

Sborník Jihočeského muzea v Českých Budějovicích

Přírodní vědy

Acta Musei Bohemiae Meridionalis in České Budějovice - Scientiae naturales

Sbor. Jihočes. Muz. v Čes. Budějovicích, Přír. vědy	51	5–20	2011
---	----	------	------

Některé vztahy mezi chemickým zvětráváním melechovského granitu a látkovou bilancí malého povodí Loukov

Some relationships between the chemical weathering of Melechov granite and the mass balance of the small catchment Loukov

Václav PROCHÁZKA¹, Miroslav ŽÁČEK², Daniela FOTTOVÁ³,
Dobroslav MATĚJKA⁴ & Markéta ŠTĚPÁNOVÁ³

¹Kladno, V Bažantnici 2636, ²GEOMIN družstvo,
³Česká geologická služba, ⁴ÚGMNZ Přírodovědecká fakulta UK

Abstract. Chemical weathering of the Melechov granite was evaluated on the basis of a) differences in the composition of fresh and weathered rocks, which are results of processes lasting for 10 000 years at least, b) mass balance of a small catchment (covered by spruce production forest) which is much more sensitive to short-term effects. Relatively low discharge of SiO₂ and U, which are significantly depleted in the weathered rocks, indicates that removal of these elements in solution must have been much more intensive in the time of soil formation (perhaps at the beginning of Holocene). In contrast, the discharge of Ca and Mg is relatively high, but their statistically significant depletion in the eluvia is not observed. Possible explanation is that calcite in crack fillings significantly contributes to the discharge of Ca, and there is a large Mg pool in the litter which is now being depleted. Al₂O₃ and Au were concentrated passively (by removal of other components) in the eluvia. Most elements which are accumulated in the catchment (Zn, Cu, Ni, Cd and probably more, which however were monitored only short time) are retained in the tree canopies already, and their retention in the catchment is probably caused by growing volume of the biomass, which is actually not compensated by any other element flux in the ecosystem. Retention of some more elements (K, As, Pb and probably Mn) can be explained by accumulation in the biomass via soil. The total throughfall flux of Na in 15 years (31.3 kg/ha) is not higher than Na flux in bulk precipitation (31.9 kg/ha), which implies that sodium absorption in tree canopies cannot be neglected at least in regions with low Na deposition, like the Czech inland.

Keywords: Melechov granite, boreholes, chemical weathering, atmospheric deposition, small catchment Loukov.

Abstrakt. Chemické zvětrávání melechovského granitu bylo hodnoceno na základě rozdílů ve složení čerstvých a zvětralých hornin, což je výsledek procesů trvajících nejméně od začátku holocénu, a na základě látkové bilance malého povodí, která mnohem citlivěji odráží krátkodobé jevy. Poměrně malý odtok Si a U, které jsou ve zvětralinách oproti čerstvé hornině prokazatelně ochuzeny, naznačuje, že v době vzniku půdního profilu musel odnos těchto prvků v rozpustné formě probíhat mnohem rychleji. Naopak nebylo zjištěno statisticky významné ochuzení zvětralin o Ca a Mg, jejichž odtok je vysoký. Možným vysvětlením je, že k odtoku Ca významně přispívá kalcit v puklinových výplních (až do poměrně velké hloubky) a zvýšený odtok Mg je umožněn dočasným snižováním zásoby Mg v lesním opadu. Pasivně, tedy odnosem dalších složek, jsou ve zvětralinách koncentrovány Al a Au.

Většina prvků, které jsou v povodí pohlcovány (Zn, Cu, Ni, Cd a pravděpodobně i další, které však byly sledovány jen krátce), je zachycována již v korunách stromů; jejich akumulace v povodí je tedy zřejmě umožněna rostoucím objemem biomasy, který v současnosti není kompenzován jinými toky látek v lesním ekosystému. Pohlcování některých dalších látek v povodí (z prvků stanovených v horninách K, As a Pb, pravděpodobně i Mn) může vysvětlit rovněž akumulace v biomase, ale prostřednictvím půdy.

Klíčová slova: melechovský granit, vrtné jádro, chemické zvětrávání, atmosférická depozice, malé povodí Loukov.

Úvod

Melechovský masív, který představuje nejsevernější část moldanubického plutonu (batolitu), resp. jeho centrálního masívu, patří již přes 15 let k nejintenzivněji zkoumaným granitovým tělesům v rámci ČR. Na základě srovnání nevětrálých a zvětralých vzorků byly již dříve vyhodnoceny některé změny ve složení granitů melechovského masívu, k nimž při zvětrávání dochází (PROCHÁZKA et al. 2009). I když bylo dokumentováno mnoho systematických chemických změn (ochuzení o Si a U, oxidace železa, obohacení o Al, vzrůst ztráty žíháním), většina z nich je jednoznačná pouze v homogennějším a méně kyselém lipnickém granitu (úbytek Ca, Na, P, Sr, Ba, snížení poměrů Ca/Sr, Sr/Ba, K/Rb, K/Cs; PROCHÁZKA et al. 2009, PROCHÁZKA et al. nepublikovaná data; viz též analýzy BREITERA & PROCHÁZKY 2004 a BREITERA 2006).

Již od roku 1994 je monitorována látková bilance malého povodí Loukov, jehož geologický podklad tvoří melechovský granit (FOTTOVÁ 2000). Téměř celá plocha povodí je pokryta smrkovým lesem, vysazeným přibližně na přelomu 19. a 20. století, v němž je však v současnosti zcela minimální těžba dřeva i další lidské zásahy (zčásti i kvůli špatně dostupnému terénu). Také v historické mapě (1836–1852) je povodí (nebo jeho naprosto převažující část) zalesněno (ANONYMUS 2011).

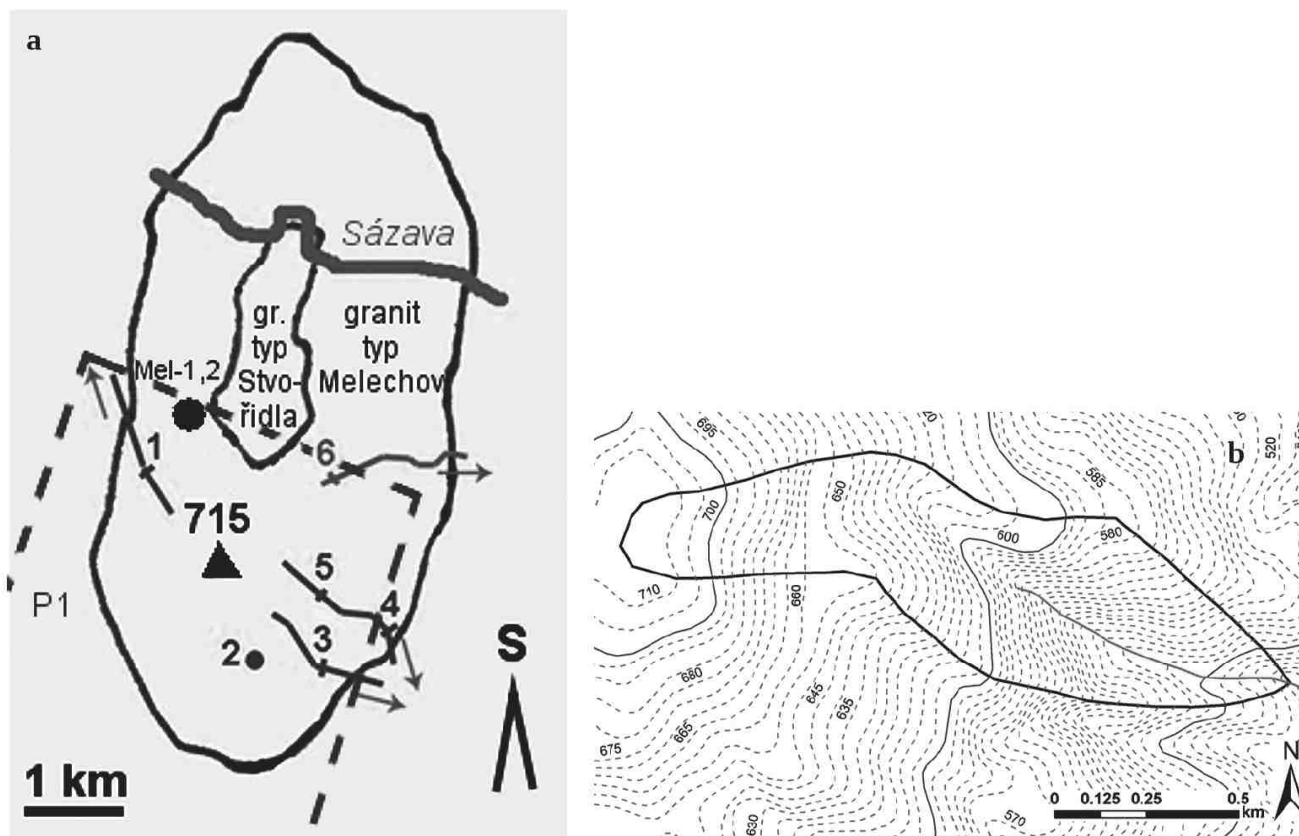
Melechovský granit je poměrně hrubozrnný a jeho hlavními součástmi jsou křemen, albit, K-živce (převážně mikroklin), muskovit a biotit (biotitu je méně než muskovitu), mezi akcesoriemi výrazně dominuje fluorapatit. Podrobná charakteristika horniny je hlavně v archivovaných zprávách, z nichž je zde citován jen zlomek; novější publikace se zabývají hlavně akcesorickými minerály (HARLOV et al. 2008; PROCHÁZKA et al. 2010). Zpracování velkého množství dalších geochemických dat z melechovského masívu (BREITER 2006; ŽÁČEK & PÁŠA 2006), stejně jako dat z povodí Loukov je teprve v počátcích. Srovnání záznamu o transportu látek podle pevných vzorků a podle bilance povodí se přímo nabízí, i když jde v ČR zatím o poměrně ojedinělý pokus.

