spodní část bělohorského souvrství (obr. 2b), zatímco na lokalitě Vlkov jsou odkryté pouze vyšší části souvrství (obr. 2c). Níže je popsána stratigrafická distribuce dokumentovaných litofacií na profilu Březinka. *Perucko-korycanské souvrství*

Nejvyšší část korycanských vrstev perucko-korycanského souvrství je na studovaných lokalitách tvořena litofacií F1. Na profilu Březinka byl zachycen pouze nejvyšší 1 m těchto vrstev, v mnohem větší mocnosti byly vrstvy vzorkovány na Kříbu (3 m; obr. 2b). *Bělohorské souvrství*

Na bázi bělohorského souvrství nastupují jílovité glaukoniticko-fosfatické pískovce litofacie F2, které mají mocnost do 0,5 m. Tato poloha s litofacií F2 odpovídá Zahálkovu (1918) pásmu IIIa, tzv. glaukoniticko-fosfatickému horizontu a v práci je dále označována jako bazální člen bělohorského souvrství. S ostrou bází na interval s facií F2 nasedají světle šedé spongilitické slínovce a vápnité prachovce (F3), které výše pozvolně přecházejí do jemnozrnných vápnitých a spongilitických pískovců a prachovců s glaukonitem (F4). Do nadloží pokračuje trend hrubnutí facií (obr. 4) s nástupem jemně až středně zrnitých vápnitých glaukonitických pískovců litofacie F5, v jejichž nadloží leží středně až hrubě zrnité vápnité glaukonitické pískovce (F6). V nadloží intervalu facie F6 dochází k zjemňování pískovců a nastupuje opět litofacie F5 a v nejvyšší části studovaného intervalu pak facie F4. Spodní intervaly s F3 a F4 odpovídají v tradičním stratigrafickém členění pásmu IIIb či "opukovému souvrství", od báze intervalu s facií F5 lze sled přiřadit k pásmu IV či "rohovcovému souvrství" (DvoŘák 1949). Dále jsou tyto intervaly v práci označované jako spodní a svrchní člen (obr. 4).

Geochemie

Grafy faktorových souřadnic proměnných z analýzy hlavních komponent datových souborů rozdělených podle litostratigrafických členů jsou zobrazeny na obrázku 5. Mediánové, minimální a maximální hodnoty studovaných prvků pro korycanské vrstvy a členy bělohorského souvrství jsou uvedeny v tabulce 1. Korycanské vrstvy mají z celého souboru dat průměrně nejvyšší obsahy Si, K a Fe a velmi nízké CaCO₃, Ti, Zr, Zn, Sr, Mn a Pb. Bazální člen bělohorského souvrství je charakteristický nejvyššími průměrnými obsahy Al, Ti, Zr, Zn, Mn a Pb. Spodní a svrchní členy bělohorského souvrství mají nejvyšší obsahy CaCO₃ a Sr a nejnižší koncentrace Al, Si, K, Fe a Zn. Vertikální změny v zastoupení vybraných prvků a jejich poměrů na profilu Březinka jsou znázorněné na obr. 4.



- Obr. 4. Chronostratigrafie, litostratigrafie, facie (F2-F6) a křivky vertikální distribuce vybraných prvků a jejich poměrů na profilu Březinka. Červená přerušovaná šipka u křivek Ti a Fe/Al značí nahoru hrubnoucí trend v bělohorském souvrství, patrný z prvkových proxy i litologie. Černé šipky značí hrubnutí (přerušovaná čára) a zjemňování (plná čára), patrné pouze z geochemie. Dva cykly odpovídají genetickým sekvencím TUR 1 a TUR 2 sensu ULIČNÝ et al. (2009). Zkratky: cen = cenoman, pks = peruckokorycanské souvrství, ks = korycanské vrstvy.
- Fig. 4. Chronostratigraphy, litostratigraphy, facies (F2-F6), and curves showing the vertical distribution of selected elements and their ratios in the Březinka section. The red dashed arrows highlight coarsening upward trend evident from the element proxies as well as from the lithology. The black arrows mark cyclic coarsening (arrow with dashed line) and finning uppward (full line), which are revealed by geochemistry only. The two cyles are correlated with the genetic sequences TUR 1 and TUR 2 sensu ULIČNÝ et al. (2009). Abbreviations: cen = Cenomanian, pks = Peruc-Korycany Formation, kv = Korycany Member.

