ISSN 1211–8796

Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.
CVII (2022): 2, 203–214, 2022

RADIOAKTIVITA SEDIMENTŮ OSTRAVSKÉHO SOUVRSTVÍ V ČESKÉ ČÁSTI HORNOSLEZSKÉ PÁNVE A MOŽNÁ ENVIRONMENTÁLNÍ RIZIKA

RADIOACTIVITY OF SEDIMENTARY ROCKS OF THE OSTRAVA FORMATION IN THE CZECH PART OF THE UPPER SILESIAN BASIN AND POSSIBLE ENVIRONMENTAL RISKS

JIŘÍ ZIMÁK

Abstract

Zimák, J., 2022: Radioaktivita sedimentů ostravského souvrství v české části hornoslezské pánve a možná environmentální rizika. – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 107, 2, 203–214 (with English summary).

Radioactivity of sedimentary rocks of the Ostrava Formation in the Czech part of the Upper Silesian Basin and possible environmental risks

The paper provides detailed information about natural radioactivity of sedimentary rocks of the Ostrava Formation in the Czech part of the Upper Silesian Basin. The Ostrava Formation consists of Carboniferous (Namurian) coal-bearing strata of paralic development. Lithologically, the formation is very heterogeneous, with alternating cyclically arranged marine, brackish and terrigenous sediments. These are predominantly siliciclastics with a psammitic, aleuritic or pelitic structure (predominantly fine- to medium-grained sandstones, arkose sandstone, siltstone and claystone), often with an increased content of organic matter, concentrating into coal seams. The coal seams mainly comprise high rank (bituminous) coal. Conglomerates are less abundant in the Ostrava Formation. Potassium, uranium and thorium contents were measured using a laboratory gamma-ray spectrometer in 226 rock samples. It is evident from the calculated values of mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) that the natural radioactivity of conglomerates and psammites without a visible organic matter (on average 72 and 144 Bq.kg^{-1}, respectively) is lower as the natural radioactivity of the average Earth crust (about 180 Bq.kg^{-1}). Slightly higher average a_m values were found in siltstones and claystones with a low organic matter content (226 Bq.kg^{-1}), coaly siltstones and coaly claystones (240 Bq.kg^{-1}), coaly sandstones and arkose sandstones (232 Bq.kg^{-1}), and in coal (202 Bq.kg^{-1}). These values pose no health risk. However, high contents of uranium in coal and coaly sediments (on average around 8 ppm U) and consequently very high concentrations of uranium predicted in fly ash derived from the coal can be harmful to the environment and to human health.

Key words: Upper Silesian Basin, laboratory gamma-spectrometry, gamma dose rate, coal, uranium.

Jiří Zimák, Department of Biology, Faculty of Education, Palacký University, Purkrabská 2, 771 46 Olomouc, Czech Republic; e-mail: jiri.zimak@upol.cz

1. ÚVOD

Převážná část ionizujícího záření, jemuž je vystavena naše populace, má terestrický původ a primárně souvisí s přítomností přirozených primordiálních radionuklidů v horninovém prostředí (např. Bencko *et al.* 2011, Beamish 2014). Tento článek sumarizuje údaje o obsazích tří hlavních radioaktivních prvků (draslík, uran, thorium) v horninách ostravského souvrství, získané na základě laboratorních gamaspektrometrických analýz horninových vzorků odebraných jak na výchozech, tak montánních haldách v intravilá-

nu Ostravy. Přirozená radioaktivita jednotlivých horninových typů je hodnocena na základě vypočtené hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra, uvedena je i hodnota dávkového příkonu, odvozená z obsahů tří výše zmíněných prvků. Autor upozorňuje na zvýšené obsahy uranu v uhlí a uhelných sedimentech, které by mohly představovat určité zdravotní riziko.

2. STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA OSTRAVSKÉHO SOUVRSTVÍ

Ostravské souvrství (Namur A) má charakter paralické uhlonosné molasy, je výsledkem sedimentace na rozsáhlé přímořské akumulační plošině, což dokládají mořské usazeniny obsahující mořskou i brakickou faunu, které jsou odrazem občasných mořských záplav na pevninu (Dopita 2003). Vyznačuje se cyklickou stavbou o mocnosti cyklotém 15–40 m, jeho celková mocnost dosahuje téměř 3000 m. Stratigraficky se dělí na čtyři členy: petřkovické, hrušovské, jaklovecké a porubské vrstvy (např. Dopita 2003, Dopita *et al.* 2005, Pešek a Sivek 2012). V některých starších publikacích (Havlena 1983, Macoun a Müller 1992) k těmto čtyřem litostratigrafickým členům přistupují „vrstvy sloje Prokop“, v současném pojetí je báze sloje Prokop stratigraficky nejnižší částí sedlových vrstev karvinského souvrství (např. Pešek a Sivek 2012).

Díky velké rozmanitosti sedimentačního prostředí je ostravské souvrství litologicky velmi pestré, střídají se v něm cyklicky uspořádané mořské, brakické a terigenní sedimenty. Dopita (2003) považuje ostravské souvrství za litologicky nejpestřejší vrstevní sled v celé paleozoické historii Českého masivu. Z petrografického hlediska jde dominantně o siliciklastika s psamitickou, aleuritickou nebo pelitickou strukturou (převážně jemnozrnné nebo středně zrnité pískovce, případně arkózy, siltovce a jílovce), často se zvýšeným obsahem uhelné hmoty, koncentrující se do uhelných slojí. Ojedinělé jsou konglomeráty, jejichž podíl na složení celého souboru siliciklastik je pod 1 % (Dopita 2003), hojné jsou však v tzv. zámeckém slepenci (litologicky jde o středně až hrubě zrnité pískovce s vložkami gravelitů v nižší části porubských vrstev), jenž je výsledkem narušení paralického vývoje během glaciálu (viz Jirásek *et al.* 2013b). Součástí ostravského souvrství jsou tufogenní horizonty, jejichž horniny jsou zde tradičně označovány jako brousky (jsou-li mimo uhelné sloje) nebo jako uhelné tonsteiny (v uhelné sloji). Podrobnější údaje k petrografickým poměrům ostravského souvrství a jeho vývoji uvádí například Dopita a Kumpera (1993), Žídková *et al.* (1997), Dopita *et al.* (2005), Pešek a Sivek (2012), Hýlová *et al.* (2013), Jirásek *et al.* (2013a, b, 2018).