Data a jejich vyhodnocení

Horniny

Stejně jako v článku PROCHÁZKY et al. (2009) je použito srovnání čerstvých granitů z vrtů MEL-1 a MEL-2 dosahujících až hloubky 200 m (BREITER 2006) a vzorků zvětralinového pláště, odebraných půdním vrtákem z největší dosažitelné hloubky, většinou blízké 1,5 m (ŽÁČEK & PÁŠA 2006). Vzorky z vrtů byly analyzovány v laboratořích ČGS a část stopových prvků (hlavně litofilních) v laboratořích AcmeLabs v Kanadě. Ve vzorcích zvětralin byly všechny analýzy provedeny v laboratořích AcmeLabs.

Tentokrát jsme do souboru pro statistické zpracování analýz nevětrálých vzorků z vrtů zahrnuli i alterované, protože na zvětralých často předchází alterace nebyla makroskopicky rozeznatelná. Nově jsme se zaměřili hlavně na rozdíly vztahů mezi prvky v nevětrálých a zvětralých horninách.



Obr. 1 – (a) Mapa znázorňující obrysy melechovského granitu, umístění vrtů Mel-1 a Mel-2 (leží velmi blízko sebe) a polygonu P1, v němž byly vzorkovány zvětralé horniny, a lokality odběru vzorků vody z potoků (v bodě č. 4 je pravidelně vzorkován odtok z malého povodí Loukov). (b) Ohraničení povodí Loukov v podrobné výškopisné mapě.

Fig. 1 – (a) Map showing contours of the Melechov granite, location of the boreholes Mel-1 and Mel-2 (they are very close each other), the polygon P1 in which eluvia were sampled, and locations of water samples collected from brooks (spot No. 4 corresponds to the sampling location of the Loukov catchment). (b) Delimitation of the catchment Loukov in a detailed hypsometric map.

Bilance malého povodí

Malé povodí Loukov je součástí sítě GEOMON a jeho monitorování zahrnuje měření množství vody a rozpuštěných látek ve srážkách, podkorunových srážkách a v odtoku. Součin objemu vody a koncentrace látek na volné ploše představuje gravitační depozici (dešťové + sněhové srážky a spad hrubého aerosolu). Analogicky je vyčíslen podkorunový tok měřením pod korunami stromů (někdy se jako „podkorunový tok“ označuje rozdíl toku látek pod korunami a na volné ploše, ale v tomto článku s ním příliš neoperujeme a proto používáme jednodušší terminologii) a odtok z povodí. Podkorunový tok je oproti gravitační depozici obohacen o velkou část intercepční depozice (mlha, jemný aerosol, plyny) a je ovlivněn rovněž látkovou výměnou s biomasou stromů.

Metody vzorkování a analýz jsou spolu s kompletními daty ve zprávách projektu GEOMON (např. FOTTOVÁ et al. 2006). Vzorky vody pro analýzu jsou odebírány od listopadu 1994 jednou měsíčně a analyzovány v laboratořích ČGS v Praze na Barrandově. Plamenovou atomovou absorpční spektrometrií (FAAS) byly stanoveny Na, Mg, Ca, K, Mn, Fe, Al, Zn a SiO₂. Metodou ETAAS (absorpční spektrometrie s elektrotermickou atomizací) byly stanoveny Cu, Pb, As, Cd, Be, Cr, Co, Ni a Mo, v případě koncentrací pod mezí detekce FAAS rovněž Al. Fluor byl stanoven potenciometricky iontově selektivní elektrodou, Cl, NO₃⁻ a SO₄²⁻ kapalinovou chromatografií (HPLC) a NH₄⁺ spektrofotometricky.

Tab. 1 – Statistika složení melechovského granitu ve vrtech (včetně alterovaných, ale ne navětrávaných vzorků; podle Breitera 2006) a na bázi půdního profilu v polygonu P1 (rozděleno na vzorky relativně chudší a bohatší Al_2O_3 ; data ŽÁČEK & PÁŠA 2006). SiO_2 až ztráta žíháním v hmot. %, Be až U v ppm, Au v ppb.

Tab. 1 – Statistics of the composition of the Melechov granite in boreholes (including altered, but not weathered samples; data of Breiter 2006; major components determined in laboratories of ČGS, trace elements in ACME) and on the basis of soil cap in the P1 polygon (divided into samples relatively poor and rich in Al_2O_3 ; data of ŽÁČEK & PÁŠA 2006; all analyses in ACME). SiO_2 to ignition loss in wt. %, Be-U in ppm, Au in ppb.

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 t.	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	C tot.	z.žih.	Be	Sr	Ba	U	Au	
vřty	Ø	72,98	0,14	14,66	1,26	0,045	0,25	0,74	3,51	4,54	0,41	1,20	3,8	92,9	168	13,5		
	σ	0,71	0,01	0,43	0,19	0,011	0,08	0,14	0,52	0,26	0,02	0,43	1,0	10,7	17	3,4		
	medián	73,06	0,14	14,65	1,23	0,043	0,25	0,72	3,59	4,51	0,41	1,10	3,5	95,1	165	13,4		
n = 44	min.	71,19	0,11	12,67	0,69	0,030	0,13	0,60	0,14	3,96	0,34	0,79	2	41,8	130	7,1		
	max.	74,83	0,16	15,78	1,71	0,107	0,77	1,57	3,80	5,46	0,47	3,66	6	113,9	204	22,9		
	Ø	70,33	0,10	16,53	1,05	0,03	0,21	0,69	3,98	4,69	0,47	0,09	1,89	4,3	97,8	177	5,0	197
zvětraliny - méně Al	σ	1,29	0,03	0,66	0,27	0,01	0,05	0,14	0,37	0,20	0,09	0,05	0,67	1,9	11,1	26	1,1	193
	medián	70,42	0,09	16,49	0,98	0,03	0,20	0,72	4,07	4,67	0,47	0,08	1,70	4,0	99,7	181	4,8	97
	min.	67,59	0,07	15,06	0,79	0,02	0,15	0,33	2,90	4,20	0,24	0,04	1,30	0,5	76,3	125	3,3	27
n = 26	max.	73,20	0,22	17,60	2,20	0,04	0,42	0,92	4,58	5,16	0,62	0,26	3,90	8	120,2	230	7,9	727
	Ø	65,17	0,10	21,53	1,08	0,03	0,21	0,66	3,95	4,63	0,46	0,11	2,06	4,1	94,1	173	5,4	424
	σ	1,34	0,04	0,90	0,27	0,01	0,05	0,13	0,33	0,28	0,08	0,07	0,82	2,8	14,2	32	1,5	570
zvětraliny - více Al	medián	65,49	0,10	21,37	1,08	0,03	0,21	0,71	3,99	4,58	0,49	0,09	1,90	3,5	94,8	169	5,0	170
	min.	60,80	0,07	19,84	0,77	0,02	0,14	0,27	2,88	4,00	0,20	0,04	1,30	0,5	59,5	114	3,6	33
	max.	66,97	0,27	23,63	2,33	0,05	0,41	0,87	4,51	5,12	0,60	0,37	5,40	12	124,8	272	9,0	2470

Tab. 2 – Modelové hodnoty vybraných oxidů a ztráty žiháním v primárních a některých možných sekundárních minerálech, použité pro grafy na obr. 2 v barevné příloze č. 1 (hmot. %).

Tab. 2 – Model values of selected oxides and ignition loss in primary and selected possible secondary minerals, used for the plots in Fig. 2 in color appendix No. 1 (wt. %).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	ztr. žih.
křemen	99,5	0,05	0,01	0,1
K-živec	64,5	18,4	16,5	0
plagioklas	67,16	20,45	0	0
muskovit	45,25	38,0	10,5	4,5
illit	45,95	39,0	8,4	6,7
kaolinit	46,55	39,5	0	14,0
AlOOH	0	85,0	0	15,0

V malém povodí by v ideálním případě (uzavřený látkový koloběh biomasa-půda) odtok prvků, o které byla hornina při zvětrávání ochuzena, měl převyšovat jejich atmosférickou depozici. Prvky v povodí pohlcované mohou být absorbovány již v korunách stromů; přitom by měla buď stoupat jejich koncentrace v biomase nebo (což je v hospodářském lese pravděpodobnější) jejich koncentrace nemusí stoupat díky nárůstu objemu biomasy (což může po kračovat i po těžbě dřeva), případně mohou být po opadu jehličí koncentrovány v půdě. Stejně tak mohou být v půdě sorbovány prvky, které do ní vstupují přímo ze srážek bez interakce s biomasou. Bilance povodí může být ovlivněna též antropogenní kontaminací (kovové odpadky, beton, šterk používaný na cestách...).