- Tabulka 1. Mediánové (med), minimální (min) a maximální hodnoty (max) koncentrací prvků v korycanských vrstvách a bělohorském souvrství. Tučné číslice = nejvyšší mediánová hodnota; kurzíva = nejnižší mediánová hodnota; concentrace Zr* a Si* nejsou kalibrované korekčním faktorem.
- Table 1.
 Median (med), minimal (min), and maximal values (max) of element concentrations in the Korycany

 Member and Bilá Hora Formation. Numbers in bold = the highest median value; italics = the lowest

 median value. Zr* and Si* concentrations are not calibrated by correction factor.

		%						ppm					
		Al	Si*	CaCO ₃	Κ	Ti	Fe	Zr*	Zn	Sr	Mn	Pb	Cu
korycanské vstvy	med	4,54	29,18	0,44	2,15	0,09	3,96	65,55	17,11	25,13	52,49	5,10	4,10
	min	2,16	24,18	0,00	0,51	0,04	1,59	34,07	9,14	15,60	20,30	0,00	0,00
	max	5,48	34,85	2,46	2,59	0,11	8,56	138,09	28,23	51,97	353,83	9,63	7,45
bělohorské s. IIIa	med	5,15	26,32	3,06	1,55	0,16	3,24	149,98	24,19	80,21	223,25	7,29	6,53
	min	3,26	18,56	0,51	1,03	0,08	1,94	78,13	19,54	43,15	79,33	4,88	3,63
	max	6,85	27,03	23,27	1,93	0,22	5,05	211,69	45,94	157,31	337,32	10,93	11,82
bělohorské s. IIIb-IV	med	2,32	19,97	20,36	0,63	0,11	0,91	123,49	12,73	202,39	171,43	6,03	5,41
	min	0,26	4,23	0,00	0,00	0,01	0,34	16,70	1,99	19,23	71,45	0,00	0,00
	max	5,36	36,87	52,79	2,00	0,20	1,91	345,50	28,11	397,56	466,13	22,56	9,74



- Obr. 5. Grafy faktorových souřadnic proměnných z analýzy hlavních komponent datových souborů rozdělených podle litostratigrafických členů. Skupiny prvků: 1 = biogenní karbonátové fáze; 2 = detritická fáze; 3 = autigenní fáze; 4 = smíšený zdroj.
- Fig. 5. Plots of factor coordinates of variables from the principal component analysis evaluated for each litostratigraphic member separately. Groups of elements: 1 = carbonate phases; 2 = detrital phases; 3 = authigenic phases; 4 = mixed source.

Zřejmá je faciální závislost koncentrací a poměrů některých prvků. Velmi dobře lze rozlišit typické koncentrace Ti a Al v rámci litofacií F3 až F6 bělohorského souvrství, kdy s hrubnozrnnějšími faciemi klesají hodnoty Ti a Al (obr. 4 a 6). Průměrné hodnoty a rozptyl Ca ve faciích F3 až F6 nemají systematicky rostoucí nebo klesající trend, zatímco koncentrace K a Fe se mezi těmito faciemi významně neliší (obr. 6). K a Fe jsou však vyšší na bázi souvrství (F2) a nejvyšší jsou v korycanských vrstvách (F1), kde jsou nejnižší obsahy Ca. Poměr Zr/Al průměrně stoupá od F1 do F5, výrazně klesá v F6. (obr. 6). Ti/Al neukazuje tak jasný vztah k zrnitosti a nejvyšší hodnoty jsou ve facii F4 (obr. 6). Mediány a minimální hodnoty Si/Al rostou v celém bělohorském souvrství od F2 do F6, s variabilnějšími vyššími a odlehlými hodnotami (obr. 6).



Obr. 6. Krabicové grafy zobrazující medián a rozptyl hodnot pro vybrané prvky pro každou studovanou facii. Legenda: 1 = medián; 2 = 1. a 3. kvartil; 3 = rozsah neodlehlých hodnot; 4 = odlehlé hodnoty; 5 = extrémy.

