

ČESKÁ VĚDECKOTECHNICKÁ VODOHOSPODÁŘSKÁ SPOLEČNOST, z. s.
ODBORNÁ SKUPINA ODPADNÍ VODY – ČISTOTA VOD

VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA, v. v. i.

ČESKÁ SPOLEČNOST CHEMICKÁ, z. s.
ODBORNÁ SKUPINA JADERNÉ CHEMIE

RADIONUKLIDY A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ VE VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ

XXVII. konference

21.–22. května 2024

ČESKÉ BUDĚJOVICE

ČESKÁ VĚDECKOTECHNICKÁ VODOHOSPODÁŘSKÁ SPOLEČNOST, z. s.
ODBORNÁ SKUPINA ODPADNÍ VODY – ČISTOTA VOD

VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA, v. v. i.

ČESKÁ SPOLEČNOST CHEMICKÁ, z. s.
ODBORNÁ SKUPINA JADERNÉ CHEMIE

RADIONUKLIDY A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ VE VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ

XXVII. konference

21.–22. května 2024

ČESKÉ BUDĚJOVICE

Odborné garantky:

Ing. Barbora Sedlářová

Ing. Eva Juranová, Ph.D.

RNDr. Diana Marešová, Ph.D.

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.

Podbabská 30, 160 00 Praha 6

Organizační garant:

Jan Kříž

Sekretariát ČVTVHS

Novotného lávka 5, 116 68, Praha 1

Redakční úprava:

Mgr. Zuzana Řehořová

Vydal:

**Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i.,
Praha, 2024**

ISBN 978-80-88484-08-0

OBSAH

MONITOROVÁNÍ POVRCHOVÝCH VOD ZAJIŠŤOVANÉ STÁTNÍM ÚŘADEM PRO JADERNOU BEZPEČNOST A NOVELIZACE ATOMOVÉHO ZÁKONA Z POHLEDU MONITOROVÁNÍ RADIAČNÍ SITUACE.....	5
<i>Jan Varmuža, Ondřej Kuklínek</i>	
MONITOROVANIE SLOŽEK HYDROSFÉRY V RÁMCI RADIAČNEJ MONITOROVACEJ SIETE.....	10
<i>Dušan Galanda, Miriama Monoková, Jana Slimáková</i>	
TRITIUM VE VODÁCH – NOVELA ATOMOVÉHO ZÁKONA A VYHLÁŠKY STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST.....	16
<i>Milan Hort</i>	
PŘIPRAVOVANÉ ZMĚNY ATOMOVÉHO ZÁKONA PRO OBLAST DODÁVÁNÍ A ÚPRAVY VODY Z PODZEMNÍCH ZDROJŮ.....	22
<i>Marcela Velkoborská</i>	
ZPŘESNĚNÍ ODHADU OBSAHU ²³⁴U V PEVNÝCH MATERIÁLECH S MOŽNÝM ZVÝŠENÝM OBSAHEM PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ VZNIKAJÍCÍCH NA ÚPRAVNÁCH PODZEMNÍCH VOD.....	28
<i>Tereza Doksanská, Alena Kelnarová</i>	
DOPORUČENÍ STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST „MĚŘENÍ A HODNOCENÍ OBSAHU PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ V PITNÉ VODĚ“ – PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI A PODNĚTY K JEHO REVIZI.....	35
<i>Tomáš Bouda</i>	
STANOVENÍ AKTIVITY DLOUHODOBÝCH RADIONUKLIDŮ V PODZEMNÍCH VODÁCH PRO POTŘEBY CHARAKTERIZACE LOKALITY HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ.....	46
<i>Michal Fejgl, Ivo Světlík, Ondřej Pařízek</i>	
VYLUHOVÁNÍ RADIOAKTIVNÍCH PRVKŮ Z HORNINOVÉHO MATERIÁLU	47
<i>Hana Šýbková, Michaela Kozlovská, Petra Ježková, Miroslav Jurda, Miloslav Němec, Petr Otáhal</i>	
KONTINUÁLNÍ STANOVENÍ AKTIVITY GAMA VE SRÁŽKOVÝCH VODÁCH.....	54
<i>Michal Fejgl, Miroslav Hýža, Karin Fantínová</i>	
TRITIUM V POVODÍ VLTAVY A LABE.....	55
<i>Diana Marešová, Magdaléna Balejová, Jiří Medek, Barbora Sedlářová, Eva Juranová</i>	
SLEDOVANIE ÚROVNE TRÍCIA V HRANIČNÝCH TOKOCH SLOVENSKA.....	64
<i>Enrico Mariaca, Mária Vojtková, Gabriela Wallová</i>	
SLEDOVÁNÍ ¹⁴C V POVRCHOVÉ VODĚ V OKOLÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN.....	73
<i>Eva Juranová, Barbora Sedlářová, Diana Marešová, Martina Kluganostová</i>	
STANOVENÍ ²³⁶U JAKOŽTO ANTROPOGENNÍHO RADIONUKLIDOVÉHO STOPOVAČE A JEHO PRVOTNÍ MĚŘENÍ V ENVIRONMENTÁLNÍCH VZORCÍCH Z ÚZEMÍ ČR.....	79
<i>Tomáš Prášek, Mojmír Němec, Barbora Sedlářová</i>	
STANOVENIE ¹²⁹I VO VZORKÁCH RIEČNEJ VODY.....	80
<i>Edita Červenková, Miriam Mindová, Martin Daňo</i>	
STANOVENIE IZOTOPOV JÓDU V MORIACH V OKOLÍ DÁNSKA.....	86
<i>Miriam Mindová, Mojmír Němec, Martin Daňo, Christof Vockenhuber, Xiaolin Hou</i>	

MOŽNOSTI VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ PŘI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY DEGRADACE GENŮ ANTIBIOTICKÉ REZISTENCE VE VODÁCH.....	87
<i>Jakub Sochor</i>	
STANOVENÍ AKTIVIT ²¹⁰Pb A ²¹⁰Po EXTRAČNÍ CHROMATOGRAPHII ZA ÚČELEM ZVÝŠENÍ CHEMICKÉHO VÝTĚŽKU OLOVA VE VODĚ A PEVNÝCH MATERIÁLECH.....	94
<i>Ivan Hupka</i>	
DOPORUČENÍ STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST „MĚŘENÍ A HODNOCENÍ OBSAHU PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ V MATERIÁLECH S MOŽNÝM ZVÝŠENÝM OBSAHEM PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ“ – PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI A PODNĚTY K JEHO REVIZI.....	95
<i>Tomáš Bouda</i>	
JAKOST VOD: STANOVENÍ UKAZATELŮ Z HLEDISKA METROLOGIE.....	108
<i>Tomáš Soukup</i>	
NORMY PRO STANOVENÍ RADIOAKTIVNÍCH LÁTEK VE VZORCÍCH VODY A SOUVISEJÍCÍ NORMY.....	112
<i>Lenka Fremrová, Barbora Sedlářová</i>	

MONITOROVÁNÍ POVRCHOVÝCH VOD ZAJIŠŤOVANÉ STÁTNÍM ÚŘADEM PRO JADERNOU BEZPEČNOST A NOVELIZACE ATOMOVÉHO ZÁKONA Z POHLEDU MONITOROVÁNÍ RADIAČNÍ SITUACE

Jan Varmuža, Ondřej Kuklínek
Státní úřad pro jadernou bezpečnost
e-mail: jan.varmuza@sujb.cz.

Klíčová slova: povrchová voda, monitorování, radiační situace, atomový zákon

Abstrakt

Monitorování povrchové vody na území České republiky (ČR) se řídí zákonem 263/2016 Sb., atomový zákon, vyhláškou 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace, a detailní informace o odběrových místech, způsobu monitorování, postupech vyhodnocování měření a předávání dat jsou uvedeny v Národním programu monitorování. Další požadavky na monitorování povrchové vody a předávání výsledků Evropské komisi jsou zakotveny ve Smlouvě o založení Evropského hospodářského společenství pro atomovou energii ve článku 35 a 36 této smlouvy a dále v Commission recommendation č. 2000/473/EURATOM.

Státní úřad zajišťuje monitorování povrchových vod a archivuje výsledky prostřednictvím databáze MonRaS. V této databázi jsou uložena i data o monitorování Labe, Odry a Moravy na hranicích ČR od roku 1986. V roce 2023 začal upgrade interní části aplikace MonRaS, aby bylo zajištěno efektivní fungování databáze s ohledem na zvyšující se objem příchozích dat o monitorování radiační situace, zodolnění aplikace z hlediska kybernetické bezpečnosti a zefektivnění správy a údržby databáze i aplikace.

Aktuálně probíhá novela atomového zákona, která v § 149 odst. 2 atomového zákona ruší výjimku z monitorování při havarijním cvičení, nácviku a porovnávacím měření. V § 149 odst. 4 atomového zákona zdůrazňuje strategickou funkci Národního programu monitorování jakožto základního a strategického dokumentu pro monitorování a rozšiřuje zmocnění v § 149 odst. 6 atomového zákona o podrobné požadavky na formu a způsob monitorování radiační situace a rozsah provádění monitorování správními orgány.