Celkovou atmosférickou depozici lze odhadnout pro prvky netvořící plyny na 4/3 toku na volné ploše, pro Cl, F, N a S na 5/3 (v případě síranů, které jako jediné zřejmě nejsou významně ovlivněny interakcí s korunami stromů, tato hodnota přibližně souhlasí s podkorunovým tokem, který by se od celkové depozice SO₄²⁻ neměl mnoho lišit). Pokud jsou podkorunové toky nižší než takto vypočtené hodnoty, je to indicie pohlcování prvku v korunách, které však je bezpečně prokázáno jen tehdy, když je tok pod korunami nižší než na volné ploše (např. BREDEMEIER 1988; BEIER et al. 1992). V ostatních případech není třeba se podkorunovými srážkami příliš zabývat, neboť jde často o převážně vnitřní koloběh živin mezi stromy a půdou (zvláště u K, Mn, Mg). Přesnější výpočet atmosférické depozice není možný bez použití umělých inertních povrchů (viz např. HOFMEISTER 1997; STACHURSKI & ZIMKA 2000) nebo ještě náročnějších metod, a dosud často používané modelové výpočty srovnáváním gravitační depozice a podkorunového toku jsou založeny na nesprávných předpokladech (viz též BEIER et al. 1992; MARKOVÁ 2007), což vlastně dokazují i výsledky prezentované v tomto článku.

Odtok představuje směs vody z posledního deště (převážně z podkorunových srážek) s vodou, která napršela dříve, až před více než 10 lety. Systematický pokles nebo nárůst depozice prvku se tedy začne v odtoku projevovat hned, ale plně se projeví se zpožděním asi 10 let (J. BRUTHANS & V. ŠANTRŮČEK, os. sdělení). Vzhledem k nejistotě stanovení hydrologické bilance, možnému výskytu okrajů lesa s výrazně vyšší depozicí (BEIER et al. 1992) apod. je třeba brát toky látek s jistou rezervou a tam, kde tyto údaje nedávají jednoznačné závěry, porovnávat pokud možno hlavně vzájemné poměry prvků.

Povrchové vody

V roce 2009 bylo též jednorázově vzorkováno několik potoků odtékajících z melechovského granitu za účelem zjištění odtoku uranu a jeho příp. vztahu k dalším prvkům. Vzorky vod (odebírané co nejbližší k prameni) byly již v terénu okyseleny několika kapkami kyseliny dusičné. Poté byly v La-

boratořích geologických ústavů PŘF UK v Praze stanoveny stopové prvky metodou ICP-MS a síra metodou ICP- OES. Hlavní kationty v těchto vzorcích byly stanoveny v laboratořích ČGS. Dalších 6 stanovení U a Be na ICP-MS bylo provedeno ve vzorcích odtoku z malého povodí Loukov z roku 2009. Výsledky jsou v tabulce 4 a 5.

Výsledky a interpretace

1. pevné vzorky

V melechovském granitu byly ve zvětralinách zjištěny dvě skupiny ostře oddělené svými obsahy Al_2O_3 a SiO_2 (PROCHÁZKA et al. 2009; viz též obr. 2 v barevné příloze č. 1), které se však téměř neliší obsahy jiných prvků. Od čerstvých vzorků z vrtů se zvětralinou odlišují především nízkým obsahem uranu (průměrně 5,2 oproti 13,6 ppm). Výrazně vyšší je v eluviích ztráta žíháním (vzhledem k nízkému obsahu C jde převážně o H_2O) a pravděpodobně mnohonásobně vyšší je i obsah zlata, které sice nebylo ve vrtech měřeno, nicméně podle dat POUBY et al. (1988) lze očekávat v nealterovaném granitu průměrný obsah do 5 ppb, tedy mnohem méně, než jsou nejnižší obsahy v eluviích (tab. 1).

Již z vyhodnocení vztahů čtyř hlavních složek (SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O a H_2O – zjednodušeně ztráta žíháním) v primárních i nejpravděpodobnějších sekundárních minerálech vyplývá (obr. 2b–d v barevné příloze č. 1), že chemické změny při zvětrávání nelze vysvětlit pouze nahrazováním nestabilních minerálů (živce, biotit) sekundárními minerály (jílové minerály, oxohydroxydy, příp. muskovit spíše jako projev dřívější alterace) nebo hromaděním odolných primárních minerálů (křemen, muskovit). Vzájemné vztahy těchto složek jsou znázorněny graficky (obr. 2 v barevné příloze č. 1). Uvedené rozmezí složení čerstvých hornin ve vrtech nezahrnuje alterované vzorky, ty jej však nijak významně nemění (kromě jednoho obohaceného kalcitem, který by však při zvětrávání byl rozpuštěn jako první).

Kromě minerálů znázorněných v grafech obr. 2 v barevné příloze č. 1 je třeba uvažovat alteraci biotitu, která je však významně omezena jeho malým objemem v nezávětralé hornině (kde je již zčásti přeměněn na chlorit a muskovit). Pokud by se všechn biotit přeměnil na vermikulit, který byl zjištěn při zvětrávání lipnického granitu (PROCHÁZKA et al. 2009) a limonit, ztráta žíháním celé horniny by tím mohla vzrůst až asi o 0,25 %, tedy oproti čerstvé hornině téměř o čtvrtinu. Na obsah K_2O , SiO_2 a Al_2O_3 v hornině má zvětrávání biotitu mnohem menší vliv. K chloritizaci a baueritizaci biotitu dochází i v horninách, které se makroskopicky jeví jako zcela čerstvé (BREITER 2006, PROCHÁZKA et al. 2010).

Chemické složení většiny vzorků ve skupině bohatší Al lze odvodit z čerstvé nebo mírně navětralé horniny pouhým odebráním křemene. Nejjednodušším možným vysvětlením složení této skupiny, které není v rozporu ani s dalšími prvky, je ochuzení o křemen a obohacení o kaolinit nebo teoreticky i $AlO(OH)$ (to však není reálné po většinu doby existence půdního profilu). To lze vysvětlit tím, že došlo ke gravitačnímu přemístění nebo přeplavení drobných zrn sekundárních minerálů spolu s velmi drobnými úlomky živců a slíd, které byly dezintegrovány snadněji než křemen, nebo naopak že došlo k odplavení křemene. Mechanickému nabohacení o velmi drobná zrnka nasvědčuje i vyšší obsah zlata, které je zdaleka nejtěžším ze všech přítomných minerálů a mohlo být tedy málo pohyblivé podobně jako koloidní jílovitá hmota. Ostatní prvky soustředěné v těžkých minerálech (Zr, Ce, Th atd.) ve zvětralinách nabohaceny nejsou, možná proto, že drobná zrnka zirkonu, monazitu aj. mohou být i při své vyšší hustotě odstraněna poměrně snadno (o čemž svědčí i jejich pravděpodobný gravitační transport do puklin, projevující se ve složení puklinových výplní až do hloubky nejméně 100 m – CHVÁTAL et al. 2005).

Naproti tomu ve skupině zvětralin relativně chudších Al se zřejmě významně uplatňuje illit. Pravděpodobná je i příměs smektitu v illitu, neboť skutečnost, že navětralá hornina nebyla ochuzena o Na (tab. 1), svědčí o jeho přítomnosti i v sekundárních fázích.

Tab. 3 – Roční srážky a depozice H⁺ na volné ploše, výpočet celkové depozice (Na-Ca a Mn-Ni 4/3 toků na volné ploše, NH₄⁺ až SO₄²⁻ 5/3 v.p.), podkorunové srážky (TF) a odtok; úhrn vody v mm, H⁺ až SO₄²⁻ v kg/ha, Mn až Ni v g/ha. **Šedě** vyznačené hodnoty jsou příliš ovlivněny analýzami pod mezí detekce (pokud je v těchto analýzách místo 1/2 d.l. počítána 0, je výsledný tok o více než 30 % nižší).

Tab. 3 – Annual bulk precipitation (BP) and flux of H⁺ in BP, calculation of total deposition (for Na-Ca and Mn-Ni 4/3 of the flux in BP, NH₄⁺ to SO₄²⁻ 5/3 of BP), throughfall (TF), and discharge (water amount in mm, H⁺ to SO₄²⁻ in kg/ha, Mn to Ni in g/ha). The **grey** highlighted values are strongly influenced by analyzes bellow detection limit (if zero is calculated in these analyses instead of 1/2 d.l., the annual flux is by more than 30 % lower).