3. VZORKY A METODY

Během terénních prací byly odebrány vzorky hornin ostravského souvrství z přirozených i umělých výchozů (obr. 1 a 2) a také ze svahových sedimentů, konkrétně na k.ú. Koblov, Petřkovice u Ostravy a Slezská Ostrava. Soubor takto získaných vzorků byl rozšířen o materiál získaný na haldách Dolu Odra (Přívoz), Dolu Hubert, příp. Stachanov (Hrušov), Dolu Heřmanice (Hrušov) a na haldě Ema (Slezská Ostrava). Celkem bylo shromážděno a následně využito 226 horninových vzorků. Povrchové výchozy a dostupný haldový materiál se koncentrují zejména v petřkovických vrstvách, nejspodnější části hrušovských vrstev a v porubských vrstvách. Studovaný soubor vzorků tedy nepokrývá stejnoměrně celé ostravské souvrství.

Obr. 1. Výchoz s uhelnou slojí v areálu někdejšího Dolu Anselm (petřkovické vrstvy ostravského souvrství). Foto: Jiří Zimák.

Fig. 1. Outcrop with a coal seam in the area of the former Anselm Mine (the Petřkovice Member of the Ostrava Formation). Photo by Jiří Zimák.

Obr. 2. Výchozy pískovce jednotky „zámecký slepenec“ nad pravým břehem Lučiny, nedaleko od Slezskoostravského hradu. Foto: Jiří Zimák.

Fig. 2. Sandstone outcrops of the Castle Conglomerate Unit on the right bank of the Lučina River, close to the Silesian-Ostrava Castle. Photo by Jiří Zimák.

Determinace hornin byla prováděna pouze makroskopicky, zrnitostní složení siliciklastického materiálu a podíl organické (uhelné) hmoty byly stanoveny jen odhadem. Proto nejsou rozlišovány sedimenty s aleuritickou a pelitickou strukturou (tj. siltovce a jílovce). Sedimenty s odhadovaným obsahem uhelné složky v rozpětí 10 až 50 obj. % jsou někdy označovány souborně jako uhelné sedimenty (jde převážně o uhelné jílovce nebo siltovce, méně často o uhelné pískovce, příp. arkózy), jindy jsou na základě struktury děleny na dvě skupiny: i) uhelné psamity, ii) uhelné aleurity a pelity. Lze-li uhelnou složku považovat za dominantní součást horninového vzorku, pak je sediment označen zjednodušeně jako uhlí, s vědomím, že to není v souladu s klasifikačními principy běžně užívanými v sedimentární petrografii. Typické a makroskopicky bezpečně identifikovatelné brousky a uhelné tonsteiny nejsou ve studovaném souboru vzorků zastoupeny.

V horninových vzorcích byly na PřF UP v Olomouci za použití spektrometru SG – 1000 LAB s NaI(Tl) detektorem o objemu 0,35 dm^3 (průměr 76 mm, délka 76 mm) stanoveny obsahy draslíku (přímo na základě koncentrace ^{40}K), uranu a thoria (na základě dceřiných produktů, a proto jsou jejich obsahy při uvádění výsledků analýz v tabulkách a obrázcích označovány jako eU a eTh). Před měřením byly horninové vzorky rozdrceny a uzavřeny do krabiček o objemu 250 ml, v nichž byly následně měřeny. Hmotnost takto připravených vzorků se pohybovala kolem 350 gramů. Doba měření: 1800 s. Meze detekce: K = 0,5 hm. %, U = 1,5 ppm, Th = 1,5 ppm. Pokud byl v analyzovaném vzorku obsah některého ze stanovovaných prvků pod mezí detekce, bylo provedeno ještě jedno měření po dobu 5400 s, kdy byly meze detekce sníženy na 0,1 hm. % K a 0,3 ppm U a Th.

Ze stanovených obsahů draslíku, uranu a thoria byla vypočtena hmotnostní aktivita ekvivalentu ^{226}Ra (a_m), umožňující jednoduše a jednoznačně (jediným číslem) vyjádřit přirozenou radioaktivitu horniny, a kalkulován byl i dávkový příkon záření gama terestrického původu (D), tedy dávkový příkon záření gama pocházejícího z horniny se známými obsahy draslíku, uranu a thoria. Tyto parametry byly z výsledků gamaspektrometrických analýz vypočteny pomocí vztahů a_m [$Bq.kg^{-1}$] = (0,077*313K) + 12,35U + (1,43*4,06Th), D [$nGy.h^{-1}$] = (0,043*313K) + (0,427*12,35U) + (0,662*4,06Th), do nichž je obsah K dosazován v hm. %, obsahy U a Th v ppm (Beretka a Matthew 1985, UNSCEAR 1988, Matolín a Chlupáčová 1997, Ngachin *et al.* 2007, Eštoková a Palaščáková 2013).