1. Legislativní požadavky na monitorování povrchových vod

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen SÚJB) zajišťuje monitorování povrchových vod na území ČR na základě § 149 zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon (dále jen atomový zákon), správní orgány uvedené v § 216 až 218 a § 220 až 223 atomového zákona, osoba, která má v držbě odval, odkaliště nebo jiný zbytek po činnosti související se získáváním radioaktivního nerostu nebo po jiné hornické činnosti doprovázené výskytem radioaktivního nerostu, nebo další osoby uvedené v národním programu monitorování (dále jen NPM) a držitel povolení podle programu monitorování vztahujícího se na území, na němž je umístěn areál jaderného zařízení, na pracoviště se zdroji ionizujícího záření nebo na území zóny havarijního plánování, je-li stanovena.

Podrobnosti k monitorování jsou dále upřesněny ve vyhlášce č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace (dále jen Vyhláška 360). Vyhláška rovněž specifikuje požadavky na provádění

monitorování radiační situace na území ČR, požadavky na měřicí laboratoř, způsob předávání výsledků monitorování do datového střediska SÚJB, povinnosti datového střediska a obsah Národního plánu monitorování.

Minimální požadavky na monitorování povrchových vod jsou uvedeny v příloze č. 3 vyhlášky 360. Minimální počet odběrových míst je 10 a v těchto místech mají být vyhodnocovány radionuklidy podle *tab. 1*.

Tab. 1. Požadavky na stanovení radionuklidů v povrchové vodě

Sledovaný radionuklid	Nejmenší detekovatelná hodnota v Bq/l	Délka monitorovacího období
^{137}Cs	0,1	Čtvrtletí
^{90}Sr	0,05	Rok
^3H	2	Čtvrtletí
Beta- ^{40}K	0,05	Čtvrtletí

Národní program monitorování (dále jen „NPM“) představuje základní dokument, podle kterého se řídí a provádí monitorování radiační situace na území ČR. Jedná se o komplexní dokument, jenž popisuje formy monitorování, osoby, které zajišťují monitorování, členění monitorovacích sítí a míst, obsahuje přehled monitorovaných položek, fyzikálních veličin, postupů, podle nichž se provádějí činnosti při monitorování, přehled měřicích a odběrových zařízení, měřicích laboratoří a popis datových formátů, přenosů a rozhraní. Součástí tohoto dokumentu jsou i požadavky na vzorky, pro které může být požadováno opakované měření, činnosti jednotlivých osob zajišťující monitorování a použité monitorovací úrovně.

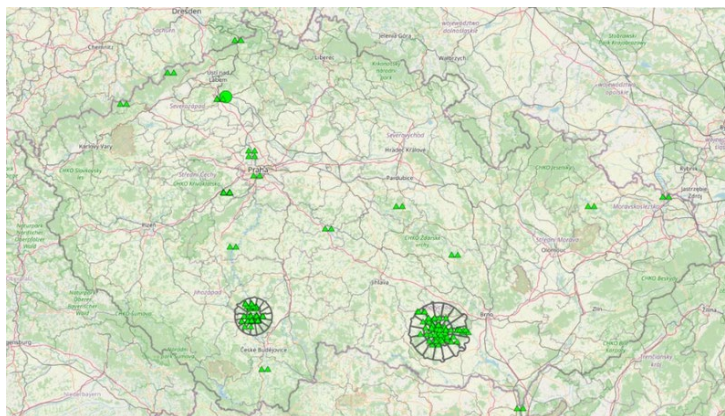
Požadavek na zajištění monitorování radiační situace vychází rovněž z evropské legislativy, a to konkrétně ze Smlouvy o založení Evropského hospodářského společenství pro atomovou energii (dále jen „EURATOM“). Konkrétně se monitorování zabývá článek 35 EURATOM, který říká: „Každý členský stát zřídí zařízení nezbytná k soustavnému monitorování úrovně radioaktivity v ovzduší, vodě a půdě a ke kontrole dodržování základních standardů. Komise má právo přístupu k těmto monitorovacím zařízením; může prověřovat jejich provoz a účinnost,“ a článek 36 EURATOM, který říká: „Příslušné orgány budou Komisi pravidelně sdělovat informace o monitorování podle článku 35 tak, aby byla Komise průběžně informována o úrovni radioaktivity, které je obyvatelstvo vystaveno.“

Požadavky článku 35 EURATOM jsou dále specifikovány v Commission recommendation č. 2000/473/Euratom (dále jen „Doporučení Komise“). Požadavky na monitorování povrchové vody jsou zakotveny ve 4. bodu, písm. c) bodu (iii) Doporučení Komise. Měřené radionuklidy a monitorovací úrovně pro předávání výsledků Komisi v husté síti (^{137}Cs (1 E+00 Bq/l), beta- ^{40}K (6 E-1 Bq/l)) a řídké síti (^{137}Cs (1 E+00 Bq/l)) jsou uvedeny v příloze č. 1 a 3 Doporučení Komise.

2. Data o monitorování

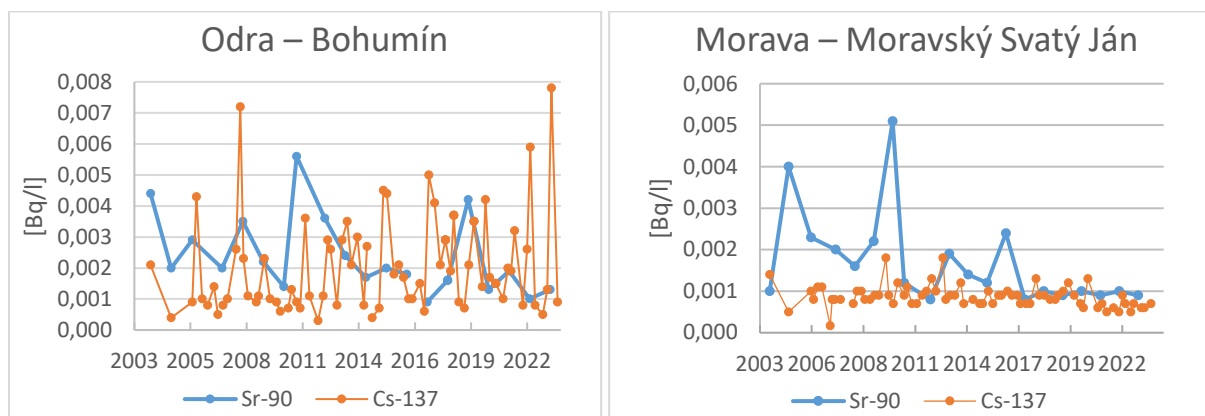
Data o monitorování povrchových vod jsou v souladu s § 149 odst. 1 písm. d) atomového zákona předávána průběžně do datového střediska SÚJB a archivována v databázi, kterou obsluhuje aplikace MonRaS. Aplikace disponuje interní částí, jež umožňuje data filtrovat na základě uživatelských požadavků a dovoluje libovolný přístup k historickým datům včetně jejich vizualizace na mapě. Externí část aplikace zajišťuje zveřejňování dat pro širokou veřejnost na webové stránce SÚJB. Data v této části jsou zveřejňována v omezeném rozsahu

z pohledu historických hodnot, a to 24 měsíců nazpět od aktuálního data. Rozsah zveřejňovaných vyhodnocovaných radionuklidů odpovídá *tab. 1*, tj. Beta- ^{40}K , ^{137}Cs , ^{90}Sr a ^3H .



Obr. 1. Monitorování povrchových vod na území ČR

Největší pozornost z hlediska monitorování povrchových vod je věnována řekám, do nichž jsou směřovány výpusti z jaderných zařízení, tj. řeky Vltava a Jihlava. Dále je prováděno monitorování sedmi vybraných vodárenských nádrží, tří hlavních toků opouštějících hranice ČR v místě státní hranice a 25 vybraných nádrží v okolí JE Dukovany a Temelín.



Obr. 2. Aktivita ^{90}Sr a ^{137}Cs v odběrových místech Odra – Bohumín a Morava – Moravský Svatý Ján.

V roce 2023 začal SÚJB připravovat upgrade interní aplikace MonRaS, jehož cílem je zajištění efektivního fungování databáze s ohledem na zvyšující se objem příchozích dat o monitorování radiační situace, zodolnění aplikace z hlediska kybernetické bezpečnosti a zefektivnění správy a údržby databáze i aplikace. Předpokládané spuštění testovacího provozu upgradované aplikace je červen 2024. Po ukončení testování ze strany SÚJB bude testovací prostředí rovněž otevřeno pro všechny dodavatele dat. Z hlediska dodavatelů dat by přechod na novou databázi neměl představovat velký problém, protože při upgradu je kladen hlavní důraz na to, aby samotný upgrade vyžadoval pouze minimální změny na straně dodavatelů.