Volná plocha			přibližná celková depozice									
	Úhrn	H ⁺	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ ⁺	F	Cl	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
1995	954	0,357	3,4	6,0	1,4	11,6	25,1	0,68	7,6	56,0	90,2	
1996	636	0,142	4,5	3,4	1,4	15,0	23,4	1,31	8,4	54,0	92,1	
1997	659	0,222	4,3	4,2	0,9	6,0	10,2	0,48	7,4	33,0	48,3	
1998	625	0,158	2,1	4,6	0,7	6,1	6,6	0,27	5,7	25,3	31,3	
1999	664	0,078	2,3	4,0	0,9	8,7	10,2	0,28	12,1	24,4	30,3	
2000	751	0,107	2,8	3,0	1,1	8,1	15,4	0,33	7,8	38,8	34,9	
2001	795	0,102	1,7	2,2	0,8	7,0	11,1	0,24	4,6	31,1	31,5	
2002	803	0,122	2,4	3,7	1,7	6,3	7,1	0,19	4,6	27,9	32,2	
2003	669	0,089	5,0	4,5	2,6	8,6	15,4	0,32	9,2	41,1	38,9	
2004	746	0,061	2,7	3,7	1,5	6,3	7,4	0,24	5,9	24,0	28,1	
2005	847	0,106	2,6	6,5	2,0	7,6	14,7	0,24	4,9	39,1	32,0	
2006	861	0,153	2,1	2,6	2,1	6,5	8,0	0,31	3,8	34,3	31,0	
2007	702	0,155	1,9	3,9	1,1	5,4	10,6	0,17	4,9	25,9	26,1	
2008	589	0,057	2,1	4,9	2,8	6,4	6,0	0,18	5,6	20,0	26,8	
2009	853	0,057	2,5	3,9	2,2	8,5	8,3	0,23	4,8	38,5	25,5	
TF	Úhrn	H ⁺	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ ⁺	F	Cl	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂
1995	565	0,410	3,2	19,7	2,9	14,4	5,9	0,44	7,1	21,7	77,3	2,1
1996	413	0,343	2,8	21,1	2,6	17,5	8,7	0,56	5,9	22,2	81,8	3,1
1997	466	0,302	2,3	21,7	3,1	15,2	5,8	0,48	8,4	25,7	72,9	
1998	432	0,074	2,2	28,7	3,5	13,8	6,5	0,35	9,0	20,9	60,3	
1999	451	0,167	2,3	18,1	2,1	8,2	9,0	0,25	6,1	33,3	40,7	
2000	468	0,128	2,3	20,2	2,5	10,4	8,2	0,23	7,1	31,8	36,7	
2001	515	0,153	1,5	19,3	2,5	10,7	5,6	0,26	5,2	29,0	35,8	
2002	648	0,094	1,5	18,5	2,3	7,7	7,4	0,16	4,7	24,4	26,5	
2003	396	0,082	1,5	19,8	2,1	10,0	8,2	0,23	5,4	30,5	34,5	
2004	474	0,064	1,7	21,3	1,9	5,4	3,8	0,24	5,8	16,1	23,7	
2005	584	0,041	1,8	23,3	2,2	9,5	4,1	0,24	5,7	21,8	29,1	
2006	640	0,128	1,9	22,7	2,4	9,4	6,1	0,32	5,2	18,9	31,3	
2007	428	0,141	1,8	17,8	1,8	5,9	5,3	0,15	5,4	23,4	19,0	
2008	440	0,051	2,7	18,5	2,0	11,0	2,8	0,19	7,2	17,2	35,5	
2009	553	0,077	1,9	19,3	1,9	7,7	3,3	0,31	6,3	22,8	66,7	

Odtok	Úhrn	H ⁺	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ ⁺	F	Cl	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂
1995	200	0,031	15,6	1,8	5,6	27,3	0,02	0,42	4,6	0,4	112,6	40,4
1996	214	0,017	17,0	2,2	6,7	31,2	0,02	0,43	5,0	1,2	128,9	45,5
1997	148	0,015	13,5	1,3	5,1	20,8	0,01	0,32	3,5	0,9	91,0	34,0
1998	81	0,005	7,7	0,7	2,7	11,1	0,01	0,15	2,0	0,3	47,2	
1999	134	0,010	12,1	1,1	4,4	18,1	0,01	0,29	3,2	1,5	79,0	
2000	103	0,009	8,8	0,9	3,4	13,7	0,01	0,25	2,4	0,6	62,1	
2001	93	0,008	8,4	0,7	2,9	11,9	0,03	0,18	2,1	0,1	52,6	
2002	138	0,020	12,3	1,1	4,8	19,2	0,01	0,32	3,0	0,5	62,3	
2003	104	0,008	8,9	0,9	3,5	13,9	0,01	0,22	2,4	0,5	64,4	
2005	102	0,024	9,7	0,8	3,6	15,6	0,01	0,27	2,4	0,2	67,8	
2006	134	0,041	10,9	1,0	4,2	16,6	0,21	0,33	2,5	0,8	74,0	
2007	63	0,005	5,8	0,5	2,0	8,1	0,01	0,14	1,3	0,3	35,6	
2008	77	0,007	7,2	0,6	2,4	10,0	0,04	0,14	1,6	0,2	39,7	16,0
2009	63	0,001	6,0	0,5	2,1	8,3	0,01	0,14	1,3	0,0	35,8	14,4

Tab. 3 – Pokračování.

Tab. 3 – Continued.

Volná plocha		Přibližná celková depozice								
	Úhrn	Mn	Zn	Fe	Al	As	Cd	Pb	Cu	Ni
1995	954	223	410	499	1048					
1996	636	257	383	799	1674	17,6	2,41	18,1	72,4	9,5
1997	659	185	265	279	834	6,0	1,87	29,5	141,0	4,6
1998	625	120	372	208	386		1,61	15,3	61,0	
1999	664	171	509	255	738	7,4	1,56	9,4	36,4	
2000	751	134	340	321	575	4,9	1,51	44,7	14,3	
2001	795	123			347	3,5	2,71	23,3	11,4	
2002	803	114	372		376	8,9	1,66	11,7	27,8	
2003	669	143	239		176	4,3	1,17	10,6	35,5	
2004	746	112	393	235	478	5,3	1,10	9,6	20,7	
2005	847	81	361	282	422	6,8	0,56	16,4		20,2
2006	861	119	362	287	235	10,3	1,75	13,7		14,0
2007	702	85	342	244	149	5,1	0,79	9,4		7,8
2008	589	136	246	211	501	5,0	0,40	6,7		42,3
2009	853	123	292	578	279	9,3	0,65	9,0		14,4
TF	Úhrn	Mn	Zn	Fe	Al	As	Cd	Pb	Cu	Ni
1995	565	3 657	267	272	696					
1996	413	2 755	225	507	691	5,9	1,45	29,1	25,1	9,5
1997	466	5 162	210	563	877	3,7	1,23	26,1	64,8	3,3
1998	432	6 176			605	0,0	0,96	23,6	15,9	
1999	451	2 107			395	2,2	0,83	16,9	13,4	
2000	468	2 989			393	2,9	0,48	12,6	9,9	

2001	515	2 562			416	2,7	0,49	22,7	11,1	
2002	648	1 345			379	3,1	4,67	7,3	7,2	
2003	396	2 604			307	1,4	0,50	7,7	12,0	
2004	474	1 961			245	2,8	0,65	10,3	21,3	5,4
2005	584	1 767			344	2,4	2,46	10,3		5,0
2006	640	2 854	150	289	396	6,6	0,68	11,7		8,0
2007	428	1 873	93	268	232	2,4	0,24	5,9		2,3
2008	440	2 475		354	351	4,7	0,33	8,7		5,6
2009	553	1 899	182	296	294	5,84	0,34	5,8		3,3
Odtok	Úhrn	Mn	Zn	Fe	Al	As	Cd	Pb	Cu	Ni
1995	200	207	112	860	1091					
1996	214	339	134	417	736	0,82	1,17	2,0	4,3	8,8
1997	148	155	45	396	573	1,05	0,53	1,1	2,6	3,2
1998	81	96			225		0,24	0,4	1,1	
1999	134	132			428	0,67	0,41	0,6	1,3	
2000	103	107			418	0,34	0,37	0,4	0,3	
2001	93	98			345	0,35	0,24	1,9	3,8	
2002	138	164			584	0,78	0,63	1,0	0,6	
2003	104	104			327	0,59	0,28	0,6	0,7	
2005	102					2,03	0,44	1,3		2,8
2006	134	165	31	462	719	0,87	0,47	1,2		2,4
2007	63	79	13	255	183	0,50	0,16	0,4		0,9
2008	77	90	19	292	220	0,45	0,20	0,3		1,8
2009	63		20	124	268	0,50	0,20	0,4		1,3

Z lineární regrese vzorků zvětralin vyplývá, že směřují do průměrného složení vrtů a skutečnost, že ve vzorcích z vrtů byly hlavní prvky analyzovány v jiné laboratoři, aspoň u těchto složek nehraje významnou roli.

Rozdíly ve výsledcích korelační analýzy jednotlivých souborů

Ve vrtech je významná negativní korelace SiO_2 a K_2O (obr. 3a, b v barevné příloze č. 1). Ve zvětralinách tato korelace prakticky zaniká, i když určitý náznak se objevuje uvnitř skupiny bohatší Al_2O_3 . Z toho vyplývá jistá podobnost chování Si a K při zvětrávání. Ve zvětralinovém plášti mizí i negativní korelace SiO_2 s CaO .

Ve vrtech je korelace CaO a P_2O_5 jen slabá, ale v ploše P1 je výrazná, zvláště ve skupině chudší Al; silná je v eluviu také korelace Na_2O s P_2O_5 , která dokonce ve vrtech neexistuje vůbec. Také korelace mezi Na a Ca je ve zvětralinovém plášti silnější než ve vrtech (kde navíc existuje jen při vyřazení alterovaných vzorků, jinak je záporná). To zřejmě poukazuje na obdobné migrační vlastnosti Ca a Na v daných podmínkách po jejich uvolnění z pevné vazby v hornině.

P_2O_5 koreluje s Hf a Zr ve vrtech (asociace akcesorií apatit-zirkon-monazit-xenotim, viz HARLOV et al. 2008), ale ne ve zvětralem granitu. O rozdílném chování apatitu a dalších akcesorií při zvětrávání svědčí také vztahy fosforu k vzácným zeminám. V eluviích mizí slabá pozitivní korelace s lehkými, soustředěnými hlavně v monazitu, významná je však korelace s těžšími a s yttriem, které jsou v původní hornině hlavně v apatitu. Ve skupině zvětralin méně obohacené Al významně

Tab. 4 – Koncentrace U a Be v odtoku z povodí Loukov ($\mu\text{g/l}$), rok 2009. [Ve vzorku podkorunových srážek z května 2009 byly koncentrace U i Be pod mezí detekce ($0,05 \mu\text{g/l}$).]