Údaje o chemismu 34 reprezentativních vzorků uhelných aleuritů, uhelných pelitů a uhlí byly získány pomocí XRF analyzátoru DELTA-PREMIUM v laboratořích firmy URGA, s.r.o. se sídlem v Olomouci. Rozdrcený horninový vzorek o hmotnosti cca 100 g byl rozemlet ve vibračním mlýnu na prášek. Potřebné množství prášku (3 až 5 g) bylo bezprostředně před provedením XRF analýzy umístěno do středu kruhové podložky (folie) z polyetylénu a slisováno do tablety, která byla i s podložkou přemístěna na měřící okénko přístroje umístěného ve stativu. Výsledek energiově disperzní analýzy fluorescenčního záření je u analyzátorů tohoto typu značně ovlivňován povahou matrice. Vzhledem k tomu, že autor neměl k dispozici standardy vhodné pro analýzu sedimentů s vysokým podílem organické hmoty, byly do tohoto článku zařazeny pouze údaje o stanovených obsazích P_2O_5, a to s vědomím, že reálné obsahy ve vzorcích jsou o něco nižší (cca na úrovni 80 % ve srovnání s výsledky XRF analýz). To naznačují vysoké sumy hlavních oxidů anorganických složek v analyzovaných vzorcích uhlí. Je to zřejmé i ze srovnání obsahů draslíku stanovených v souboru 34 vzorků jak gamaspektrometricky (K_{GS}), tak XRF analýzou (K_{XRF}), kdy vztah mezi výsledky získanými oběma metodami vyjadřuje rovnice $K_{XRF} = 1{,}2094K_{GS} + 0{,}1461$ ($R^2 = 0{,}895$).

4. VÝSLEDKY

Výsledky všech provedených laboratorních gamaspektrometrických stanovení obsahů K, U a Th v horninách ostravského souvrství jsou shrnuty v tabulce 1, v níž jsou uvedeny

i kalkulované hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) a dávkového příkonu záření gama pocházejícího ze studovaných hornin (D). Získané poznatky jsou komentovány v následující kapitole.

Tabulka 1. Obsahy přirozených radioaktivních prvků (K, U, Th) v horninách, vypočtené hodnoty hmotnostní aktivity ekvivalentu ^{226}Ra (a_m) a dávkového příkonu záření gama (D); n = počet vzorků, x = průměr.
Table 1. Contents of the natural radioactive element (K, U, Th) in rocks, calculated values of mass activity of ^{226}Ra equivalent (a_m) and gamma radiation dose rate (D); n = number of samples, x = average.

	psefity (n = 7)				psamity (n = 65)				aleurity a pelity (n = 21)			
	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x
K (hm. %)	1,4	1,9	1,6	1,6	0,4	3,2	1,8	1,8	1,4	3,0	2,4	2,3
eU (ppm)	0,7	1,3	1,1	1,0	0,4	8,2	2,7	3,1	3,4	10,6	6,0	6,5
eTh (ppm)	2,8	4,5	3,2	3,4	2,8	31,6	9,2	10,7	8,6	22,4	16,1	15,5
a_m ($Bq.kg^{-1}$)	61	88	73	72	40	337	132	144	150	292	222	226
D ($nGy.h^{-1}$)	31	45	37	37	20	160	64	69	71	138	106	107

	uhelné psamity (n = 20)				uhelné aleurity a pelity (n = 74)				uhlí (n = 39)			
	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x	min.	max.	med.	x
K (hm. %)	1,0	3,5	2,1	2,1	0,7	3,7	2,1	2,1	<0,1	3,1	1,4	1,4
eU (ppm)	3,5	19,1	6,2	7,0	2,6	21,4	7,6	8,4	2,8	15,8	8,2	8,2
eTh (ppm)	7,2	29,0	17,4	16,4	6,8	27,8	14,5	14,7	<0,3	21,2	12,2	11,7
a_m ($Bq.kg^{-1}$)	127	378	232	232	102	487	231	240	87	302	209	202
D ($nGy.h^{-1}$)	59	177	109	109	47	224	107	112	38	137	96	93

5. DISKUZE

1. Z údajů v tabulce 1 je zřejmé, že radioaktivita sedimentů s psefitickou nebo psamitickou strukturou (vyjádřená pomocí a_m) je v průměru výrazně nižší než radioaktivita skupiny aleurity+pelity, uhelných sedimentů a uhlí. Kdy však lze konkrétní hodnotu a_m považovat za vysokou nebo naopak nízkou? Za nejlogičtější lze považovat srovnání s hodnotami a_m vypočtenými výše uvedeným způsobem z klarků K, U a Th, tedy z jejich průměrných obsahů v zemské kůře. V literatuře uváděná klarková hodnota pro jeden a týž chemický prvek se často výrazně liší, a to v závislosti jak na kvantitě a kvalitě dat, tak i na způsobu jejich zpracování. Z klarků zveřejněných Goldschmidtem v roce 1937 (viz např. Bouška *et al.* 1980), kdy jde o 2,59 hm. % K, 4 ppm U a 11,5 ppm Th, je za použití vztahů v kapitole „Vzorky a metody“ vypočtená a_m 179 $Bq.kg^{-1}$ (D = 87 $nGy.h^{-1}$). Rudnick a Gao (2005) pro svrchní část zemské kůry kontinentálního typu uvádí 2,80 hm. % K_2O (= 2,32 hm. % K), 2,7 ppm U a 10,5 ppm Th. Tomu odpovídá a_m 150 $Bq.kg^{-1}$ (D = 74 $nGy.h^{-1}$). Z klarků vypočtených jinými autory (přehled poskytuje např. Rudnick a Gao 2005) lze samozřejmě odvodit jiné hodnoty am a D. Autor pro posouzení míry radioaktivity hornin dlouhodobě preferuje hodnotu 180 $Bq.kg^{-1}$ (am vypočtená z klarků podle Goldschmidta, po zaokrouhlení). Nutno doplnit, že průměrná hodnota globálního D je odhadována na 55 $nGy.h^{-1}$ (UNSCEAR 1988, Manová a Matolín 1995), střední hodnota D pro území ČR je 65,6 ± 19,0 $nGy.h^{-1}$ (Manová a Matolín 1995).