Fig. 6. Boxplots showing median and vales dispersion of selected elements for each facies. Key: 1 - median; 2 - 1. a 3. quartile; 3 - range of non-outlier values; 4 - outliers; 5 - extremes.

Poměry mezi prvky detritických fází vynesené ve dvojosých diagramech pro každou z šesti vyčleněných facií ukazují tři skupiny charakterizované trendy lineární regrese (obr. 7). Tyto skupiny odpovídají vzorkům z korycanských vrstev, bazálního členu bělohorského souvrství a třetí skupinu tvoří vzorky ze spodního a svrchního členu (výjimkou je facie F6, viz níže). Trend poměrů detritických prvků korvcanských vrstev je charakterizován nízkou pozitivní korelací Al s Fe a Ti (R2 = 0.3) a statisticky nevýznamnou korelací se Zr (obr. 7b, d, e). Tyto body spadaií do pole s vyššími poměry Fe/Al a nízkými Ti/Al a Zr/Al (obr. 7g, f). Druhý trend sledují vzorky z báze bělohorského souvrství s nejvyšší korelací Al s Zr a Ti ($R^2 = 0.9$), střední negativní korelací Fe a Al ($R^2 = 0.4$) a bez statisticky významné korelace Al a K (obr. 7b-e). Vzorky tohoto trendu spadají do pole nízkých poměrů Zr/Al a Ti/Al a vysokých Fe/Al společně s trendem korvcanských vrstev (obr. 7f, g). Posledním je trend zachycený v rámci spodního a svrchního členu bělohorského souvrství, který sleduje největší množství vzorků. Vyznačuje se vyššími pozitivními korelacemi Al s Fe, K a Ti ($R^2 = 0.6-0.8$; obr. 7b-e) a výrazně vyššími poměry Zr/Al, Ti/Al a nižšími Fe/Al oproti předchozím trendům (obr. 7f, g). Tento trend plně sledují vzorky z facií F3, F4 a F5. Vzorky náležející facii F6 jsou v diskriminačních diagramech Fe/Al, Ti/Al a Zr/Al součástí shluku korycanských vrstev a bazálního členu (obr. 7f, g). Stejně tak vektor lineární regrese Ti a Al facie F6 odpovídá vektoru z korycanských vrstev (obr. 7d) a vektor Zr/Al je odlišný od zbytku členu a je paralelní s trendem bazálního členu bělohorského souvrství (u Zr/Al částečně také u F3; obr. 5e). V poměru Al a K spodní a svrchní člen bělohorského souvrství trend splývá s trendem typickým pro korycanské vrstvy, se kterým sdílí vysokou korelaci mezi prvky ($R^2 = 0.8$) a totožný vektor lineární regrese (obr. 7c).

DISKUZE

Analýza hlavních komponent pomohla rozlišit skupiny prvků, které mají společný geochemický původ, vztažený k různým skupinám minerálních fází (CRAIGIE 2018). Vztahy v rámci souboru dat byly analyzovány zvlášť pro korycanské vrstvy (F1), bazální (F2), spodní a svrchní člen bělohorského souvrství (F3 – F6; obr. 5). Osy hlavních komponent PC 1 a PC 2 v grafech faktorových souřadnic proměnných dohromady popisují 65,2% va-

riability v korycanských vrstvách, 80,83 % variací v bazálním členu a 67,55 % ve spodním a svrchním členu (obr. 5). V korycanských vrstvách (obr. 5a) mají společný vektor a vysoké negativní skóre na PC 1 prvky karbonátových minerálů Ca a Sr (CROUDACE a ROTHWELL 2015). S nimi negativně koreluje skupina prvků s vysokým pozitivním skóre na PC 1, Al a K, které jsou v sedimentech nesené především jílovými minerály a živci, a Ti, který bývá nesený těžkými minerály (rutil, anatas, ilmenit) anebo illitem (RATCLIFFE *et al.* 2004). Negativní korelace mezi siliciklastickými a karbonátovými prvky dokládá variabilitu na PC 1 řízenou vzájemným ředěním těchto dvou složek. Další skupinu tvoří Fe, Mn a Zn, s vysokým skóre na PC 2. Mineralogické složení studovaných hornin napovídá, že se jedná především o prvkovou asociaci autigenních fází, jako jsou sulfidy, oxyhydroxidy (BALSAM *et al.* 1995) a glaukonit. Vyšší negativní skóre na PC 2 má Si, který je zastoupený jak detri-