Tab. 4 – U and Be concentrations in the discharge from the Loukov catchment ($\mu\text{g/l}$) in the year 2009. [In the sample of throughfall from May 2009, Be as well as U were below detection limit ($0,05 \mu\text{g/l}$).]

měsíc	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
U	0,75	2,9	0,45	0,32	0,29
Be	0,86	1,0	0,52	0,38	0,61

koreluje s prvky soustředěnými v apatitu také Mn, na jehož obsahu v čerstvé hornině se apatit podílí asi ze čtvrtiny.

Ve zvětralinách je významná korelace olova se ztrátou žíháním, která chybí ve vrtech, což vysvětluje již PROCHÁZKA et al. (2009) sorbcí na jílové minerály. Zde používáme přesnější termíny: jde o vazbu – nemusí jít jen o sorbci – nejen na jílové minerály, ale také na hydroxidy Fe. Ty sice přispívají ke ztrátě žíháním málo, ale mají zřejmě těsnou korelaci s jílovými minerály (pokud je však podobná korelace prvku se ztrátou žíháním i ve vrtech, jako např. u zinku, může jít jen o důsledek koncentrace prvku ve slídách). Ve skupině zvětralin bohatších Al má Pb navíc silný vztah také s Fe a Ti.

2. malé povodí a povrchové toky

Chování prvků a jejich vzájemné vztahy

Z hlavních prvků v hornině jsou z povodí v rozpuštěné formě odnášeny v poměru k atmosférické depozici nejvíce Na, Mg, Ca a Si (jehož depozice na volné ploše nebyla měřena), ze stopových prvků Be a Sr. Z aniontů v odtoku jednoznačně dominuje síran a vysoký odtok S nelze vysvětlit jen vysokou atmosférickou depozicí, i když byla v minulosti vyšší (viz dále). Stanovení síry v horninách je značně citlivé na kontaminaci a ve vrtech ani nebylo provedeno, nicméně vysvětlení nadbytku síry v odtoku zvětráváním sulfidů (které jsou hlavně v puklinách) je realistické. Např. z vrstvy horniny mocné 25 m by bylo za 10 000 let v roztoku odneseno průměrně 128 ppm S.

Odtok pravděpodobně převažuje nad depozicí také v případě Fe. Nejistá je bilance Mn a pouze krátce sledovaného Co, které jsou však v povodí spíše zadržovány. Jednoznačně jsou v povodí pohlcovány K, Al, F, Cl, ze stopových prvků hlavně Cu, Pb, As, Zn, Ni a Cd a totéž lze říci i o Cr a Mo, i když byly sledovány jen dva roky. Velmi nízký je i odtok anorganického dusíku, který je většinou pod mezí detekce (významnější odtok N by signalizoval jeho špatné využití v důsledku přesycení ekosystému dusíkem a/nebo poškození lesa).

Mnohé prvky pohlcované v povodí (Cd, Zn, Ni, Cu, snad i Pb) jsou absorbovány již v korunách stromů. S opadem jehličí se mohou dostat do půdy, ale poté mohou opět vstoupit do rostoucí biomasy, aniž by se tím musela zvýšit koncentrace těchto prvků v biomase. Zajímavé je, že zpočátku byly výrazně nižší než atmosférická depozice i podkorunové toky Cl, F a Al. Je možné, že v počátečním období vysoké depozice byly nepříliš pevně zadrženy v kůře a z ní až později uvolněny do podkorunových srážek. I když v horninách byly měřeny Zn, Pb, Cu, As, Cr, Mo i Ni a ve zvětralých též Cd, tato stanovení bohužel vůbec nelze mezi vzorky z vrtů (analýzy v ČGS) a zvětralinami (analýzy v AcmeLabs) porovnávat vzhledem k velkým rozdílům mezi metodami stanovení. Zatím nelze rozhodnout, zda jsou tyto prvky akumulovány spíše v biomase nebo v půdě.

Z hlediska samotné interakce srážkové vody s biomasou je zajímavé též dlouhodobé pohlcování sodíku v korunách. Podkorunový tok Na je celkově nižší ($31,3 \text{ kg/ha}$) než gravitační depozice ($31,9 \text{ kg/ha}$) i za dlouhé období 15 let, což je zatím unikátní výsledek, který odráží nízkou depozici Na v českém vnitro-

Tab. 5 – Koncentrace hlavních příměsí (S až SiO₂, mg/l) a stopových prvků (µg/l) v povrchových vodách odtékajících z melechovského granitu (odběr 3. 10. 2009). Th vždy < 0,05 µg/l, Se vždy < 0,5 µg/l.

Tab. 5 – Concentrations of major solutes (S to SiO₂, mg/l) and trace elements (µg/l) in surface waters flowing from the Melechov granite (collected 3. 10. 2009). Bellow detection limit: Th < 0,05 µg/l, Se < 0,5 µg/l.

bod č.	1	2	3	4	5	6
lokality (viz též obr. 1)	z. od vrcholu Melechova	Rohule – vodovod	zsz. od Loukova (mimo povodí GEOMON)	s. od Loukova těsně nad přepadem (GEOMON)	~ 0,5 km nad přepadem povodí GEOMON	jz. od Koňkovic
S	14,04	12,23	16,56	13,09	15,08	16,2
Na	9,06	7,02	8,89	10,01	9,68	9,14
K	1,16	1,18	1,16	0,42	0,95	1,08
Mg	2,77	2,22	3,1	2,88	3,09	3,14
Ca	10,08	14,66	14,26	10,13	11,6	26,5
SiO ₂	26,7	18,9	23,5	26,5	26,5	23,8
Li	14,9	6,7	17,8	17,3	19,2	11,6
Be	1,04	0,31	1,11	0,42	0,51	0,84
Al	523	65	152	118	103	190
V	0,24	0,20	0,01	0,26	0,27	0,26
Cr	0,22	0,16	0,33	0,61	0,27	0,17
Mn	139	12	28	124	55	105
Co	1,15	0,04	0,17	0,45	0,38	0,42
Ni	1,79	0,75	2,32	2,16	2,09	2,63
Cu	2,63	15,46	2,85	2,55	2,41	3,70
Zn	57	56	52	43	43	84
As	0,40	0,58	0,19	0,53	0,49	0,33
Rb	6,22	4,53	4,20	2,16	3,78	3,72
Sr	52	59	74	47	57	65
Ag	0,13	0,21	0,20	0,15	0,17	0,33
Cd	0,45	0,21	0,41	0,06	0,13	0,52
Cs	0,39	0,48	0,35	0,25	0,41	0,20
Ba	13,7	8,3	18,6	12,4	15,5	22,9
Tl	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,09
Pb	1,35	0,61	1,10	0,72	0,84	0,91
U	1,06	2,28	0,65	0,31	0,50	0,42

zemí. I když rozdíl 0,6 kg/ha není významný, podle modelů předpokládajících inertní chování sodíku v korunách (např. BREDEMEIER 1988) by jeho intercepční depozice musela být nulová, což samozřejmě neodpovídá skutečnosti a výsledky tak definitivně dokazují neoprávněnost tohoto předpokladu.

Hmotnostně je nejvýznamnější kationt v odtoku z povodí Ca, jeho depozice dosahuje zhruba třetiny až necelé poloviny odtoku. Poměr Ca/Sr je v odtoku vždy vyšší než v hornině (obr. 4, 5b v barevné příloze č. 2). I když není známa depozice Sr, zdá se, že k odtoku Ca významněji přispívají i nesilikátové minerály – apatit a možná i zbytky kalcitu, i když se vyskytoval jen v nepatrném množství (viz též WHITE et al. 2005).

Podobně i poměry K/Rb a K/Cs jsou v odtoku vyšší než v horninách (obr. 5a v barevné příloze č. 2). Rb a zvláště Cs jsou v hornině hlavně jako mezivrstevní kationty ve slídách. Z biotitu sice mohou být snadno uvolněny, ale v případě vzniku vermikulitu a hydrobiotitu mohou být vzápětí zadrženy (SAWHNEY 1972). Celkově větší podíl těchto prvků v melechovském granitu obsahuje muskovit, který je odolnější než K-živec, což může vysvětlit změnu podílu K/Rb a K/Cs.

V měsících s vysokým odtokem je větší podíl vody stékající jen po povrchu nebo protékající mělko pod povrchem. V těchto obdobích jsou v odtoku vyšší koncentrace H^+ , K, Cd a Zn, často i NO_3^- ; v několika případech je velmi výrazně snížen obsah SO_4^{2-} , Cl a F. Při nižším odtoku vody jsou naopak vyšší koncentrace Na a Mn.

Časový vývoj v povodí

Na volné ploše klesla depozice téměř všech látek (nejvíce F, SO_4^{2-}) kromě Mg, jehož depozice naopak stoupla; možný je také nárůst depozice Ni, pro nějž jsou však data značně neúplná. Odtok všech sledovaných iontů sice také klesl, ale to je způsobeno poklesem odtoku vody, který je tak výrazný, že není jasné, nakolik se mohly uplatnit další faktory. Koncentrace prvků v odtoku zůstávají srovnatelné, platí to i pro síru a fluor, jejichž atmosférická depozice poklesla nejvíce (např. poměr SO_4^{2-}/Cl se nijak systematicky nemění).

Další vzorky povrchových vod

Analýzy vod ze tří dalších potoků ukazují, že dlouhodobě vzorkovaný odtok z povodí Loukov reprezentuje dobře složení vod odtékajících z melechovského granitu. Kromě vyšší koncentrace Cu se příliš neliší ani voda ze soukromého zdroje, která již je ovlivněna potrubím.

Vzájemné poměry alkálií a alkalických zemin v těchto potocích v porovnání s horninou jsou znázorněny v obr. 5 v barevné příloze č. 2.