V roce 2024 SÚJB započal i přípravné práce na redesignu externí části aplikace zajišťující prezentaci dat na webu SÚJB. V tomto případě se jedná především o změnu grafiky a možností filtrování. Nově bude externí část aplikace umožňovat práci s daty ve zjednodušeném a expertním režimu. V expertním režimu bude mít uživatel možnost přístupu k širší oblasti dat

(např. zobrazení všech naměřených radionuklidů), pokročilému filtrování dat, barevnému škálování atd.

3. Novela atomového zákona z pohledu monitorování radiační situace

V rámci novely atomového zákona došlo k odstranění výjimky v § 149 odst. 2 atomového zákona „*Monitorování radiační situace podle odstavce 1, s výjimkou monitorování při havarijním cvičení, nácviku a porovnávacím měření, zajišťují...*“ Novelizační bod opravuje chybu v zákoně. Účast na monitorování při havarijním cvičení, nácviku a porovnávacím měření je povinná pro všechny osoby, které se podílejí na monitorování radiační situace, což ostatně plyne z jiných ustanovení zákona, takže formulovaná výjimka není relevantní. Podrobnosti a upřesnění postupů při monitorování jsou stanoveny ve vyhlášce č. 360/2016 Sb., a v NPM.

Účelem změny § 149 odst. 4 atomového zákona, který říká: „*Při monitorování radiační situace se postupuje podle národního programu monitorování a dalších programů monitorování podle odstavce 2 a při havarijním cvičení, nácviku a porovnávacím měření se dále postupuje podle pokynů daných jejich organizátorem.*“, je zdůraznění strategické funkce Národního programu monitorování jakožto základního a strategického dokumentu pro monitorování. Program stanovuje role a úkoly jednotlivých resortů a dalších institucí a vytváří tak rámec, který zajišťuje potřebnou kvalitu a úroveň monitorování (odhalování stavu radiační situace). Od pravomocí a úkolů v NPM se odvíjejí i rozpočtové prostředky, jež mají resorty na tuto činnost čerpat ze státního rozpočtu.

Změna ve zmocnění v § 149 odst. 6 atomového zákona „*Prováděcí právní předpis stanoví podrobné požadavky na formu a způsob monitorování radiační situace a rozsah provádění monitorování správními orgány*“ provádí doplnění zmocnění pro vydání, resp. úpravu vyhlášky. Vyhláška bude v souladu s Národním programem monitorování podrobně upravovat role a úkoly orgánů státní správy při provádění monitorování. Z praktických zkušeností se jeví nezbytné zahrnout tuto úpravu do obecně závazného právního předpisu. Úprava ve strategickém dokumentu se ukázala jako nedostatečná.

Literatura

[1] Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon.

[2] Vyhláška č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace.

[3] Smlouva o založení Evropského hospodářského společenství pro atomovou energii.

[4] Commission recommendation 2000/473/Euratom, on the application of Article 36 of the Euratom Treaty concerning the monitoring of the levels of radioactivity in the environment for the purpose of assessing the exposure of the population as a whole.

MONITORING OF SURFACE WATER PROVIDED BY STATE OFFICE OF NUCLEAR SAFETY AND THE AMENDMENT OF THE ATOMIC ACT FROM THE POINT OF VIEW OF MONITORING THE RADIATION SITUATION

Keywords: surface water, monitoring, radiation situation, atomic act

Monitoring of surface water in the territory of the Czech Republic is governed by Act 263/2016 Coll., Atomic Act, Decree 360/2016 Coll., on monitoring of radiation situation. Detailed

information on sampling points, method of monitoring, evaluation of measurement and transmission of data are listed in the National Monitoring Programme. Further requirements for monitoring surface water and transmitting results to the European Commission are enshrined in the Treaty establishing the European Atomic Energy Community in Articles 35 and 36 thereof and in Commission Recommendation No 2000/473/Euratom.

The State Office for Nuclear Safety ensures the monitoring of surface water and archives the results through the MonRaS database. This database also contains data on the monitoring of Elbe, Odra and Moravia rivers at the borders of the Czech Republic since 1986. In 2023, the upgrade of the internal part of MonRaS database began to ensure efficient operation of the database in perspective of the increasing volume of incoming and radiation monitoring data, the reversal of the application in terms of cybersecurity, and streamlining the management and maintenance of both the database and the application.

An amendment to the Atomic Act is currently underway, which in Section 149(2) of the Atomic Act abolishes the exemption from monitoring during emergency exercises, training and comparative measurements. In Section 149(4) of the Atomic Act, it emphasises the strategic function of the National Monitoring Programme as a basic and strategic document for monitoring and extends the empowerment in Section 149(6) of the Atomic Act on detailed requirements for the form and method of monitoring the radiation situation and the scope of the monitoring by administrative authorities.

MONITOROVANIE ZLOŽIEK HYDROSFÉRY V RÁMCI RADIÁCNEJ MONITOROVACEJ SIETE

Dušan Galanda¹, Miriama Monoková¹, Jana Slimáková¹

¹Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky, Odbor radiačnej ochrany,
Trnavská cesta 52, 826 45 Bratislava
e-mail: dusan.galanda@uvzs.sk

Kľúčové slová: hydrosféra, indikačná hodnota, monitorovanie, rádiologické ukazovatele vody

Abstrakt

Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky plní funkciu ústredia radiačnej monitorovacej siete a zároveň vykonáva monitorovanie radiačnej situácie, zbiera a spracováva údaje o výsledkoch monitorovania v Slovenskej republike na hodnotenie ožiarenia a hodnotenie vplyvu žiarenia na zdravie obyvateľov. Ústredie radiačnej monitorovacej siete tvorí skupina pracovníkov Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky, ktorých vymenúva hlavný hygienik Slovenskej republiky a jeho úlohou je koordinácia a zabezpečenie súčinnosti medzi jednotlivými zložkami radiačnej monitorovacej siete. Ústredie radiačnej monitorovacej siete vypracúva plány monitorovania životného prostredia, metodické pokyny a návody na vykonávanie monitorovania, ako aj zabezpečenie plnenia ďalších kompetencií a úloh vyplývajúcich z legislatívy. Pri tvorbe monitorovacích plánov sa vychádza z národných legislatívnych požiadaviek a požiadaviek Európskej komisie. Plány monitorovania sa každoročne aktualizujú, pričom výber a počet monitorovacích miest je zohľadnený okrem iného na základe výsledkov monitorovania z predchádzajúceho obdobia. Z hľadiska ochrany pred vonkajším a vnútorným ožiarением sa vykonáva monitorovanie rádioaktívnych látok aj v rámci zložiek hydrosféry. Medzi monitorované zložky patria zrážková voda, pitná voda, povrchová voda, podzemná úžitková voda a odpadová voda. Na hodnotenie vonkajšieho ožiarenia sa monitoruje prítomnosť rádioaktívnych látok vo vzorkách vodárenského kalu a sedimentov z nádrží, rybníkov a jazier ako aj sedimenty z vodných tokov. Medzi sledované ukazovatele patria objemová, resp. hmotnostná aktivita ^{137}Cs , ^{90}Sr a ^3H . V prípade povrchových vôd sa navyše stanovuje aj celková objemová aktivita beta po odčítaní ^{40}K . Laboratória Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky realizujú plán monitorovania rádioaktivity v zložkách životného prostredia v okolí jadrove-energetických zariadeniach, konkrétne AE Jaslovské Bohunice, AE Mochovce a v okolí Bratislavy, kde v rámci hydrosféry je monitorovaná objemová aktivita ^3H , celková objemová aktivita alfa, celková objemová aktivita beta, objemová aktivita ^{222}Rn , ^{137}Cs , ^{90}Sr . V roku 2023 sa do plánu monitorovania Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky zaviedlo aj stanovenie objemových aktivít ^{241}Am a $^{239,240}\text{Pu}$ vo vybraných vzorkách vôd a sedimentov z okolia jadrove-energetických zariadení na území Slovenskej republiky.

1. Úvod

Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky vykonáva v súlade s § 6 ods. 2 písm. e) zákona č. 87/2018 Z. z. o radiačnej ochrane a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov (ďalej len „zákon č. 87/2018 Z. z.“) [1], monitorovanie radiačnej situácie, zbiera a spracováva údaje o výsledkoch monitorovania v Slovenskej republike na hodnotenie ožiarenia a hodnotenie vplyvu žiarenia na zdravie obyvateľov. V spolupráci s príslušnými

regionálnymi úradmi verejného zdravotníctva, Ministerstvom vnútra Slovenskej republiky, Ministerstvom dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky, Ministerstvom obrany Slovenskej republiky, Ministerstvom životného prostredia Slovenskej republiky, Ministerstvom školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky, Ministerstvom pôdohospodárstva Slovenskej republiky a Ministerstvom hospodárstva Slovenskej republiky vytvára radiačnú monitorovaciu sieť a zabezpečuje a riadi jej činnosť.