- Obr. 7. Dvojosé diagramy zobrazující vztahy mezi dvěma vybranými prvky nebo jejich poměry pro studovaný soubor dat. Každá facie je vyznačena symbolem (legenda na obrázku). Šedá pole značí trend spodní a svrchní části bělohorského souvrství. Facie F1 a F2 mají odlišné trendy ve většině poměrů, uniformní chování neprojevuje facie F6.
- Fig. 7. Biplots showing relationships between selected elements or their ratios from the studied dataset. Each of facies is marked by symbol (key in the figure). Grey fields represent trend of the lower and upper members of the Bílá Hora Formation. Facies F1 and F2 show different trends in majority of ratios, also facies F6 revealed non-uniform behaviour.

tickým křemenem v hrubozrnné frakci, tak v silicifikovaných částech horniny. V bělohorském souvrství byly taktéž rozlišeny zmíněné skupiny prvků karbonátů, jílů, těžkých minerálů a autigenních fází (obr. 5b,c). Ca a Sr mají na bázi bělohorského souvrství negativní korelaci na PC 1 s Si a K, které jsou vázané na pozorované detritické křemeny a živce. Ve vyšší části souvrství jsou prvky karbonátové skupiny v negativní korelaci s Si na PC2, ukazující nižší vliv ředění na celkovou variabilitu složení. Odlehlost Si od skupiny prvků detritických fází ve vyšší části bělohorského souvrství odráží smíšený zdroj v detritickém křemeni, spikulách porifer a sekundární silicifikaci. Těsnější korelace vektorů prvků detritických fází (Al, Zr, Ti) na bázi bělohorského souvrství (obr. 5b) naznačují jejich stejný zdroj. Ve vyšší části souvrství má tato skupina větší rozptyl a dělí se na část s Al, Ti, Pb s negativním skóre na PC 2 a K, Zr a Fe se skóre pozitivním (obr. 5c).

Základní statistická analýza a analýza hlavních komponent odhalily ve studovaném souboru dat rozdíly v nosičích sledovaných prvků mezi přítomnými faciemi nebo členy (obr. 5). Proto je třeba vertikální distribuci poměrů prvků (obr. 4) vyhodnocovat s přihlédnutím k těmto rozdílům. Poměr Fe/Al roste výrazně v nejvyšší části korycanských vrstev (F1) a v bazálním členu bělohorského souvrství (F2) paralelně s přibýváním glaukonitu (obr. 3, 4 a 6). V bělohorském souvrství je růst Fe/Al vázán taktéž na rostoucí podíl glaukonitu, společně s hrubnutím detritické frakce (obr. 3, 4 a 6) od F3 až do F6 (obr. 4). Fluktuace Fe/Al tak odrážejí především změny v podílu glaukonitu.