3. Rychlost chemického zvětrávání

Srovnání odtoku prvků s jejich obsahy v hornině umožňuje pokusit se aspoň o velmi přibližnou kvantifikaci chemického zvětrávání v čase. Výpočet je možný pouze při zanedbání eroze, která byla významná spíše před vznikem půdního pokryvu. Pro většinu prvků odnášených z povodí je vypočítaná mocnost vrstvy do určité míry o prvek ochuzené v tabulce 6.

Nápadný je především rozdíl mezi rychlostí chemického zvětrávání podle Si, který je jako jediný hlavní prvek ve zvětralých horninách prokazatelně ochuzen, a mnohem rychleji odnášenými Ca a Mg, jejichž mírné snížení obsahu ve zvětralinách je paradoxně statisticky nevýznamné. I když k jistému ochuzení zvětralin o hořčík snad došlo (tab. 1), tento pochod by měl být mnohem rychlejší naopak

Tab. 6 – Mocnost vrstvy horniny (m), z níž by byla za 10 000 let odnesena 1/10 původního obsahu příslušného prvku, resp. množství prvku odpovídající rozdílu mezi čerstvými a zvětralými horninami podle tab. 1. Korigováno na atmosférickou depozici (kromě Si a U).

Tab. 6 – The thickness of rock layer (m), from which 1/10 of the original element's content would be removed in 10.000 years, and thickness of layer from which the amount of Si and U calculated from differences between fresh and weathered rocks (Tab. 1) would be removed. Corrected for atmospheric deposition (except for Si and U).

odnos 1/10 původního obsahu					odnos podle Tab. 1	
Na	Be	Mg	Ca	Si	Si	U
1,1	0,8	5,9	6,1	0,17	0,24	0,20

v době vzniku zvětrávacího profilu, kdy se rozkládal biotit. Je tedy nepravděpodobné, že by Ca a Mg v odtoku pocházely pouze ze zvětrávání horniny. Část Ca v odtoku pochází spíše z puklinových výplní (kalcit).

Naproti tomu původ Mg může být ve vrstvě opadu nebo v půdním organickém horizontu. Oběh minerálních živin, mezi nimiž mají Mg i Ca důležité místo, může být uzavřený jen v dlouhodobě relativně stabilizovaném ekosystému, kterému se pravděpodobně nestačil přiblížit ani původní prales před vznikem hospodářského lesa (a možná dříve i pastvin). V biomase smrku jsou Mg i Ca mnohem více koncentrovány v jehličí (Mg – chlorofyl) a v kořenech (Ca) než ve dřevě, které je těženo (a bylo jistě těženo již ve středověku). Opad jehličí a kořeny však zůstávají na místě. Prvky s nízkou elektronegativitou jako Ca a Mg jsou z nich uvolněny mnohem snadněji než tranzitní kovy (Zn, Cd ...), které jsou poté sorbovány v půdě. Dnešní les je vzrostlý s úplným korunovým zápojem, a proto se již nezvětšuje objem jehličí. Lze tedy spekulovat, že současný vysoký odtok Mg je kompenzován snižující se zásobou hořčíku ve vrstvě opadu, což na stromy v této fázi vývoje lesa nemusí mít negativní vliv. Byly dokumentovány i případy, kdy poškození lesa vedlo ke zvýšenému vyplavování Mg ze systému (THOMAS & BÜTTNER 1998).

Diskuse

Existuje i množství dalších dat využitelných k hodnocení zvětrávání melechovského granitu, která v tomto článku již nemohou být prezentována, nicméně nejsou v rozporu s interpretacemi zde podanými. Složení vod (většinou jen hlavní a málo stopových prvků) z více než 20 pramenů na melechovském granitu bylo jednorázově stanoveno v rámci projektu PADAMOT (MILODOWSKI et al. 2005) a rovněž pracovníky ČGS (L. RUKAVIČKOVÁ, J. BUDKOVSKÝ & J. HOLEČEK, in litt.; tato data byla poskytnuta se svolením SÚRAO). Tyto analýzy potvrzují např. systematicky vyšší poměr Na/K a Ca/Sr v odtékající vodě než v hornině, a rovněž dobrou reprezentativnost malého počtu stanovení Li a Rb uvedených v tabulce 4. Většina pramenů má vyšší pH než odtok z povodí Loukov.

O vazbě prvků na jílové minerály a hydroxidy Fe může napovědět chemické složení řečištních sedimentů (jílové minerály, příp. i organická hmota) a šlichů (limonit – kromě prvků v odolných těžkých minerálech: Zr, Ce, Th, Nb apod.), jejichž analýzy byly shrnuty ŽÁČKEM & PÁŠOU (2001). V řečištních sedimentech je ve srovnání s horninou z prvků měřených v povodí silně nabohacen Co, méně Cu, Ni a As, možná i Be. Podsítná frakce šlichů je obohacena o Pb, Cu a Zn, ale ochuzena o Ni.

Vysoký odtok různých kationtů z lesních ekosystémů je často vysvětlován okyselením půdy. To je často zjednodušeně vysvětlováno kyselou atmosférickou depozicí, která byla nejvyšší v poslední čtvrtině 20. století. Nicméně na granitovém podkladu ve svažitém reliéfu a se smrkovým porostem je jistá míra okyselení půdy přirozeným procesem, který se mohl projevit i mnohem dříve. Do souvislosti s kyselou depozicí bývá dáván i např. vysoký odtok Be z povodí s granitovým podkladem. Podle NAVRÁTILA et al. (2002) došlo v malém povodí Lesní potok ve druhé polovině 90. let současně se zvýšením pH v odtékající vodě také k poklesu koncentrace Be, která je nicméně dosud vysoká (průměr 4,7 µg/l v roce 2000); jde však o granit výrazně bohatší beryliem, z něž se mohla část obsahu Be uvolnit mnohem snadněji. V povodí Loukov by se současný odtok Be nemusel znatelně projevit na složení zvětralin ani za 10 000 let (viz tab. 6). Pro hodnocení vývoje odtoku Be není dostatek dat, nicméně zdá se, že v roce 2009 nebyla koncentrace Be významně nižší než v hydrologickém roce 1996 a 1997.

Závěr

Bylo porovnáno chování prvků na základě odlišnosti složení zvětralin od čerstvých hornin, což je výsledek procesů trvajících nejméně od začátku holocénu, a na základě bilance malého povodí, která

mnohem citlivěji odráží krátkodobé jevy. Poměrně malý odtok křemíku a uranu, které jsou ve zvětralinách oproti čerstvé hornině prokazatelně ochuzeny, naznačuje, že v minulosti musel odnos těchto prvků v rozpustné formě probíhat mnohem rychleji. Naopak významný je odtok některých prvků alkalických zemin a alkálií (Ca, Mg, Na, Sr, méně Be, Li); skutečnost, že nebylo zjištěno statisticky významné ochuzení zvětralin o tyto prvky (Li ve zvětralinách nebylo měřeno), lze vysvětlit poměrně krátkou existencí půdního profilu, příspěvkem puklinových výplní (až do poměrně velké hloubky) k odtoku Ca a možným dočasným snížením zásoby Mg v lesním opadu. V menší míře se mohlo projevit i stanovení hlavních prvků v čerstvých a zvětralých horninách v jiných laboratořích a možná přítomnost sekundárních fází jako smektity.

Pasivně, tedy odnosem dalších složek, jsou ve zvětralinách koncentrovány Al_2O_3 a Au. Většina prvků, které jsou v povodí pohlcovány (Zn, Cu, Ni, Cd a pravděpodobně další stopové prvky, které však byly sledovány jen krátce), je zachycována již v korunách stromů; jejich akumulace je tedy zřejmě umožněna rostoucím objemem biomasy, který v současnosti není kompenzován jinými toky látek v lesním ekosystému. K, As, Pb a případně Mn (jehož bilance v povodí je nejistá) nejsou pohlcovány přímo v korunách stromů, ale mohou být biomasou akumulovány prostřednictvím půdy. Možný je i nárůst koncentrace těchto prvků v jehličí a opadu. Cu, Pb, Zn, Ni a pravděpodobně další stopové kovy jsou ve zvětralinách vázány na jílové minerály a hydroxidy Fe, přičemž na jejich zvýšených koncentracích se mohla podílet i atmosférická depozice.

Přímé stanovení některých prvků v úplných půdních profilech včetně opadu, případně v biomase, a rovněž stanovení zbývajících stopových prvků (spolu s překryvnými analýzami hlavních prvků) v granitu z vrtů stejnými metodami, jako byly stanoveny ve zvětralinách, může značně upřesnit stávající interpretace.

Poděkování

Kvalitativní a kvantitativní data o srážkách, podkorunových srážkách a povrchovém odtoku byla pořízena v rámci projektu MŽP SP/1a6/151/07. Analýzy vod uvedené v tabulce 4 a 5 byly pořízeny s finanční podporou SÚRAO (objednávka č. 087/2009).