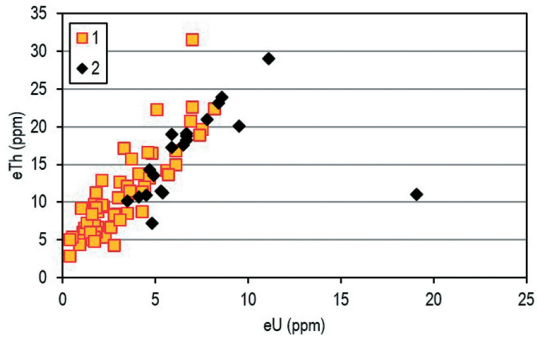
Radioaktivitu aleuritů+pelitů, uhelných sedimentů a uhlí ostravského souvrství lze proto na základě vypočtených hodnot a_m a D (viz tab. 1) považovat za zvýšenou, a to vlivem výrazně nadklarkových obsahů uranu ve většině vzorků reprezentujících tyto skupiny sedimentů. Z průměrných obsahů K, U a Th v souboru vzorků všech uhelných sedimentů (psamitů, aleuritů a pelitů) a uhlí (1,9 hm. % K, 8,1 ppm U, 14,1 ppm Th, celkem 133 vzorků) lze odvodit, že podíl uranu (a dceřiných produktů) na hodnotě a_m (227 $Bq.kg^{-1}$) je 44 %, podíl thoria (a dceřiných produktů) 36 %, podíl draslíku 20 %. Na kalkulovaném dávkovém příkonu D (107 $nGy.h^{-1}$) je podíl uranu 40 %, thoria 36 %, draslíku 24 %. Uhlí má v rámci této skupiny hornin relativně nízké obsahy K a Th (viz data v tab. 1), a proto je v případě uhlí podíl uranu na průměrné hodnotě a_m dokonce 50 %, na D 46 %.

K údajům v tabulce 1 (a současně k níže uvedenému obr. 5) nutno poznamenat, že všechny analyzované vzorky psefitů byly odebrány z výchozů „zámeckého slepence“ nad pravým břehem Lučiny a že z těchto výchozů pochází také pět vzorků psamitů, které jsou součástí souboru „psamity“ (n = 65). Psamity reprezentující jednotku „zámecký slepenec“ mají značný podíl živcových klastů (při makroskopickém hodnocení jde o arkózové pískovce), čemuž odpovídají gamaspektrometricky stanovené obsahy K v rozpětí 2,1–2,4 hm. % (průměr 2,3 hm. % K). Obsahy U a Th v těchto psamitech jsou relativně nízké, v průměru jen 1,5 ppm U a 5,5 ppm Th. Psamity z jednotky „zámecký slepenec“, jejíž původ je nepochybně fluviální (viz Jirásek *et al.* 2013b), tedy mají zhruba poloviční obsahy U a Th ve srovnání se psamity ostravského souvrství v paralickém vývoji (v průměru 3,3 ppm U, 11,1 ppm Th, n = 60).

Nutno zmínit, že na vyšší radioaktivitu aleuritů a pelitů ostravského souvrství ve srovnání s psamity lze usuzovat již z dat v publikaci Reného (1992), uvádějící pro aleuropelitické sedimenty mediánové hodnoty 6,4 ppm U a 14,5 ppm Th (11 vzorků), pro psamitické sedimenty 4,6 ppm U a 15,2 ppm Th (7 vzorků).

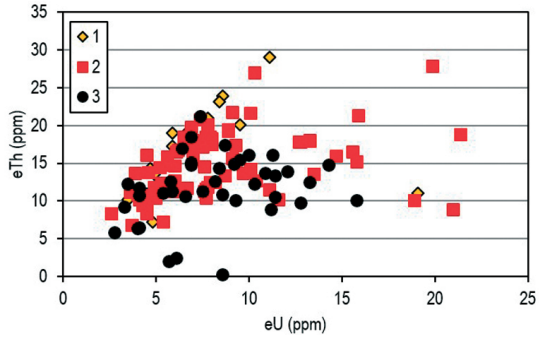
2. I když cílem nebylo řešit vazbu uranu v sedimentech ostravského souvrství, a použitými metodami to ani není možné, přesto z výsledků provedených laboratorních prací plyne několik poznatků, které by mohly být inspirací pro další výzkum:

i) V sedimentech s psamitickou strukturou existuje výrazná pozitivní korelace mezi obsahy U a Th (obr. 3). Hodnota poměru U/Th v horninách skupiny psamitů a uhelných psamitů patrně nijak nezávisí na přítomnosti (množství) uhelné hmoty. Lze jen spekulovat o možném společném nositeli obou prvků, jímž by mohly být fosfáty, jílové minerály, zirkon nebo *leukoxen*.



Obr. 3. Korelace uran versus thorium v psamitech (1) a uhelných psamitech (2).
Fig. 3. Uranium versus thorium correlation in psammites (1) and coaly psammites (2).