Hrubnutí facií směrem do nadloží v bělohorském souvrství dobře sleduje pokles Al a Ti od F3 do F6 (obr. 4 a 6). Nejvyšší část profilu zachycuje zjemňování do nadloží z F6 do F5 a výše F4, který je doprovázený růstem Al a Ti (obr. 4). Rostoucí vertikální trend má Zr/Al od F3 do F5, a lze ho zde považovat za dobré proxy zrnitosti, tak jak je konvenčně využíváno (např. CRAIGIE 2018). Výrazný je však strmý pokles hodnot Zr/Al v nejhrubozrnnější facii F6 (obr. 4 a 6). Tato facie vykazuje odlišnost od trendu poměrů Zr, Ti a Al ostatních facií spodního a svrchního členu bělohorského souvrství (obr. 6, 7d-g) a má blíže k trendu korycanských vrstev. S nimi má také společnou přítomnost živců v klastickém materiálu. Nízký poměr Zr/Al a Ti/Al a odlišný trend lineární regrese odráží pravděpodobně rozdíly v asociaci těžkých minerálů těchto hrubozrnných facií. Ten by mohl být způsobený tříděním (nejvyšší koncentrace zirkonu v hrubozrnné siltové a jemnozrnné písčité frakci; Jones et al. 2012) nebo změnou provenience detritického materiálu. Těžké minerály studoval v křídových sedimentech v jižním okolí zájmového území SKOČEK (1958), který se ovšem zaměřil pouze na perucko-korycanské souvrství. Zjištěna tam byla zejména přítomnost turmalínu, rutilu, zirkonu, staurolitu, andaluzitu, kyanitu a opakních minerálů. Méně častý byl např. anatas. Konstatován byl zdroj těchto minerálů z nespecifikované krystalinické jednotky Českého masivu (vyloučen však byl brněnský masiv), v sedimentárním pokryvu brunovistulika (devon, kulm) a v permských, případně také jurských sedimentech. BURIÁNEK et al. (2009) se zabývali těžkými minerály z korycanských vrstev a spodního i svrchního členu bělohorského souvrství v okolí Poličky (30 km od lokalit studovaných v předložené práci). Korycanské vrstvy zde obsahují amfibolit, pyroxen, ilmenit, granát, zirkon, silimanit, kyanit a staurolit. Ze spodního členu bělohorského souvrství byla získána podobná asociace, ovšem bez silimanitu a ve svrchním členu nebyl zjištěn silimanit ani kyanit. Tyto asociace ukázaly stabilní zdroj detritu korycanských vrstev i bělohorského souvrství v místním podloží poličského a svrateckého krystalinika. Na základě tohoto zjištění lze předpokládat, že rozdílné poměry Zr/Al a Ti/Al mezi facií F6 a dalšími faciemi bělohorského souvrství na lokalitě Březinka jsou spíše dílem třídících procesů. Tento závěr by však bylo v budoucnu potřeba ověřit studiem těžkých minerálů.

Koncentrace Ti mají ve spodním a svrchním členu bělohorského souvrství výraznou faciální závislost, nejvyšší ze všech sledovaných prvků a poměrů (obr. 4 a 6). Nejčastějším nosičem Ti jsou těžké minerály rutil, anatas anebo ilmenit. Z tohoto důvodu je Ti (resp. poměr Ti/Al) využíván v jemnozrnných sedimentech jako proxy přítomnosti hrubozrnnější frakce, která těžké minerály nese (RATCLIFFE *et al.* 2004). Všechny zmíněné Ti-minerá-

ly byly doložené z okolních výskytů křídových hornin (SKOČEK 1958, BURIÁNEK *et al.* 2009) stratigraficky ekvivalentních studovaným sledům. Obsah Ti však ve spodním a svrchním členu bělohorského souvrství systematicky klesá s rostoucí zrnitostí (obr. 4 a 6), zatímco u Ti/Al nelze pozorovat jasný trend spojený se změnami zrnitosti (obr. 4). Pokles nenormalizovaného obsahu Ti lze vysvětlit koncentrováním těžkých Ti-minerálů v prachovité a jemnozrnné písčité frakci, která je hůře vytříděná, a odplavením těchto minerálů z hrubozrnnějších uloženin, usazených v prostředí s vyšší energií, podobně jako u zirkonu (JONES *et al.* 2012; NÁDASKAY *et al.* 2019). Dále by mohl být zdrojem Ti illit (RETCLIFF *et al.* 2004), jehož přítomnost ve studovaných sedimentech nemůže být vyloučena, vzhledem k jeho výskytu v korycanských vrstvách od Poličky (BURIÁNEK *et al.* 2009), případně z bělohorského souvrství vzdálenějších částí české křídové pánve (např. VALEČKA 1988). Tuto intepretaci je však nutno ověřit metodou práškové difrakce, která nebyla v naší studii zahrnuta.

Růst zrnitosti směrem do nadloží, který pokles koncentrací Ti dokumentuje, má charakter dvou pravidelných cyklů (obr. 4). Tyto cykly mohou odpovídat genetickým sekvencím TUR 1 a TUR 2 (ULIČNÝ *et al.* 2009). Sekvence TUR 1 je záznamem regrese v raném turonu, následované raně turonskou transgresí. Regresi a transgresi odpovídá první cyklus se systematickým poklesem a nárůstem obsahu Ti (obr. 4). Sekvence TUR 2 byla uložena při regresně-transgresním cyklu mladšího raného turonu až staršího střední turonu (ULIČNÝ *et al.* 2009) a korelován s ní je druhý cyklus Ti (obr. 4). Zmíněné cykly však nesleduje křivka Zr/Al a až do úrovně facie F6 systematicky stoupá.