Radiačnú monitorovaciu sieť tvorí ústredie radiačnej monitorovacej siete, stále zložky a pohotovostné zložky, ktoré vykonávajú monitorovanie radiačnej situácie a bezodkladne alebo v určených lehotách poskytujú namerané údaje dohodnutým spôsobom a v určenej forme ústrediu radiačnej monitorovacej siete.

Ústredie radiačnej monitorovacej siete vypracúva plány monitorovania životného prostredia, metodické pokyny a návody na vykonávanie monitorovania, ako aj zabezpečenie plnenia ďalších úloh vyplývajúcich z § 2 ods. 2 vyhlášky Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky č. 96/2018 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti o činnosti radiačnej monitorovacej siete [2].

Okrem vnútroštátnych povinností je ústredie radiačnej monitorovacej siete zodpovedné za plnenie úloh vyplývajúcich z medzinárodných dohôd, konkrétne článku 35 Zmluvy Euratom [3], ktorý znie nasledovne: „Each Member State shall establish the facilities necessary to carry out continuous monitoring of the level of radioactivity in the air, water and soil and to ensure compliance with the basic standards. The Commission shall have the right of access to such facilities, it may verify their operation and efficiency.“ [TREATY establishing THE EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY, 1957]. Predmetný článok 35 Zmluvy Euratom vyžaduje, aby každý členský štát Európskej únie (ďalej len „EÚ“) mal vybudované zariadenia, ktoré sú potrebné na realizáciu nepretržitého sledovania úrovne rádioaktívnej kontaminácie vzduchu, vody a pôdy, a zároveň zabezpečil dodržiavanie základných bezpečnostných noriem. Článok 35 zároveň udeľuje Európskej komisii (ďalej len „EK“) právo prístupu k takýmto zariadeniam s cieľom skontrolovať ich prevádzkovú účinnosť. Zároveň článok 36 Zmluvy Euratom ukladá členským štátom EÚ povinnosť pravidelne informovať EK o výsledkoch monitorovania radiačnej situácie. Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky ako kontaktný bod a gestor pre plnenie článkov 35 a 36 Zmluvy Euratom v pravidelných ročných intervaloch a v predpísanom formáte zasiela získané výsledky monitorovania radiačnej situácie na území Slovenskej republiky EK do JRC Ispra v Taliansku.

Medzi pohotovostné zložky radiačnej monitorovacej siete, ktoré monitorujú rádioaktívne látky v zložkách hydrosféry, patrí Laboratórium rádiochémie na Výskumnom ústave vodného hospodárstva. Hlavnou činnosťou Laboratória rádiochémie je stanovenie rádionuklidov vo vodách a zložkách životného prostredia. Laboratórium rádiochémie sa zúčastňuje monitorovania hraničných tokov Slovenska, venuje sa výskumnej činnosti, stanovuje obsah rádionuklidov v pitných, podzemných a povrchových vodách a aktívne spolupracuje s Úradom verejného zdravotníctva Slovenskej republiky v plnení úloh v súlade s legislatívou týkajúcou sa monitorovania zložiek životného prostredia a fungovania radiačnej monitorovacej siete. Ďalšími pohotovostnými zložkami radiačnej monitorovacej siete sú monitorovacie skupiny v Laboratóriu radiačnej kontroly okolia EBO a Laboratóriu radiačnej kontroly okolia EMO, zriadené prevádzkovateľom jadrových zariadení. Výsledky ich monitorovania vykonaného v zmysle schváleného monitorovacieho plánu sa využívajú na hodnotenie dopadov potenciálnej núdzovej situácie na jadrových zariadeniach a zároveň sú k dispozícii aj počas normálnej radiačnej situácie a pre prípad mimoriadnej udalosti spojenej s únikom rádioaktívnej látky do životného prostredia. V rámci monitorovania zložiek životného prostredia vykonávajú analýzy a stanovenia významných antropogénnych rádionuklidov v rôznorodých druhoch

vzoriek od podzemných vôd po povrchové a odpadové vody, vo vybraných vzorkách potravinového reťazca, meranie kontaminácie ovzdušia pomocou aerosólových filtrov až po vzorky spadov zberaných vo vybraných oblastiach. Výsledkami svojich analýz dopĺňajú monitorovacie plány radiačnej monitorovacej siete [4].

2. Monitorovací plán

Plány monitorovania radiačnej situácie na území Slovenskej republiky na hodnotenie a usmerňovanie ožiarenia obyvateľstva sa vypracovávajú tak, aby bolo možné v normálnej radiačnej situácii zabezpečiť systematické a trvalé meranie úrovne rádioaktívnej kontaminácie zložiek životného prostredia, zabezpečiť podklady na systematické hodnotenie a usmerňovanie ožiarenia obyvateľstva a vplyv zdrojov ionizujúceho žiarenia na rádioaktívnu kontamináciu zložiek životného prostredia, zabezpečiť dostupnosť dát o radiačnej situácii v rozsahu a kvalite, ktorú žiadajú príslušné orgány Európskej únie, zistiť dlhodobé trendy a odchýlky, zistiť včas zvýšenie úrovne rádioaktívnej kontaminácie zložiek životného prostredia a potvrdiť vznik udalosti. Plány monitorovania v núdzovej situácii sa navrhujú tak, aby bolo možné overiť, či k núdzovej situácii naozaj došlo.

Štandardne je monitorovací plán tvorený dvomi časťami, a to plánom monitorovania územia Slovenskej republiky, ktorého cieľom je monitorovanie radiačnej situácie na území krajiny za účelom získania podkladov pre hodnotenie ožiarenia obyvateľov a plánom monitorovania rádioaktívnych látok v okolí jadrových zariadení, ktorý sa vykonáva nepretržite za účelom sledovania aktivít vybraných rádionuklidov, ktoré sa dostávajú do životného prostredia za normálnej prevádzky jadrových zariadení, získania dlhodobých časových trendov distribúcie rádionuklidov v životnom prostredí a možnosti včasného zistenia odchýlok od dlhodobých priemerov, vytvorenia databázy výsledkov o rádioaktívnej kontaminácii životného prostredia za dané časové obdobie, ktorá slúži ako podklad pre zhodnotenie vplyvu výpustí z jadrových zariadení na okolité životné prostredie. Stálou a nevyhnutnou súčasťou týchto monitorovacích plánov je monitorovanie rádioaktívnych látok v zložkách hydrosféry. Medzi monitorované zložky patrí pitná voda, povrchová voda, vodárensky kal a sedimenty z vodných tokov.

Medzi dlhodobo sledované rádionuklidy patria ^{137}Cs , ^{90}Sr a ^3H . V prípade niektorých povrchových vôd sa navyše stanovuje aj celková objemová aktivita beta po odčítaní ^{40}K . Laboratória Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky vykonávajú aj monitorovanie zložiek životného prostredia v okolí jadrových zariadení v lokalite Jaslovské Bohunice a Mochovce, a rovnako v okolí Bratislavy, kde sa v zložkách hydrosféry stanovuje okrem vyššie uvedených sledovaných rádionuklidov aj celková objemová aktivita alfa, celková objemová aktivita beta a objemová aktivita ^{222}Rn .

Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky v súlade s § 6 ods. 1 písm. d) bod 3 a písm. n) zákona č. 87/2018 Z. z., vydal metodický pokyn pre monitorovanie a kontrolu rádiologických ukazovateľov v pitnej vode u spotrebiteľa, na základe ktorého odbory radiačnej ochrany regionálne príslušných orgánov radiačnej ochrany vykonávajú stanovovanie hodnôt rádiologických ukazovateľov kvality pitnej vody, v ktorých sa pravidelne stanovuje celková objemová aktivita alfa, celková objemová aktivita beta, ^{222}Rn [5] a v rámci radiačnej monitorovacej siete sa stanovuje objemová aktivita ^{90}Sr , ^{137}Cs a ^3H .

Vo všeobecnosti klesá podiel antropogénnych rádionuklidov vzniknutých pri jadrových výbuchoch a vznikajúcich pri činnostiach jadrových elektrární a prepracovaní vyhoreného jadrového paliva v posledných rokoch. Pri rádioaktívnej kontaminácii biosféry mali rozhodujúcu úlohu okrem jadrových výbuchov aj nehody jadrových elektrární, pri ktorých uniklo do ekosystému množstvo rádionuklidov, z ktorých značná časť sa dostávala do stratosféry a zo stratosféry v dôsledku pomalého spadu kontaminovala aj tie územia,

v ktorých je antropogénna činnosť na minimálnej úrovni. Výsledkom týchto činností je tá skutočnosť, že životné prostredie je kontaminované okrem iného rádioizotopmi uránu (^{238}U , ^{235}U), plutónia (^{239}Pu , ^{240}Pu), americia (^{241}Am), stroncia (^{89}Sr , ^{90}Sr) a cézia (^{137}Cs). Do ľudského organizmu sa rádionuklidy dostávajú potravinovým reťazcom alebo z vody, pričom rádiotoxicita mnohých, hlavne alfa rádionuklidov, je veľmi vysoká. Preto sa v roku 2023 do plánu monitorovania Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky zaviedlo aj stanovenie objemových aktivít ^{241}Am , ^{238}Pu a $^{239,240}\text{Pu}$ vo vybraných vzorkách vôd, sedimentov a vodných rastlín z okolia jadrovej energetických zariadení na území Slovenskej republiky a taktiež sa súčasťou monitorovacieho plánu stalo stanovenie ^{14}C vo vodných rastlinách a izotopov ^{234}U , ^{235}U a ^{238}U .