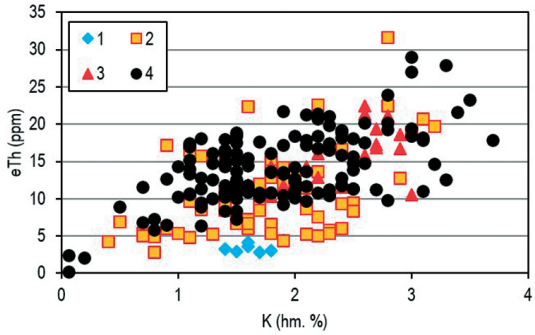
ii) Z obrázku 3 i z dat v tabulce 1 je zcela zřejmé, že v uhelných psamitech jsou obsahy uranu vyšší (median 6,2 ppm U) než v psamitech bez rozptýlené uhelné hmoty nebo s jen jejím nízkým obsahem (median 2,7 ppm U). Obdobnou situaci by bylo možno očekávat u sedimentů s aleritickou a pelitickou strukturou. Data v tabulce 1 však ukazují, že soubory „aleurity a pelity" a „uhelné aleurity a pelity" se obsahy uranu příliš neliší, druhý ze souborů má hodnoty medianu a průměru jen nepatrně vyšší. Z tmavě šedého až šedočerného zbarvení většiny horninových vzorků zařazených do skupiny „aleurity a pelity" lze předpokládat, že i tyto horniny obsahují uhelnou substanci. Kříbek (1997) uvádí, že jílovce a siltovce ostravského souvrství mají značný obsah rozptýlené organické hmoty (v průměru 1,7 % C_{org}), citovaným autorem považované za typický kerogen uhelného typu. Z grafu uváděného Kříbkem (1997) je zřejmé, že jílovce a siltovce ostravského souvrství mají v průměru vyšší obsah uranu než průměrná jílová břidlice, avšak konkrétní data v citované práci chybí (jak pro horniny ostravského souvrství, tak i pro „průměrnou jílovou břidlici"). Obrázek 4 ukazuje, že ve většině vzorků ze tří v něm srovnávaných skupin sedimentů jsou obsahy Th v obdobném intervalu hodnot, a současně dokumentuje vysokou variabilitu obsahů U v uhelných aleuritech a pelitech a v uhlí. Je z něj zcela zřejmé, že některé vzorky uhelných aleuritů a pelitů a zejména uhlí mají výrazně zvýšené obsahy U ve srovnání s uhelnými psamity. Lze to doložit i vypočtenými hodnotami medianu U/Th: 0,37 pro uhelné psamity, 0,47 pro uhelné aleurity a pelity, 0,63 pro uhlí. Tento trend je vysvětlitelný selektivní absorpcí uranu organickou hmotou.



Obr. 4. Korelace uran versus thorium v uhelných psamitech (1), uhelných aleuritech a uhelných pelitech (2) a v uhlí (3).

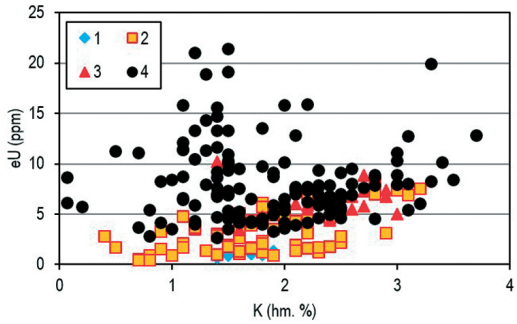
Fig. 4. Uranium versus thorium correlation in coaly psammites (1), coaly lutites (2) and coal (3).

Podle Martince (2005) je přirozená radioaktivita uhlí české části hornoslezské pánve vázána na obsahy U, Th a K v terigenních a diagenetických minerálech popelovin. Martinec (2005) uvádí, že „obsahy U jsou v uhlí české části hornoslezské pánve všeobecně nízké a korelují s obsahem fosfátů". Obsahy Th a K jsou podle citovaného autora vázány na terigenní illit, slídy a živce. Obrázek 5 ukazuje distribuci obsahů K a Th ve sledovaných horninových typech. Pozitivní korelace mezi oběma prvky je jen málo významná – v případě uhelných sedimentů a uhlí je hodnota koeficientu determinace (R^2) jen 0,357. I tak lze předpokládat vazbu obou prvků na Martincem (2005) uváděné silikáty.



Obr. 5. Korelace draslík versus thorium v psefitech (1), psamitech (2), aleuritech a pelitech (3) a v uhelných psamitech, uhelných aleuritech, uhelných pelitech a uhlí (4).

Fig. 5. Potassium versus thorium correlation in psefites (1), psammites (2), lutites (3) and coaly psammites, coaly lutites and coal (4).

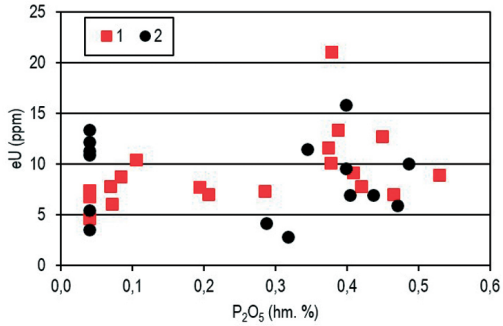


Obr. 6. Korelace draslík versus uran v psefitech (1), psamitech (2), aleuritech a pelitech (3) a v uhelných psamitech, uhelných aleuritech, uhelných pelitech a uhlí (4).

Fig. 6. Potassium versus uranium correlation in psefites (1), psammites (2), lutites (3) and coaly psammites, coaly lutites and coal (4).

Je uran v uhelných sedimentech a uhlí ostravského souvrství vázán dominantně na organickou hmotu nebo je jeho hlavním nositelem minerální složka? Dle názoru autora odpověď na tuto otázku dosud neznáme. Z obrázků 4 a 6 je zřejmé, že neexistuje závislost obsahů U na obsazích Th a K. Na základě tohoto zjištění jen lze spekulovat, že nositelem uranu by mohly být například již výše zmiňované fosfáty nebo organická (uhelná) hmota. Vazba uranu na organickou hmotu uhelných sedimentů a uhlí v různém stadiu prouhelnění je v literatuře široce diskutována a je nezpochybnitelná, v řadě publikací je organická (uhelná) hmota považována za hlavního koncentrátora uranu (např. Bouška 1977, Orem a Finkelman 2005). Nositelem podstatného množství uranu však může být i minerální složka. V černém uhlí je podle Finkelmana *et al.* (2018) na organiku (uhelnou hmotu) vázáno jen 5 % z celkového množství uranu, dominantních 95 % uranu má vazbu na minerální složku, včetně fosfátů, které jsou nositeli 15 % uranu přítomného v černém uhlí! Fosfáty jsou v uhlí reprezentovány hlavně apatitem, často též monazitem, xenotimem a minerály crandallitové skupiny (např. Seredin a Finkelman 2008, Finkelman *et al.* 2018). Z výsledků XRF analýz vzorků uhelných sedimentů a uhlí z ostravského souvrství v kombinaci s ga-