Významné množství detritického křemene (a dalších silikátů), spongií křemitých hub a silificikace upozorňují na smíšený původ Si, dobře ilustrovaný analýzou hlavních komponent (obr. 5). Vzorky s nejvyššími poměry Si/Al jsou rohovce nebo silně silicifikované polohy, které mají malé množství detritického křemene (obr. 3e). Jejich prekurzorem tak byly pravděpodobně písčité spongilitické vápence (zatlačování karbonátů křemičitany; ČÁP 2006). Poměr Si/Al v rámci bělohorského souvrství systematicky roste a v nejvyšší části se chová odlišně od ostatních poměrů (obr. 4). Nedochází ke skokovému poklesu hodnot ve facii F6 (jako u Zr/Al a Ti/Al), ale Si/Al také neklesá se zjemňováním facií (jako Al či Ti) v nejvyšší části profilu v intervalech F5 a F4 (obr. 4). Je to dáno právě smíšeným původem Si, jehož dva hlavní zdroje směrem do nadloží přibývají. S hrubnutím mezi faciemi F3 a F6 přibývá křemenných zrn na úkor jílovito-karbonátové základní hmoty a od báze intervalu s facií F5 přibývá rohovců a silicifikovaných poloh, bez ohledu na facie (spodní F4 bez hojných rohovců, svrchní F4 s hojnými rohovci) (obr. 4).

ZÁVĚR

Studium prvkové geochemie na třech profilech svrchní křídy v okolí Letovic bylo zaměřeno na prvky vázané především v detritických fázích studovaných hornin. Na základě analýzy hlavních komponent a mikropetrografického studia byly interpretovány hostitelské fáze (resp. skupiny fází) sledovaných prvků. V korycanských vrstvách (cenoman) je Ca a Sr součástí biogenních karbonátových fází, Al, K a Ti jsou nesené v detritickém materiálu, Si má smíšený detriticko-diagenetický zdroj a Fe, Mn a Zn jsou vázány na autigenní fáze (oxyhydroxidy, sulfidy, glaukonit). Podobné vztahy byly interpretované pro bělohorské souvrství (turon), kde je v jeho bazálním členu skupina detritických prvků rozšířena o Pb a Cu, a ve spodním a svrchním členu bělohorského souvrství se k detritické skupině přidává také Fe. Změny poměru Fe/Al odrážejí množství glaukonitu a poměr Si/Al je významně ovlivněn silicifikací. Růst hodnot poměru Zr/Al v bělohorském souvrství je spojený s hrubnutím zrnitosti, ale v nejhrubozrnnější facii (F6) jsou hodnoty nejnižší, což je interpretováno odplavením zirkonu z této nejhrubší frakce. Stejně je interpretován vztah mezi Ti a zrnitostí studovaných facií. Koncentrace Ti v bělohorském souvrství jsou ze všech prvků a jejich poměrů nejvíce závislé na zrnitosti a s hrubnutím jejich hodnoty systematicky klesají (největší koncentrace v prachovité a jemnozrnné písčité frakci, odplaveny z hrubozrnnějších sedimentů). Na lokalitě Březinka, kde je odkryt nejmocnější sled křídových vrstev ze všech studovaných lokalit, křivka Ti dokumentuje hrubnutí sedimentu směrem do nadloží ve formě dvou cyklů. Tyto cykly jsou předběžně korelovány s genetickými transgresně-regresními cykly české křídové pánve TUR 1 a TUR 2.

PODĚKOVÁNÍ

Manuskript vznikl na základě výsledků diplomové práce prvního autora. Autoři děkují recenzentům (Ondřej Bábek, Univerzita Palackého, Olomouc; Roland Nádaskay, Česká geologická služba, Praha) za kritické připomínky, které vedly ke zkvalitnění předloženého manuskriptu.