3. Stanovenie aktivity rádionuklidov v zložkách hydrosféry

Z hľadiska rádiochemickej analýzy, metódy aplikované pri stanovení sledovaných rádionuklidov zahŕňajú celé spektrum rádiochemických a spektrometrických metód. Sledujúci cieľ stanovenia rádionuklidov v zložkách hydrosféry bolo, v období od roku 2018 až po súčasnosť, laboratórium odboru radiačnej ochrany na Úrade verejného zdravotníctva Slovenskej republiky postupne technicky dovybavené novými detekčnými prístrojmi a zariadeniami tak, aby jednoznačne dokázalo zabezpečiť plnenie úloh vyplývajúcich z monitorovacích plánov.

Aktivitu rádionuklidov emitujúcich gama žiarenie v súčasnosti Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky stanovuje na troch nezávislých gamaspektrometrických trasách s polovodičovými detektormi HPGe. Rádionuklidy emitujúce beta častice sú stanovované pomocou kvapalinového spektrometra Quantulus GCT od Canberra Packard a nízkooperačného proporcionálneho detektora FHT 770 so šiestimi pozíciami. V prípade analýzy alfa rádionuklidov je laboratórium vybavené alfaspektrometrickou zostavou Alpha Analyst od Canberra Packard s dvanástimi pozíciami. Je logické, že samotné meracie zariadenia nepostačujú na stanovenie obsahu rádionuklidov, obzvlášť rádionuklidov emitujúcich častice alfa a beta. V prípade týchto rádionuklidov je potrebné komplexne realizovať metódy rádiochemickej analýzy zahŕňajúce aj správnu fyzikálno-chemickú predúpravu vzoriek, ktorých zvládnutie je nevyhnutné pre samotné spektrometrické meranie.

Pracovníci odboru radiačnej ochrany Úradu verejného zdravotníctva Slovenskej republiky neustále monitorujú aj radiačnú situáciu v okolí jadrových zariadení na území Slovenskej republiky. Stanovujú sa rádiologické ukazovatele kvality pitnej vody, ako aj ^{90}Sr , ^{137}Cs a ^3H v pitnej vode odobratej z distribučnej siete v Slovenských elektrárnach, a. s., závod Jaslovské Bohunice a závod Mochovce. Celková objemová aktivita beta, objemová aktivita ^{90}Sr , ^{137}Cs a ^3H sa taktiež každoročne v štvrťročných alebo mesačných intervaloch stanovuje v povrchových a odpadových vodách, rovnako sa aj monitorujú priesaky raz ročne na viacerých miestach odberu v okolí jadrovej elektrárne v Mochovciach a v Jaslovských Bohuniciach prostredníctvom stanovenia objemovej aktivity ^3H . V roku 2023 pracovníci odboru radiačnej ochrany začali monitorovať objemovú aktivitu ^{241}Am , ^{238}Pu a $^{239,240}\text{Pu}$ v odpadových vodách v okolí jadrových elektrární v štvrťročných intervaloch. Gamaspektrometrické metódy majú veľkú nezastupiteľnosť v radiačnej ochrane a špeciálne pri hodnotení mimoriadnych situácií, čo je dané ich univerzálnosťou a možnosťou priameho a rýchleho určovania rádioaktívnych látok prakticky vo všetkých zložkách biosféry. Preto sa monitoruje aj objemová aktivita ^{137}Cs v odpadových vodách ako zmiešaná zlievaná vzorka z areálu jadrových zariadení. Medzi monitorované zložky hydrosféry patria aj vodné sedimenty, vodné rastliny v okolí jadrových elektrární Jaslovské Bohunice a Mochovce, v ktorých sa stanovujú hmotnostné aktivity ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K a ^{241}Am , ^{238}Pu a $^{239,240}\text{Pu}$.

Na stanovenie aktivity rádionuklidov vo vzorkách životného prostredia sú potrebné presné, spoľahlivé a rýchle analytické metódy s nízkym detekčným limitom. Stanovenie aktinoidov vo vzorkách životného prostredia si vyžaduje separáciu každého prvku. Separácia a zakoncentrovanie rádionuklidov zo vzoriek na ďalšie stanovenie je často komplikované z dôvodu prítomnosti rôznych komplexov a matric. Rádiochemická separácia Am a Pu je založená na využití extrakčnej chromatografie s použitím komerčne dostupných sorbentov, a to DGA Resin a TEVA Resin. Aktivita vzoriek je stanovená alfaspektrometricky. Pri stanovení alfa rádionuklidov sa kladie veľký dôraz na prípravu vzoriek na meranie, z tohto dôvodu sa používa metóda spoluzrážania, ktorá predstavuje jednoduchú a nenáročnú techniku.

Stanovenie objemovej aktivity izotopov uránu využíva metódu extrakčnej chromatografie s následnou alfaspektrometrickou analýzou. Ako extrakčný sorbent sa používa komerčne dostupný sorbent UTEVA Resin, na ktorom sa počas rádiochemickej analýzy selektívne naviaže urán z prostredia 1 mol/dm $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ v 1 mol/dm HNO_3 . Metóda umožňuje chemicky odstrániť aktinoidy emitujúce častice alfa s energiami veľmi podobnými izotopom uránu, ktoré sú nerozlíšiteľné pri alfaspektrometrickom stanovení. Na stanovenie chemických výťažkov sa používa stopovací rádionuklid ^{232}U .

Aktivita ^{90}Sr vo vzorke sa stanovuje prostredníctvom ^{90}Y pomocou kvapalinovej extrakcie s tributylfosfátom, pričom sa využíva rádioaktívna rovnováha ^{90}Sr s ^{90}Y , ktorý je jeho dcérskym produktom. Rádionuklid ^{90}Y sa oddelí od ^{90}Sr kvapalinovou extrakciou s tributylfosfátom, ktorý je spätne extrahovaný z organickej fázy deionizovanou vodou, vyzrážaný ako šŕaveľan yttritý a meraný na nízkopozad'ovom proporcionálnom detektore.

Stanovenie aktivity ^{14}C sa realizuje len vo vzorkách biologického materiálu, v prípade hydrosféry ide o vodné rastliny a vodný sediment. Samotná metóda je založená na termickom rozklade vzorky pri teplote 600 °C a záchyte uvoľneného CO_2 v plynnej forme v extrakčnom činidle Carbosorb E. Následne po pridaní scintilačného roztoku Permafluor E je aktivita uhlíka stanovená pomocou kvapalinovej scintilačnej spektrometrie.

4. Záver

Na základe dlhodobého sledovania obsahu rádionuklidov vo vzorkách vôd a sedimentov môžeme skonštatovať, že v sledovanom období neboli zaznamenané odchýlky, na základe ktorých by bolo možné vyhodnotiť situáciu za nebezpečnú. Analyzované vzorky pitných vôd spĺňajú kritéria kladené na tento typ vôd a nepredstavujú žiadne riziko. Dosiahnuté výsledky stanovenia aktivít významných rádionuklidov deklarujú, že situácia s uvoľňovaním kvapalných rádioaktívnych látok z jadrových zariadení má stabilný charakter a nebola prekročená žiadna zo stanovených referenčných úrovní.

Vzhľadom na zvýšený záujem verejnosti, ktorý zaznamenáva Ústredie radiačnej monitorovacej siete v ostatnom období vo vzťahu ku hodnotám aktivity rádionuklidov v jednotlivých zložkách životného prostredia a potravinového reťazca, ktoré sú získavané vykonávaním monitorovania radiačnej situácie na území Slovenskej republiky jednotlivými zložkami radiačnej monitorovacej siete, ako aj k anomáliám vyskytujúcim sa v životnom prostredí, je nevyhnutné aj v nasledujúcich rokoch pokračovať v monitorovaní radiačnej situácie na území Slovenskej republiky. Cieľom je zabezpečiť systematické a trvalé meranie úrovne rádioaktívnej kontaminácie zložiek životného prostredia a zabezpečiť podklady na systematické hodnotenie a usmerňovanie ožiarovania obyvateľstva a vplyv zdrojov ionizujúceho žiarenia na rádioaktívnu kontamináciu zložiek životného prostredia a informovať verejnosť o nameraných hodnotách, ich variabilite a vplyve na zdravie obyvateľstva [4].