maspektrometricky stanovenými koncentracemi uranu nelze učinit žádné podložené závěry o vazbě uranu. Lze jen konstatovat, že v daném souboru dat neexistuje závislost například mezi obsahem uranu a podílem uhelné hmoty (ve všech analyzovaných vzorcích je uhelná hmota podstatnou složkou). Neexistuje ani vztah mezi obsahy U a P_2O_5, kdy by bylo možno na základě údajů MARTINCE (2005) očekávat pozitivní korelaci (obr. 7 – obsahy P_2O_5 pod mezí stanovitelnosti jsou reprezentovány hodnotou 0,04 hm. %).



Obr. 7. Korelace fosfor versus uran v uhelných aleuritech a uhelných pelitech (1) a v uhlí (2).
Fig. 7. Phosphorus versus uranium correlation in coaly lutites (1) and coal (2).

K úvahám o vazbě uranu v horninách ostravského souvrství nutno poznamenat, že současná distribuce uranu je do určité míry (a možná zcela zásadně) ovlivněna jeho mobilitou v průběhu diagenetických a prouhelňovacích procesů, kdy jím mohly být obohaceny sedimenty s vysokým podílem organiky (uhelné hmoty), jílové složky nebo fosfátů. Výskyt epigenetické mineralizace v horninovém prostředí ostravského souvrství a její charakter (viz např. WELSER *et al.* 2021) svědčí o cirkulaci nízkoteplotních hydrotermálních fluid, která mohla lokálně ovlivnit koncentraci přirozených radioaktivních prvků v jednotlivých horninových typech a změnit způsob jejich vazby. Jak uvádí například RENÉ (1992), v polské části hornoslezské pánve vedly epigenetické procesy dokonce ke vzniku uranové mineralizace infiltračního typu.

3. Uran je v uhelných sedimentech a uhlí ostravského souvrství přítomen v relativně vysoké koncentraci (tab. 1), průměr pro celý soubor 133 analyzovaných vzorků je 8,1 ppm U. Tato hodnota je 3× až 4× vyšší ve srovnání s průměrným obsahem uranu v uhlí z ložisek těžených ve světě. SEREDIN a FINKELMAN (2008) a KETRIS a YUDOVICH (2009) uvádí celosvětové průměrné obsahy uranu pro hnědé uhlí 2,9 ppm, černé uhlí 1,9 ppm, všechno uhlí 2,4 ppm. Ve srovnání s klarkem sedimentů (3,4 ppm U – SEREDIN a FINKELMAN 2008) jde o hodnoty nižší. Průměrné obsahy uranu v uhlí bez rozlišení stupně prouhelnění jsou u hlavních producentů následující: Čína 2,4 ppm (DAI *et al.* 2012), USA 2,1 ppm (FINKELMAN 1993). Mezi jednotlivými revíry, ložisky i v rámci jedné sloje mohou existovat výrazné rozdíly v obsazích uranu. To lze dokumentovat na průměrných obsazích uranu v uhlí ze třetí významné produkční oblasti, zahrnující území Sibiře, ruského Dálného Východu, Kazachstánu a Mongolska (ARBUZOV *et al.* 2011), které se v jednotlivých úsecích pohybují od 0,6–0,7 ppm (pánev Karaganda a ložiska na Sachalinu) až po 32,8 ppm (na mongolském ložisku Aduunchuluum). Zvýšené obsahy uranu v uhlí nejsou výjimečné, na některých ložiskách limitují využitelnost uhlí jako paliva například pro tepelné elektrárny, v extrémních případech jsou uhelné akumulace využívány jako uranová ložiska. Nutno poznamenat, že akumulace uranu v uhlí jsou známy i z Českého masivu – typickým reprezentantem je uhel-

né a uranové ložisko Rybníček na Trutnovsku, těžené v 50. letech 20. století Dolem Novátor (např. KŘÍBEK *et al.* 2017).

4. Radioaktivní prvky obsažené ve spalovaném uhlí se koncentrují ve strusce a popílku. Podle ARBUZOVA *et al.* (2011) jsou koncentrace U a Th v popílku obvykle 3× až 4× vyšší ve srovnání s původním palivem, někdy až 10× vyšší. KETRIS a YUDOVICH (2009) uvádí celosvětový průměr pro černé uhlí 1,9 ppm U a 3,2 ppm Th, pro popílky vznikající spalováním černého uhlí 15 ppm U a 23 ppm Th, což znamená, že obsahy U v popílcích jsou cca 8× vyšší než v černém uhlí, obsahy Th v popílcích jsou 7× vyšší! Vzhledem k relativně vysokým obsahům U a Th v uhlí ostravského souvrství lze očekávat v popílcích vysokou koncentraci obou prvků a s tím související zvýšenou radioaktivitu. Nutno zmínit, že PEŠEK *et al.* (2005, 2010) při hodnocení chemismu popelů uhlí ostravského souvrství (připravených v laboratorních podmínkách spalováním vzorků uhlí při 850 °C) uvádí obsahy uranu pouze ve dvou vzorcích popelů: 44 ppm U v popelu uhlí petřkovických vrstev a 8,8 ppm U v popelu uhlí hrušovských vrstev. Vyjdeme-li z údajů, které publikovali KETRIS a YUDOVICH (2009), a z průměrných obsahů U a Th v uhlí ostravského souvrství (8,2 ppm U a 11,7 ppm Th), pak vypočtená hodnota a_m průměrného popílku z ostravského uhlí (při zanedbání obsahu K) je 1286 $Bq.kg^{-1}$. Pokud budeme operovat pouze s trojnásobným zvýšením koncentrace obou prvků v popílcích, pak vypočtená a_m bude „jen“ 508 $Bq.kg^{-1}$. I to je hodnota relativně vysoká, a tak i vzhledem ke zvýšené radioaktivitě představují tyto popílky značnou zátěž pro životní prostředí.