Literatura

- ANONYMUS, 2011: Historické mapy (podklad: Druhé vojenské mapování v Rakousku). – URL: www.mapy.cz (přístup 2. 5. 2011).
- BEIER C., GUNDERSEN P. & RASMUSSEN L., 1992: A new method for estimation of dry deposition of particles based on throughfall measurements in a forest edge. – *Atmos. Env.* 26A/9: 1553–1559.
- BREDEMEIER M., 1988: Forest canopy transformation of atmospheric deposition. – *Wat. Air Soil Pollut.* 40: 121–138.
- BREITER K., 2006: Geologická dokumentace a vyhodnocení vrtných prací. Dílčí zpráva úkolu Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa. – Ms., 81 p. [Depon. in: SÚRAO, Praha.]
- BREITER K. & PROCHÁZKA J., 2004: Druhá etapa výběru polygonů – detailní pozemní geologický výzkum. Dílčí zpráva úkolu „Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masiv – 2. etapa.“ – Ms., 16 p. [Depon. in: SÚRAO, Praha.]
- FOTTOVÁ D., 2000: Hydrochemie v povodí Loukov. – Závěrečná zpráva projektu 4110/01 „Režimní měření na testovací lokalitě – Melechovský masiv“. – Ms., 86 p. [Depon. in: SÚRAO.]
- FOTTOVÁ D., NAVRÁTIL T., KRÁMP, SKOŘEPOVÁ I., SKOŘEPA J. & CUDLÍN P., 2006: Územní aspekty a dlouhodobý monitorovací systém. Závěrečná zpráva projektu MŽP VaV-1D/2/16/II/04. – Ms., 63 p. [Depon. in: MŽP.]

- HARLOV D. E., PROCHÁZKA V., FÖRSTER H. J. & MATĚJKA D., 2008: Origin of monazite-xenotime-zircon-fluorapatite assemblages in the peraluminous Melechov granite massif, Czech Republic. – *Mineral. Petrol.* 94: 9–26.
- HOFMEISTER J., 1997: Vliv horského reliéfu na charakter atmosférické depozice ekologicky významných látek. – Ms., 151 p. [Dipl. pr.; depon. in: *Knih. Živ. prostředí Přír. Fak. Univ. Karlovy, Praha.*]
- CHVÁTAL M., STRNAD L., ŠEBEK O. & ZACHARIÁŠ J., 2005: Contribution to the WP2 report „Melechov Massif, Czech Republic“, Geochemical part. Dílčí zpráva projektu PADAMOT. – Ms., 39 p. [Depon. in: *Knih. Geol. Přír. Fak. Univ. Karlovy, Praha.*]
- MARKOVÁ P., 2007: Vyhodnocení atmosférické depozice na několika lokalitách Krkonoš a Jizerských hor v období 1994–2005. – Ms., 66 p. [Dipl. pr.; depon. in: *Knih. Geol. Přír. Fak. Univ. Karlovy, Praha.*]
- MILODOWSKI A. E., TULLBORG E.-L., BUIL B., GÓMEZ P., TURRERO M.-J., HASZELDINE S., ENGLAND G., GILLESPIE M., TORRES T., ORTIZ J., ZACHARIÁŠ J., ŠILAR J., CHVÁTAL M., STRNAD L., ŠEBEK O., BOUCH J., CHENERY S., CHENERY C., SHEPHERD T. & MCKERVEY J., 2005: Application of Mineralogical, Petrological and Geochemical Tools for Evaluating the Palaeohydrogeological Evolution of the PADAMOT Study Sites. – PADAMOT Project Technical Report WP2, 228 p. [Depon. in: *Nirex Ltd., Harwell, Velká Británie.*]
- NAVRÁTIL T., SKŘIVAN P., MINAŘÍK L. & ŽIGOVÁ A., 2002: Beryllium Geochemistry in the Lesní Potok catchment (Czech Republic), 7 years of systematic study. – *Aquat. Geochem.* 8: 121–134.
- POUBA Z., MORÁVEK P., BURIÁNKOVÁ D., FATKOVÁ J., FIALA J., JANATKA J., JELÍNEK E., KNOTEK M., PUDILOVÁ M. & RENÉ M., 1988: Český masív – ověřování prognóz Au. Dílčí úkol: Au-traverz. – Ms., 46 p., *Geoindustria* [Depon. in: *Geofond, Praha.*]
- PROCHÁZKA V., ŽÁČEK M., VLČEK V. & LANGROVÁ A., 2009: Chování některých prvků při zvětrávání granitoidů melechovského masívu. – *Zpr. Geol. Výzk. v roce 2008*: 189–195.
- PROCHÁZKA V., UHER P. & MATĚJKA D., 2010: Zn-rich ilmenite and pseudorutile: subsolidus products in peraluminous granites of the Melechov Massif, Moldanubian Batholith, Czech Republic. – *N. Jb. Miner. Abh.* 187/3: 249–263.
- SAWHNEY B. L., 1972. Selective sorption and fixation of cations by clay minerals: a review. – *Clays Clay Miner.* 20: 93–100.
- STACHURSKI A. & ZIMKA J. R., 2000: Atmospheric input of elements to forest ecosystems: a method of estimation using artificial foliage placed above rain collectors. – *Environment. Pollut.* 110: 345–356.
- THOMAS F. M. & BÜTTNER G., 1998: Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. – *Forest Ecol. Mng.* 108: 301–319.
- WHITE A. F., SCHULZ M. S., LOWENSTERN J. B., VIVIT D. V. & BULLEN T. D., 2005: The ubiquitous nature of accessory calcite in granitoid rocks: Implications for weathering, solute evolution, and petrogenesis. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 69: 1455–1471.
- ŽÁČEK M. & PÁŠA J., 2001: Geochemický výzkum v rámci 1. etapy vyhledávání testovacích polygonů v oblasti melechovského masívu. – Ms., 32 p. [Depon. in: *GEOMIN, Jihlava.*]
- ŽÁČEK M. & PÁŠA J., 2006: Detailní geochemický výzkum. Dílčí zpráva projektu SÚRAO „Provedení geologických a dalších prací na testovací lokalitě Melechovský masív – 2. etapa.“ – Ms., 84 p. [Depon. in: *GEOMIN, Jihlava.*]

Adresy autorů:

Václav PROCHÁZKA
V Bažantnici 2636
CZ – 272 01 Kladno
vprochaska@seznam.cz

Miroslav ŽÁČEK
GEOMIN družstvo
Znojemská 78
CZ – 586 56 Jihlava

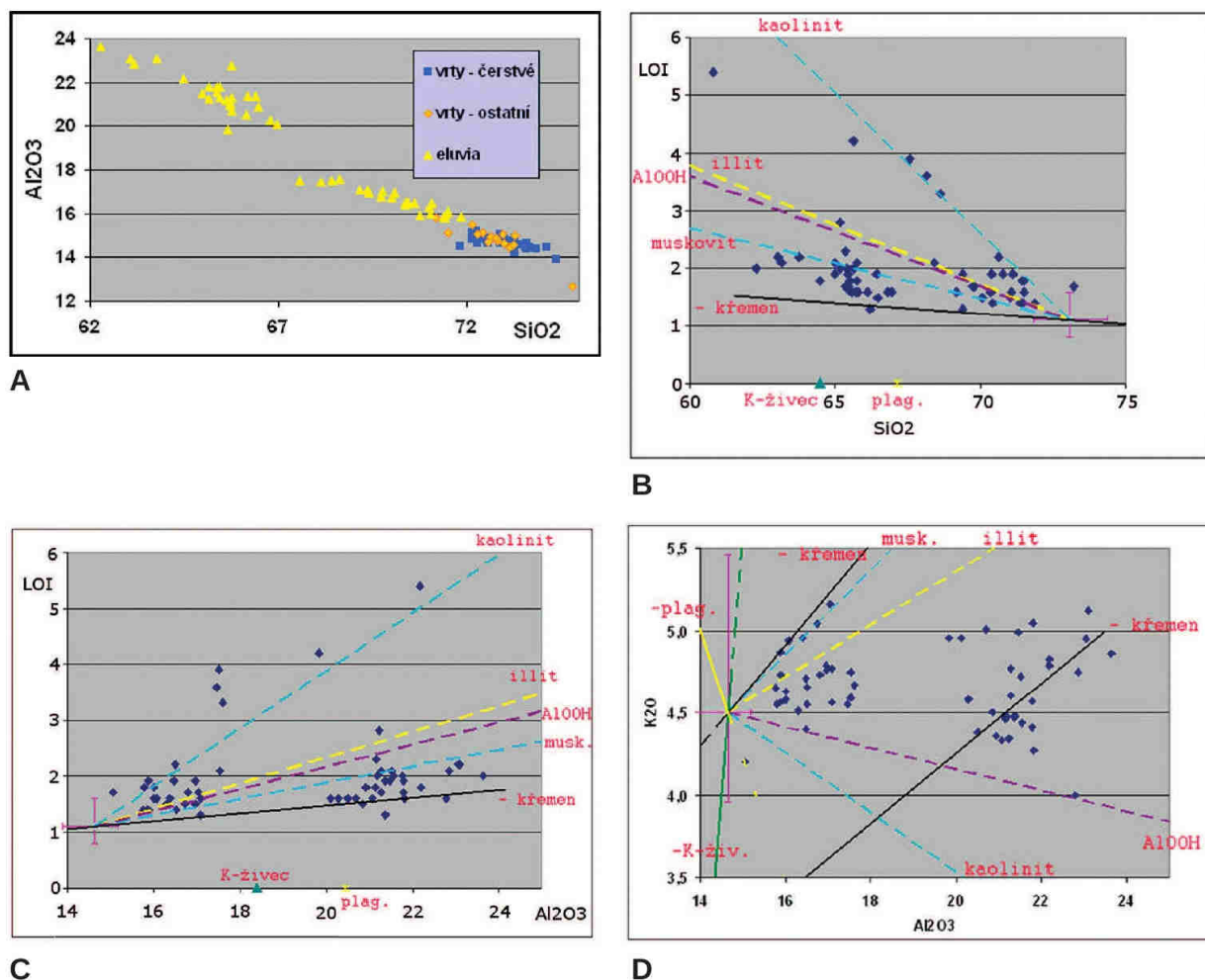
Daniela FOTTOVÁ
Česká geologická služba – pobočka Barrandov
Geologická 6
CZ – 152 00 Praha 5