Literatúra

- [1] Zákon č. 87/2018 Z. z., o radiačnej ochrane a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov.
- [2] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky č. 96/2018 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti o činnosti radiačnej monitorovacej siete.
- [3] Generálny sekretariát Rady, 2016. Zmluva o Euroatome. Konsolidované znenie. Luxemburg: Úrad pre vydávanie publikácií Európskej únie, 2016. ISBN 978-92-824-5125-0.
- [4] Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky, 2023. Výročná správa o radiačnej situácii na území Slovenskej republiky a o ožiarení obyvateľstva za rok 2022. Číslo materiálu:UV-20389/2023. Dostupné on-line: <https://rokovania.gov.sk/RVL/Material/28443/1>
- [5] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky č. 45/2024 Z. z., o obmedzovaní ožiarenia obyvateľov z pitnej vody a z vody vhodnej na prípravu stravy pre dojčatá.

MONITORING OF HYDROSPHERE COMPONENTS WITHIN THE RADIATION MONITORING NETWORK

Keywords: hydrosphere, parametric value, monitoring, radiological water quality parameters

The Public Health Authority of the Slovak Republic fulfills the function of the headquarters of the radiation monitoring network and also carries out monitoring of the radiation situation, collects and processes data on monitoring results in the Slovak Republic for the assessment of external radiation and the assessment of the impact of radiation on the health of the population. The headquarters of the radiation monitoring network comprises employees of the Public Health Authority of the Slovak Republic, appointed by the Chief Hygienist of the Slovak Republic. Their task is to coordinate and ensure cooperation among the various components of the radiation monitoring network. They also develop environmental monitoring plans, methodological guidelines, and instructions for monitoring implementation, and ensure compliance with legislative requirements. The creation of monitoring plans is based on national legislative requirements and the requirements of the European Commission. Monitoring plans are updated annually, with the selection and number of monitoring sites based on previous monitoring results. In terms of protection against external and internal radiation monitoring of radioactive substances in the hydrosphere is also carried out. Monitored components include rainwater, drinking water, surface water, groundwater, and wastewater. The presence of radioactive substances in samples of waterworks sludge and sediments from reservoirs, ponds, and lakes, as well as sediments from watercourses, is monitored for the assessment of external radiation. Monitored indicators include volume or mass activity of ^{137}Cs , ^{90}Sr , and ^3H . In the case of surface waters, the total volume activity of beta radiation after subtraction of ^{40}K is also determined. The laboratories of the Public Health Authority of the Slovak Republic implement a plan for monitoring radioactivity in environmental components in the vicinity of nuclear power facilities NPP Jaslovské Bohunice and NPP Mochovce and in the vicinity of Bratislava, where the volume activity of ^3H , total alpha activity, total beta activity, volume activity of ^{222}Rn , ^{137}Cs , ^{90}Sr is monitored within the hydrosphere. In 2023, the monitoring plan of the Public Health Authority of the Slovak Republic also introduced the determination of volume activities of ^{241}Am and $^{239,240}\text{Pu}$ in selected water and sediment samples from the vicinity of nuclear power facilities in the territory of the Slovak Republic.

TRITIUM VE VODÁCH, NOVELA ATOMOVÉHO ZÁKONA A VYHLÁŠEK STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST

Milan Hort

Státní úřad pro jadernou bezpečnost

e-mail: milan.hort@sujb.cz

Klíčová slova: atomový zákon, tritium, pitná voda, monitorování radiační situace

Abstrakt

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., v příloze č. 3 odkazuje na vyhlášku č. 422/2016 Sb., pro hodnocení, zda povrchová voda vyhovuje užívání pro úpravu na vodu pitnou. Podobně odkazuje na tuto vyhlášku i vyhláška č. 252/2004 Sb., v § 3 ohledně stanovení radiologických ukazatelů pitné vody a jejich limitů. Platné znění vyhlášky č. 422/2016 Sb., však nic takového neobsahuje. Probíhající novela atomové legislativy tento nedostatek napravuje.

Prezentace shrnuje navrženou úpravu vyhlášky č. 422/2016 Sb., týkající se tritia a obecně umělých radionuklidů ve vodách. Dále seznamuje s úpravou v oblasti monitorování radiační situace – upřesněním povinností zainteresovaných osob a požadavků na monitorování jednotlivých položek ve vyhlášce č. 360/2016 Sb.

1. Úvod

Tento příspěvek popisuje návrh novely vyhlášky č. 422/2016 Sb., v části týkající se tritia a obecně umělých radionuklidů v povrchových vodách a v pitné vodě. Dále seznamuje s úpravou v oblasti monitorování radiační situace – upřesněním povinností zainteresovaných osob a požadavků na monitorování jednotlivých položek ve vyhlášce č. 360/2016 Sb.

2. Povrchová voda

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. [1], v příloze č. 3 odkazuje pro hodnocení, zda povrchová voda vyhovuje užívání pro úpravu na vodu pitnou, na vyhlášku č. 422/2016 Sb. [2]. V této vyhlášce platné od roku 2017 to však není nijak ošetřeno.

V připravované novele § 74 vyhlášky č. 422/2016 Sb., jsou rozpracovány hodnoty uvedené v nařízení vlády č. 401/2015 Sb., do požadavků na monitorování povrchových vod potenciálními znečišťovateli radioaktivními látkami. Nové odstavce § 74 vyhlášky č. 422/2016 Sb., využívají zmocnění § 81 odst. 3 písm. a) až c) atomového zákona [3] a doplňují obecná pravidla monitorování povrchových vod uvedená v § 74 odst. 1–4. Doplněné minimální požadavky jsou specifikovány pro jednotlivé skupiny potenciálních znečišťovatelů. Odst. 5 určuje místa monitorování, odst. 6 upřesňuje rozsah monitorování pro specifikovaná pracoviště – které radionuklidy, kde a jak často. Odst. 7 a 8 pak stanoví pravidla pro stanovení monitorovacích úrovní a postupů při jejich překročení. Je navrženo znění (pozn.: v dalším textu je podtržením označen text nově vložený do právního předpisu, přeškrtnutím text vypuštěný):

(5) Pokud jsou z pracoviště uvolňovány kapalné radioaktivní látky do povrchových vod, musí monitorování zahrnout jak povrchové vody výpustí neovlivněné, tak ovlivněné nebo potenciálně ovlivněné. Odběrová místa povrchových vod se stanovují

- a) ve vodách neovlivněných výpustí ve vodním toku nad výpustí; při vypouštění do vodní nádrže ve vodním toku nad vzdutím hladiny v nádrži,
- b) ve vodách ovlivněných nebo potenciálně ovlivněných výpustí
 - 1. v místech, kde je možno předpokládat dostatečné promísení výpustí v toku, tj. v dostatečné vzdálenosti pod výpustí; při vypouštění do nádrže zpravidla pod výtokem z nádrže,
 - 2. v případě výpustí z pracoviště s energetickým jaderným zařízením navíc v ochranném pásmu vodního zdroje v každém místě odběru vody pro úpravu na vodu pitnou, pokud se takové místo nachází do vzdálenosti 30 říčních kilometrů pod výpustí, nebo v nejbližším níže položeném místě odběru vody pro úpravu na vodu pitnou.

(6) Monitorování povrchových vod, do nichž jsou uvolňovány radioaktivní látky, musí zahrnovat všechny uvolňované radionuklidy, které se nezanedbatelně podílejí na ozáření obyvatelstva, a to

- a) v případě výpustí z pracoviště s energetickým jaderným zařízením
 - 1. ve vodách neovlivněných výpustí ve vodním toku nad výpustí alespoň tritium a radionuklidy emitující záření gama s čtvrtletní četností,
 - 2. ve vodách ovlivněných nebo potenciálně ovlivněných výpustí alespoň tritium a radionuklidy emitující záření gama s měsíční četností, ⁹⁰Sr s roční četností,
- b) v případě výpustí z pracoviště souvisejícího se získáváním radioaktivního nerostu s měsíční četností,
- c) v případě výpustí z jiného pracoviště alespoň jedenkrát ročně operativně při vypouštění nebo nejpozději do 24 hodin po ukončení výpustí.

(7) Vyšetřovací úroveň ve vodách ovlivněných nebo potenciálně ovlivněných výpustí musí být stanovena podle vypouštěných radionuklidů

- a) v případě výpustí z pracoviště s energetickým jaderným zařízením
 - 1. pro tritium ve výši 100 Bq/l; při jejím překročení se musí vyhodnotit, zda nebyly porušeny postupy pro vypouštění a zda nebyla překročena vyšetřovací úroveň pro ¹³⁷Cs,
 - 2. pro ¹³⁷Cs ve výši 0,5 Bq/l; při jejím překročení v místě odběru vody pro úpravu na vodu pitnou musí být o výsledcích stanovení objemové aktivity umělých radionuklidů informován odběratel vody pro úpravu na vodu pitnou,
- b) v případě výpustí z pracoviště souvisejícího se získáváním radioaktivního nerostu pro U_{nat.} ve výši 0,3 mg/l, pro ²²⁶Ra ve výši 0,4 Bq/l; při překročení vyšetřovací úrovně musí být provedeno šetření příčin a případně stanoveno preventivní opatření,
- c) v případě výpustí z jiného pracoviště ve výši jedné desetiny uvolňovací úrovně podle § 104 odst. 1 písm. b); při překročení vyšetřovací úrovně musí být provedeno šetření příčin a případně stanoveno preventivní opatření.