6. ZÁVĚR

Radioaktivita siliciklastik ostravského souvrství (s podílem organické hmoty do 10 obj. %) výrazně roste od konglomerátů (průměrná a_m 72 $Bq.kg^{-1}$) přes psamity charakteru pískovců a arkózových pískovců (132 $Bq.kg^{-1}$) po siltovce a jílovce s relativně vysokým obsahem uhelné hmoty (226 $Bq.kg^{-1}$). Růst přirozené radioaktivity od psefitů ke skupině aleurity+pelity je dán postupným zvyšováním obsahů K, Th a zejména U. Průměrný obsah U v psefitech je 1,0 ppm, v psamitech 3,1 ppm, v aleuritech a pelitech 6,5 ppm.

Uhelné sedimenty (psamity, aleurity a pelity s obsahem uhelné hmoty v rozpětí 10–50 %) a vzorky uhlí (nad 50 % uhelné hmoty) mají často zvýšené obsahy uranu. V souboru 133 vzorků uhelných sedimentů a uhlí jsou obsahy U od 2,6 do 21,4 ppm (průměr 8,1 ppm, median 7,4 ppm). Hodnoty a_m pro celý tento soubor leží v intervalu 87 až 487 $Bq.kg^{-1}$ (průměr 228 $Bq.kg^{-1}$, median 227 $Bq.kg^{-1}$). Ve srovnání s průměrnou zemskou kůrou s a_m kolem 180 $Bq.kg^{-1}$ je radioaktivita uhelných sedimentů a uhlí ostravského souvrství jen mírně zvýšená, a neměla by proto představovat žádné environmentální riziko.

Rizikovým faktorem však mohou být relativně vysoké koncentrace uranu v uhlí a uhelných sedimentech ostravského souvrství, které jsou 3× až 4× vyšší ve srovnání s průměrnými obsahy uranu v uhlí hlavních producentů (např. Čína 2,4 ppm U, USA 2,1 ppm U). Obecně platí, že v popílcích vznikajících spalováním uhlí jsou koncentrace uranu výrazně vyšší ve srovnání s palivem (obvykle 3× až 8× podle různých údajů v literatuře).

PODĚKOVÁNÍ

Autor děkuje editorce (Mgr. Eva Víšková, Ph.D.) a oběma recenzentům (doc. Ing. Jakub Jirásek, Ph.D. a Ing. Petr Welser, Ph.D.) za kritické pročtení rukopisu a připomínky, které vedly k jeho zkvalitnění.

LITERATURA

Arbuzov, S. I., Volostnov, A. V., Rikhvanov, L. P., Mezhibor, A. M., Ilenok, S. S., 2011: Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). – International Journal of Coal Geology, 86, 318–328.

Beamish, D., 2014: Environmental radioactivity in the UK: the airborne geophysical view of dose rate estimates. – Journal of Environmental Radioactivity, 138, 249–263.

Bencko, V., Novák, J., Suk, M., Bílek, R., Čeřovská, J., Dvořáková, M., Ďuriš, M., Grundloch, J., Kadlec, J., Miler, I., Němeček, J., Novotný, L., Zamrazil, V., 2011: Zdraví a přírodní podmínky (medicína a geologie). – DOLIN, s.r.o., Praha.

Beretka, J., Matthew, P. J., 1985: Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. – Health Physics, 48, 87–95.

Bouška, V., 1977: Geochemie uhlí. – Academia, Praha, 207.

Bouška, V., Jakeš, P., Pačes, T., Pokorný, J., 1980: Geochemie. – Academia, Praha.

Dai, S., Ren, D., Chou, Ch.-L., Finkelman, R. B., Seredin, V. V., Zhou, Y., 2012: Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. – International Journal of Coal Geology, 94, 3–21.

Dopita, M., 2003: Vývoj hornicko-geologického poznání OKR a geologická stavba české části hornoslezské pánve. In: Černý, I., Dopita, M., Jiřík, K., Klepek, O., Langr, L., Machač, J., Roček, A. (ed.): Uhelné hornictví v Ostravsko-karvinském revíru, 12–31. – ANAGRAM, Ostrava-Mariánské Hory.

Dopita, M., Kumpera, O., 1993: Geology of the Ostrava-Karviná coalfield, Upper Silesian Basin, Czech Republic, and its influence on mining. – International Journal of Coal Geology, 23, 291–321.

Dopita, M., Sivek, M., Jirásek, J., Čáslavský, M., 2005: Geologická stavba české části hornoslezské pánve. – In: Martinec, P., Jirásek, J., Kožušníková, A., Sivek, M. (ed.): Atlas uhlí české části hornoslezské pánve, 12–19. ANAGRAM, Ostrava-Mariánské Hory.

Eštoková, A., Palaščáková, L., 2013: Study of natural radioactivity of Slovak cements. – Chemical Engineering Transactions, 32, 1675–1680.

Finkelman, R. B., 1993: Trace and minor elements in coal. – In: Engel, M. H., Macko, S. A. (Eds.), Organic Geochemistry. Plenum, New York, pp. 593–607.