Dobroslav MATĚJKA
Přírodovědecká fakulta UK, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů
Albertov 6
CZ – 128 43 Praha 2

Markéta ŠTĚPÁNOVÁ
Česká geologická služba – pobočka Barrandov
Geologická 6
CZ – 152 00 Praha 5

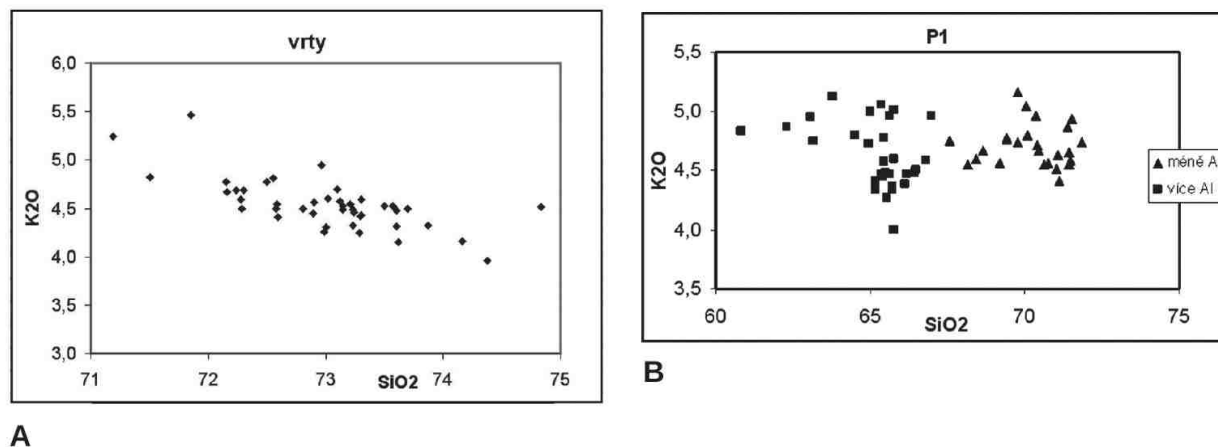
Došlo: 23. 5. 2011

Přijato: 10. 7. 2011

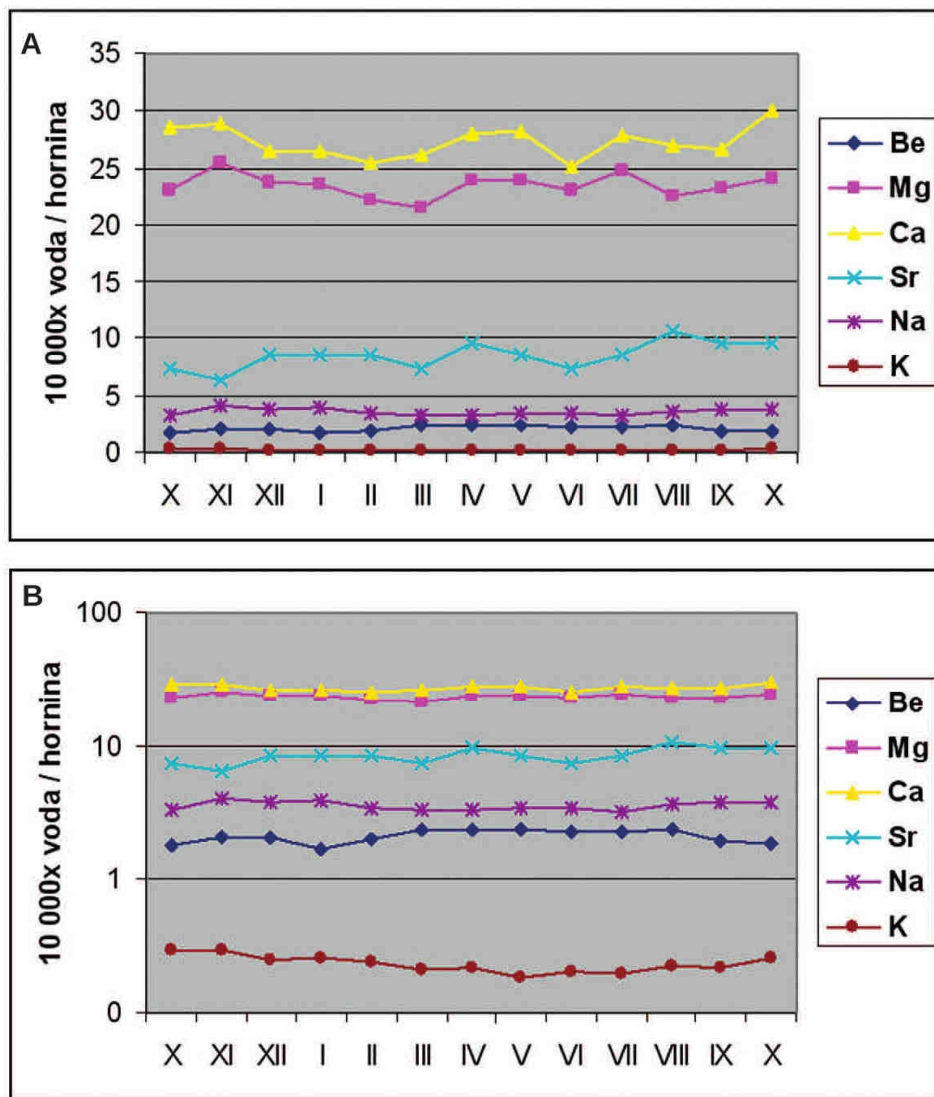


Obr. 2 – (a) Srovnání SiO_2 a Al_2O_3 v horninách z vrtů (rozděleny na čerstvé a ostatní – navětralé a alterované – podle BREITERA 2006) a ze zvětralinového pláště. (b) Srovnání SiO_2 a ztráty žíháním (LOI) v čerstvých a zvětralých horninách (chybové úsečky vyznačují nejnižší a nejvyšší obsahy ve vrtech – pouze čerstvé vzorky, modré značky jednotlivé vzorky zvětralých hornin). (c) Totéž pro Al_2O_3 a ztrátu žíháním. (d) Totéž pro Al_2O_3 a K_2O .

Fig. 2 – (a) Comparison of SiO_2 and Al_2O_3 in rocks from boreholes (divided into fresh and others – weathered and altered – after BREITERA 2006) and from the soil cap. (b) Comparison of SiO_2 and ignition loss (LOI) in fresh and weathered rocks (the error abscisses indicate the composition of fresh rocks in boreholes, and blue spots represent individual samples of weathered rocks). (c) The same for Al_2O_3 and LOI. (d) The same for Al_2O_3 and K_2O .

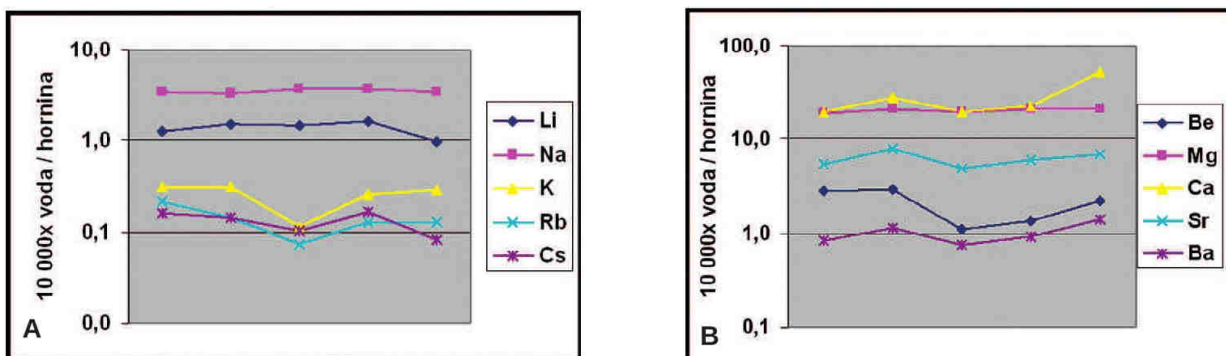


Obr. 3 – Vztah K_2O a SiO_2 v horninách (a) a zvětralinách (b).
Fig. 3 – Plot of K_2O and SiO_2 in fresh rocks (a) and eluvia (b).



Obr. 4 – Koncentrace alkalických kovů a kovů alkalických zemin analyzovaných v hydrologickém roce 1997 v odtoku z povodí Loukov v jednotlivých měsících; obsahy ve vodě jsou normalizovány obsahem v čerstvé hornině (1 mg/l je počítán jako ekvivalent 1 mg/kg = 1 ppm). Zobrazení v lineární škále (a) a v logaritmické škále (b).

Fig. 4 – Concentrations of alkalis and alkali earths analysed in the hydrological year 1997 in the discharge from the Loukov catchment in individual months; the concentrations in water are normalized by that in fresh rock (1 mg/l is taken equivalent to 1 mg/kg = 1 ppm). (a) in linear scale, (b) in logarithmic scale.



Obr. 5 – Koncentrace alkalických kovů (a) a alkalických zemin (b) v jednotlivých vzorcích vod potoků odebraných 3. 10. 2009 (vzorky č. 1 a 3–6), normalizované obsahy prvků v čerstvém melechovském granitu.

Fig. 5 – Concentrations of alkalis (a) and alkali earths (b) in individual samples from brooks (No. 1 and 3–6, see Tab. 5), normalized by element's abundances in the fresh Melechov granite.