(8) Zásahová úroveň ve vodách ovlivněných nebo potenciálně ovlivněných výpustí z pracoviště s energetickým jaderným zařízením musí být stanovena pro tritium ve výši 1 000 Bq/l; při jejím překročení v místě odběru vody pro úpravu na vodu pitnou se musí vyhodnotit, zda nebyly porušeny postupy pro vypouštění, a případně stanovit nápravná nebo preventivní opatření s cílem nepřekročit roční průměrnou hodnotu objemové aktivity tritia 1 000 Bq/l a nejvyšší přípustnou hodnotu objemové aktivity tritia 3 500 Bq/l.

3. Pitná voda

Na vyhlášku č. 422/2016 Sb. odkazuje i vyhláška č. 252/2004 Sb. [4], v § 3 ohledně stanovení radiologických ukazatelů pitné vody a jejich limitů. Vyhláška č. 422/2016 Sb., však opět nic takového neobsahuje. Podmínky pro její doplnění vytvořila úprava § 100 atomového zákona. K radonu bylo doplněno tritium a odkazy na přírodní radionuklidy ve vodě byly vypuštěním slova „přírodní“ zobecněny i na umělé radionuklidy.

Toto zobecnění a doplnění bylo použito i ve vyhlášce č. 422/2016 Sb., kde nadpis § 98–101 nově zní: Ochrana před radionuklidy ve vodě. Kromě těchto obecných úprav v dotčených paragrafech (tj. doplnění tritia a zobecnění požadavků na všechny radionuklidy) byl upřesněn text týkající se pouze přírodních radionuklidů a byly přidány odstavce týkající se jen umělých radionuklidů. Přitom Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále jen „Úřad“) vycházel z požadavků směrnice Rady 2013/51/EURATOM [5], kterou se stanoví požadavky na ochranu zdraví obyvatelstva, pokud jde o radioaktivní látky ve vodě určené k lidské spotřebě. Navržené znění vyhlášky je tak plnou transpozicí této směrnice.

Základní požadavky na obsah radionuklidů v pitné vodě stanovuje § 100 atomového zákona:

(1) Pitná voda nesmí být dodávána pro veřejnou potřebu a balená voda nesmí být dodávána na trh v České republice, pokud

- a) objemová aktivita radonu nebo tritia překročí nejvyšší přípustnou hodnotu, nebo
- b) obsah ~~přírodních~~ radionuklidů překročí referenční úroveň a nebylo provedeno opatření, které snižuje míru ozáření na úroveň tak nízkou, jaké lze rozumně dosáhnout při zohlednění všech hospodářských a společenských hledisek.

(2) Osoba povinná zajistit, aby dodávaná pitná voda měla jakost pitné vody podle zákona o ochraně veřejného zdraví (dále jen „dodavatel vody“) a výrobce a dovozce balené vody jsou povinni

- a) zajistit systematické měření a hodnocení obsahu ~~přírodních~~ radionuklidů ve vodě,
- b) vést evidenci výsledků měření obsahu ~~přírodních~~ radionuklidů ve vodě a dalších údajů a oznamovat je Úřadu,
- c) v případě překročení nejvyšší přípustné hodnoty objemové aktivity radonu nebo tritia provést opatření, která snižují jejich objemovou aktivitu ~~radonu~~ pod tuto hodnotu,
- d) v případě překročení referenční úrovně obsahu ~~přírodních~~ radionuklidů provést opatření, která snižují míru ozáření na úroveň tak nízkou, jaké lze rozumně dosáhnout při zohlednění všech hospodářských a společenských hledisek, a
- e) v případě překročení referenční úrovně poskytnout veřejnosti informace o výsledcích měření, o efektivní dávce z vody a s ní spojeném riziku a o provedeném opatření, které snižuje míru ozáření.

Do § 98 vyhlášky č. 422/2016 Sb., byl doplněn nový odstavec (4a) a další odstavce § 98 byly upraveny:

(4a) Systematické měření a hodnocení obsahu umělých radionuklidů ve vodě musí být prováděno, byla-li pro výrobu pitné vody použita voda z povrchového nebo podzemního vodního zdroje ovlivněného výpustí z pracoviště s energetickým jaderným zařízením.

(6) V rámci systematického měření a hodnocení obsahu ~~přírodních~~ radionuklidů ve vodě musí být provedeno stanovení indikativní dávky, dojde-li k překročení vyšetřovací úrovně

celkové objemové aktivity alfa, celkové objemové aktivity beta nebo vyšetřovací úrovně objemové aktivity ^{137}Cs . Vyšetřovací úrovně stanoví příloha č. 27 k této vyhlášce.

(7) Stanovení indikativní dávky podle odstavce 6 musí být v případě přírodních radionuklidů provedeno s využitím výsledků doplňujícího rozboru. Postup doplňujícího rozboru stanoví příloha č. 27 k této vyhlášce.

Do § 99 byl doplněn nový odstavec transponující směrnici Rady 2013/51/EURATOM:

(7) Pokud je ve vodě zjištěno překročení ukazatele objemové aktivity tritia 100 Bq/l, musí být provedeno měření objemové aktivity radionuklidů emitujících záření gama.

Do přílohy č. 27 vyhlášky č. 422/2016 Sb., byly doplněny hodnoty pro systematické hodnocení obsahu umělých radionuklidů v pitné vodě:

- nejvyšší přípustná objemová aktivita tritia 3 500 Bq/l,
- referenční úroveň objemové aktivity tritia 1 000 Bq/l,
- vyšetřovací úroveň objemové aktivity ^{137}Cs 0,5 Bq/l,

a pro shrnutí postupu text:

Způsob a rozsah systematického měření a hodnocení obsahu umělých radionuklidů ve vodě

- a) objemová aktivita tritia,
- b) objemová aktivita radionuklidů emitujících záření gama, pokud objemová aktivita tritia převýší hodnotu ukazatele 100 Bq/l,
- c) indikativní dávka, pokud objemová aktivita ^{137}Cs převýší vyšetřovací úroveň.

Navržené hodnoty korespondují s hodnotami uvedenými v nařízení vlády č. 401/2015 Sb., pro hodnocení, zda povrchová voda vyhovuje užívání pro úpravu na vodu pitnou.

Pro informaci lze uvést, že celoroční každodenní konzumace 2 l vody o objemové aktivitě tritia 100 Bq/l způsobí úvazek efektivní dávky 1,3 μSv , vody o objemové aktivitě ^{137}Cs 0,5 Bq/l úvazek efektivní dávky 4,75 μSv . Obecný limit ozáření obyvatele ze všech povolených a registrovaných činností pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření je 1 mSv za jeden kalendářní rok. Uvádí se, že přírodní zdroje záření způsobí roční dávku kolem 3 mSv.

4. Monitorování radiační situace – novela vyhlášky č. 360/2016 Sb.

Podle § 208 atomového zákona Úřad mj.:

- f) sleduje a posuzuje stav ozáření a reguluje ozáření fyzických osob včetně ozáření z přírodního zdroje záření a zpracovává ve spolupráci s dotčenými správními úřady národní plány k řešení situací a informování o nich

a podle § 209 atomového zákona:

- b) řídí a provádí monitorování radiační situace na území České republiky podle § 149, včetně porovnávacího měření organizovaného Evropskou komisí, hodnotí jeho výsledky a oznamuje data z monitorování radiační situace Evropské komisi [6].

Úřad je tedy zodpovědný za hodnocení ozáření obyvatel České republiky. K tomuto účelu provozuje ve svém datovém středisku jednotnou celostátní databázi hodnot naměřených v rámci monitorování radiační situace na území státu (MonRaS). Úřad zajišťuje monitorování radiační situace na území republiky v působnosti svého resortu.

Pro plnění výše uvedených úkolů však Úřad potřebuje všechna data z monitorování radiační situace na území České republiky. Dosud tomu tak není – existují data, která nejsou zahrnuta v databázi MonRaS. Je nezbytné, aby v ní byly soustředěny **všechny výsledky monitorování** prováděného všemi osobami podle § 149 odst. 2 atomového zákona, tedy i správními orgány (ministerstvy) včetně jim podřízených a jimi zřizovaných organizací.

S některými organizacemi provádějícími monitorování v rámci jiných resortů má Úřad uzavřeny dohody, na jejichž základě jsou mu předávány výsledky monitorování, obvykle za úhradu. Některé organizace (např. SVÚ) předávají jen výsledky těch měření, která má Úřad zajištěny dohodou a za která platí; výsledky jiných měření nedostává. Jiné organizace monitorují, ale výsledky Úřadu nepředávají (např. státní podniky Povodí).