Finkelman, R. B., Palmer, C. A., Wang, P., 2018: Quantification of modes of occurrence of 42 elements in coal. – International Journal of Coal Geology, 185, 138–160.

Havlena, V., 1983: Moravskoslezský spodní a svrchní karbon. In: Mísař, Z., Dudek, A., Havlena, V., Weiss, J., 1983: Geologie ČSSR I. Český masív, 242–254. SPN Praha.

Hýlová, L., Jureczka, J., Jirásek, J., Sivek, M., Hotárková, J., 2013: The Petřkovice Member (Ostrava Formation, Mississippian) of the Upper Silesian Basin (Czech Republic and Poland). – International Journal of Coal Geology, 106, 11–24.

Jirásek, J., Hýlová, L., Sivek, M., Jureczka, J., Martínek, K., Sýkorová, I., Schmitz, M., 2013a: The Main Ostrava Whetstone: composition, sedimentary processes, palaeogeography and geochronology of a major Mississippian volcaniclastic unit of the Upper Silesian Basin (Poland and Czech Republic). – International Journal of Earth Sciences, 102, 989–1006.

Jirásek, J., Opluštil, S., Sivek, M., Schmitz, M. D., Abels, H. A., 2018: Astronomical forcing of Carboniferous paralic sedimentary cycles in the Upper Silesian Basin, Czech Republic (Serpukhovian, latest Mississippian): New radiometric ages afford an astronomical age model for European biozonations and substages. – Earth-Science Reviews, 177, 715–741.

Jirásek, J., Sedláčková, L., Sivek, M., Martínek, K., Jureczka, J., 2013b: Castle Conglomerate Unit of the Upper Silesian Basin (Czech Republic and Poland): a record of the onset of Late Mississippian C2 glaciation? – Bulletin of Geosciences, 88, 893–914.

Ketris, M. P., Yudovich, Y. E., 2009: Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: world average for trace element contents in black shales and coals. – International Journal of Coal Geology, 78, 135–148.

Kříbek, B., 1997: Uhlíkaté formace Českého masivu a jejich mineralizace. – Knihovna ČGÚ, svazek 66. Český geologický ústav, Praha.

Kříbek, B., Sýkorová, I., Veselovský, F., Laufek, F., Malec, J., Knést, I., Majer, V., 2017: Trace element geochemistry of self-burning and weathering of a mineralized coal waste dump: The Novátor mine, Czech Republic. – International Journal of Coal Geology, 173, 158–175.

Macoun, J., Müller, V., 1992: Geologie území. In: Čurda, J., Lysenko, V., Macoun, J., Machek, P., Müller, V., Raclavská, H., Raclavský, K., Sloboda, J., Staňková, L., Tomášek, M., Veselý, J., 1992: Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů v měřítku 1 : 50 000. List 15–43 Ostrava, 7–19. Český geologický ústav, Praha.

Manová, M., Matolín, M., 1995: Radiometrická mapa České republiky 1 : 500 000. Český geologický ústav, Praha.

Martinec, P., 2005: Přirozená radioaktivita uhlí. In: Martinec, P., Jirásek, J., Kožušníková, A., Sivek, M. (ed.), 2005: Atlas uhlí české části hornoslezské pánve, 29–30. ANAGRAM, Ostrava-Mariánské Hory.

Matolín, M., Chlupáčová, M., 1997: Radioaktivní vlastnosti hornin. In: Kobr, M. et al., 1997: Petrofyzika, 109–126. Vydavatelství Karolinum, Praha.

Ngachin, M., Garavaglia, M., Giovani, C., Kwato Njock, M. G., Nourreddine, A., 2007: Assessment of natural radioactivity and associated radiation hazards in some Cameroonian building materials. – Radiation Measurements, 42, 61–67.

Orem, W. H., Finkelman, R. B., 2005: Coal Formation and Geochemistry. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., 2005: Treatise on Geochemistry. – Vol. 7 – Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks, 191–222. Elsevier, Amsterdam etc.

Pešek, J., Jelínek, E., Martínek, K., Sýkorová, I., 2005: Stopové prvky v uhlí české části hornoslezské pánve – porovnání výsledků nových a dřívějších analýz. – Uhlí – rudy – geologický průzkum, 12, 1, 3–8.

Pešek, J., Sivek, M., 2012: Uhlonosné pánve a ložiska černého a hnědého uhlí České republiky. – Česká geologická služba, Praha.

Pešek, J., Sýkorová, I., Jelínek, E., Michna, O., Forstová, J., Martínek, K., Vašíček, M., Havelcová, M., 2010: Major and minor elements in the hard coal from the Czech Upper Paleozoic basins. – Czech Geological Survey Special Papers 20. Czech Geological Survey, Prague.

René, M., 1992: Distribuce uranu, thoria a zlata v karbonských sedimentech severovýchodní části Českého masívu. – Časopis Slezského zemského muzea, Série A, Vědy přírodní, 41, 2, 151–157.

Rudnick, R. L, Gao, S., 2005: Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R. L., 2005: Treatise on Geochemistry. Vol. 3 – The crust, 1–64. Elsevier, Amsterdam etc.

Seredin, V. V, Finkelman, R. B., 2008: Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types. – International Journal of Coal Geology, 76, 253–289.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988: Exposures from natural sources of radiation. Report to the General Assembly. U. N., New York, USA.

Welser, P., Slobodník, M., Malek, O., Osovský, M., Jirásek, J., Matýsek, D., 2021: Epigenetické minerály české části hornoslezské pánve. – Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 106, 2, 81–123.

Žídková, S., Krejčí, B., Martinec, P., Dopita, M., Brieda, J., 1997: Ostravské souvrství. – In: Dopita, M. (ed.): Geologie české části hornoslezské pánve, 43–87. Ministerstvo životního prostředí České republiky, Praha.