LITERATURA

- BALSAM, W. L., OTTO BLIESNER, B. L., DEATON, B. C., 1995: Modern and last glacial maximum eolian sedimentation patterns in the Atlantic ocean interpreted from sediment iron oxide content. - Paleoceanography, 10, 493-507.
- BURIÁNEK, D., ČECH, S., ABRAHÁM, M., 2009: Chemické složení těžkých minerálů jako indikátor zdrojových oblastí pro křídové sedimenty na jižním okraji vysokomýtské synklinály (jv. okraj české křídové pánve). – Acta Musei Moraviae, Sci. Geol., 94, 83–96.
- CRAIGIE, N., 2018: Principles of elemental chemostratigraphy: A practical users guide. -Springer, Cham, 196 p.
- CROUDACE, I. W., ROTHWELL, R. G., 2015: Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of non-destructive tool for the environmental sciences. – Springer, Dordrecht, 421 p.
- ČAP, P., 2006: Mikroskopické studium silicifikovaných hornin a spongolitů české křídové pánve. Zprávy o geologických výzkumech, 39, 107-108.
- ČECH, S., 2011: Palaeogeography and stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic) an overview. Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 18, 18-21.
- ČECH, S., KLEIN, V., KŘÍŽ, J., VALEČKA, J., 1980: Revision of the Upper Cretaceous stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin. - Věstník Ústředního ústavu geologického 55, 277-296.
- DVORAK, J., 1949: Hranice spodního a středního turonu v oblasti orlickožďárské. Práce Moravskoslezské akademie věd přírodních, 21, 7, 1-31.
- HERČÍK, F., HERMANN, Z., VALEČKA, J., 1999: Hydrogeologie české křídové pánve. Český geologický ústav, Praha.
- CHÁB, J., STRÁNÍK, Z., ELIÁŠ, M., 2007: Geologická mapa České republiky. 1 : 500 000. Česká geologická služba. Praha.
- JONES, A. F., MACKLIN, M. G., BREWER, P. A., 2012: A geochemical record of flooding on the upper River Severn, UK, during the last 3750 years. - Geomorphology, 179, 89-105.
- MÜLLER, V., 1959: Cenomanské jílovce předběžná dílčí zpráva o základním geologickém výzkumu křídového útvaru v území mezi Březinkou a Skříbem a mezi Roubaninou, Chlumem, a Babolkami na východním břehu řeky Svitavy (list spec. Mapy Jevíčko 4157). – MS ČGS-Geofond.
- NÁDASKAY, R., KOCHERGINA, Y.V., ČECH, S., ŠVÁBENICKÁ, L., VALEČKA, J., ERBAN, V., HALODOVÁ, P., ČEJKOVÁ, B. 2019: Integrated stratigraphy of an offshore succession influenced by intense siliciclastic supply: Implications for Coniacian tectono-sedimentary evolution of the West Sudetic area (NW Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic). - Cretaceous Research, 102, 127-159.
- RATCLIFFE, K. T., WRIGHT, A. M., HALLSWORTH, C., MORTON, A., ZAITLIN, B. A., POTOCKI, D., WRAY, D. S., 2004: An example of alternative correlation techniques in a low-accommodation setting, nonmarine hydrocarbon system: The (Lower Cretaceous) Mannville Basal Quartz succession of southern Alberta. - AAPG Bulletin, 88, 1419-1432.
- SAGEMAN, B. B., LYONS, T. W., 2003: Geochemistry of fine-grained sediments and sedimentary rocks. Treatise on Geochemistry, 7, 115-158. Elsevier.
- SKOČEK, V., 1958: Petrografie a těžké minerály křídových sedimentů z okolí Skalice nad Svitavou. Sbor. Ústř. Úst. Geol. 25, 377-405.
- ULIČNÝ, D., LAURIN, J., ČECH, S., 2009: Controls on clastic sequence geometries in a shallowmarine, transtensional basin: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. - Sedimentology, 56, 1077-1114.

VACHTL, J., MALECHA, A., PELOUŠEK, J., PELIKÁN, V., FRANČE, J., RYŠAVÝ, P., 1968: Ložiska cenomanských jílovců v Čechách a na Moravě, díl IV. - Geotechnica 32, 1-162.

VAJDÍK, J., VYBÍRAL, J., 1973: Průzkum ložisek žáruvzdorných jílovců v areálu západomoravské a východočeské křídy - Sborník GPO, 2, 27-50.

VALEČKA, J., 1988: Sedimentologie svrchní křídy v králickém příkopu. - Sbor. geol. Věd. Geol., 43, 147-191.