Novela atomového zákona upřesňuje v § 149 odst. 6 písm. a) zmocnění:

(6) Prováděcí právní předpis stanoví

- a) podrobné požadavky na formu a způsob monitorování radiační situace a rozsah provádění monitorování správními orgány.

V novele vyhlášky č. 360/2016 Sb. [7], bylo navrženo upřesnění požadavků na předávání dat z monitorování v § 11 odst. 1:

(1) Osoby podle § 149 odst. 2 atomového zákona musí předat data z monitorování všech jimi monitorovaných položek datovému středisku Úřadu neprodleně po jejich získání, dálkovým přístupem v datovém formátu, který musí splňovat požadavky souboru technických opatření (dále jen „datové rozhraní“) uvedeného v národním programu monitorování. Předávaná data musí obsahovat kromě výsledků měření také datum, časové a zeměpisné údaje.

K cíli zahrnout všechny výsledky monitorování do databáze MonRaS vedou i úpravy tabulky č. 2 přílohy č. 3 vyhlášky č. 360/2016 Sb., kde jsou nově uvedeny minimální počty měření jednotlivých položek zajišťované jednotlivými správními orgány podle § 149 odst. 2 atomového zákona.

Úřad postupně uzavře s jednotlivými organizacemi provádějícími monitorování nové dohody, které budou odrážet nové požadavky. Předpokládá se, že pro zvýšení transparentnosti systému bude vlastní monitorování jednotlivých položek včetně financování plně zajištěno jednotlivými správními orgány, resp. organizacemi provádějícími monitorování. Tyto organizace pak budou předávat Úřadu do databáze MonRaS veškeré výsledky monitorování.

5. Závěr

Článek popisuje návrh úpravy vyhlášky č. 422/2016 Sb., v části týkající se tritia a obecně umělých radionuklidů v povrchových vodách a v pitné vodě. Dále seznamuje s úpravou v oblasti monitorování radiační situace – upřesněním povinností zainteresovaných osob a požadavků na monitorování jednotlivých položek ve vyhlášce č. 360/2016 Sb. Je vhodné poznamenat, že ke konci dubna 2024, kdy byl tento článek napsán, jsou popsány změny ve stadiu návrhu, který může být ještě upraven. Předpokládá se, že novela atomové legislativy vstoupí v platnost dne 1. ledna 2025.

Literatura

- [1] Nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech.
- [2] Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.
- [3] Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon.
- [4] Vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody.
- [5] Směrnice Rady 2013/51/EURATOM, ze dne 22. října 2013, kterou se stanoví požadavky na ochranu zdraví obyvatelstva, pokud jde o radioaktivní látky ve vodě určené k lidské spotřebě.
- [6] Doporučení Komise 2000/473/Euratom ze dne 8. června 2000 o uplatňování článku 36 Smlouvy o založení Euratomu týkající se monitorování úrovní radioaktivity v životním prostředí pro účely hodnocení ozáření obyvatelstva jako celku.
- [7] Vyhláška č. 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace.

TRITIUM IN WATER, AMENDMENT OF THE ATOMIC ACT AND THE STATE OFFICE FOR NUCLEAR SAFETY DECREES

Keywords: atomic act, tritium, drinking water, radiation situation monitoring

Government Regulation No. 401/2015 Coll. in Annex 3 refers to Decree No. 422/2016 Coll. for the assessment whether surface water is suitable for drinking water production. Similarly, Decree No. 252/2004 Coll. in Article 3 refers to Decree No. 422/2016 Coll. regarding the determination of radiological indicators of drinking water and their limits. However, the current version of Decree No 422/2016 Coll. does not contain any such provisions. The ongoing amendment to the atomic legislation corrects this shortcoming.

This presentation summarises the proposed amendment to Decree No 422/2016 Coll. concerning tritium and artificial radionuclides in water in general. It also introduces the modification in the area of radiation situation monitoring – specifying the obligations of the persons involved and the requirements for monitoring individual items in Decree No 360/2016 Coll.

PŘIPRAVOVANÉ ZMĚNY ATOMOVÉHO ZÁKONA PRO OBLAST DODÁVÁNÍ A ÚPRAVY PITNÉ VODY Z PODZEMNÍHO ZDROJE

Marcela Velkoborská

*Státní úřad pro jadernou bezpečnost
e-mail: marcela.velkoborska@sujb.cz*

Klíčová slova: atomový zákon, vyhláška o radiační ochraně, pitná voda z podzemního zdroje, pracoviště s možným zvýšeným ozářením z radonu, pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření, Národní radonová databáze

Abstrakt

Příspěvek se zaměřuje na navrhované změny atomového zákona a jeho prováděcí vyhlášky (vyhláška o radiační ochraně) pro oblast dodávání pitné vody pro veřejnou potřebu a pro oblast pracovišť, kde je voda z podzemních zdrojů upravována změnou vlastností anebo kde je s vodou z podzemního zdroje čerpáním či jiným obdobným způsobem nakládáno. Novelu atomového zákona a vyhlášky o radiační ochraně vejdu v účinnost 1. ledna 2025.

Příspěvek se bude dále věnovat novému způsobu oznamování údajů souvisejících s problematikou úpravy pitné vody z podzemních zdrojů a s pracovišti, kde je s podzemní vodou nakládáno, Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost. Oznamování údajů bude od 1. ledna 2025 prováděno v souladu s novelizovanou vyhláškou o radiační ochraně prostřednictvím Národní radonové databáze.

1. Úvod

Dne 1. ledna 2025 nabude účinnosti novela atomového zákona (zákon č. 263/2016 Sb.) a novela jeho prováděcí vyhlášky o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje (vyhláška č. 422/2016 Sb.).

Nové legislativní požadavky se budou týkat také oblasti přírodních zdrojů ionizujícího záření, tudíž i problematiky úpravy a dodávání pitné vody z podzemních zdrojů. Změny ovlivní dodavatele vody a provozovatele pracovišť, kde je nakládáno s vodou z podzemních zdrojů (úpravny vody, vodojemy, čerpací stanice apod.). Jde tedy o pracoviště s možným zvýšeným ozářením z radonu a pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření (tj. pracoviště, kde je nakládáno s materiálem se zvýšeným obsahem přírodního radionuklidu, např. s odpadní vodou, kaly, nasycenými filtračními náplněmi apod.).

2. Četnost zasílání údajů Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost

Ke změně dochází v četnosti zasílání údajů, které musí dodavatelé vody Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (dále Úřad) oznamovat. V současné době je povinnost oznamovat údaje stanovena v § 100 odst. 4 vyhlášky. Údaje je třeba ohlásit poprvé před zahájením dodávání pitné vody pro veřejnou potřebu z podzemního zdroje nebo před zahájením dodávání balené vody z podzemního zdroje na trh a poté v každém kalendářním roce.

Novelou vyhlášky dochází ke snížení četnosti oznamování údajů Úřadu, dodavatel vody bude povinen údaje oznámit poprvé před zahájením dodávání pitné vody nebo balené vody na trh a dále již jen v případě změny v evidovaném údaji (např. po zprovoznění jiného zdroje vody, při změně technologie na úpravu vody apod.).

3. Optimalizace radiační ochrany při dodávání pitné vody pro veřejnou potřebu z podzemních zdrojů

V současné době § 101 vyhlášky ukládá dodavateli vody v případě překročení nejvyšší přípustné hodnoty objemové aktivity radonu 300 Bq/l a referenční úrovně indikativní dávky 0,1 mSv/rok povinnost provést opatření vedoucí ke snížení objemové aktivity radonu a ke snížení míry ozáření. Těmito opatřeními jsou zejména výběr jiného zdroje vody a instalace zařízení ke snížení obsahu přírodního radionuklidu.

Novela vyhlášky připouští i možnost mísení vody z několika zdrojů (např. v případě nedostatečné vydatnosti nového kvalitnějšího zdroje vody apod.).

4. Pracoviště s možným zvýšeným ozářením z radonu (dále pracoviště s radonem):

Dle § 93 vyhlášky je na pracovišti s radonem, na němž bylo zjištěno překročení referenční úrovně 300 Bq/m³ pro průměrnou objemovou aktivitu radonu při době pobytu pracovníka na pracovišti v délce 2 000 hodin za 12 měsíců, povinnost provést opakované měření a na základě stanovení efektivní dávky posoudit, zda může být u některého pracovníka překročena hodnota efektivní dávky 6 mSv za 12 měsíců.

Nově bude na pracovišti s radonem, na kterém bylo prvním měřením zjištěno překročení referenční úrovně objemové aktivity radonu 300 Bq/m³, povinnost nejdříve provést optimalizaci radiační ochrany (stavebně technická opatření, řízená výměna vzduchu, změna organizace nebo režimu práce) a teprve poté provést měření po optimalizaci za účelem stanovení efektivní dávky pracovníka.

V rámci optimalizace musí být zpracovány optimalizační analýza, návrh řešení a výběr opatření ke snížení koncentrace radonu nebo příkonu prostorového dávkového ekvivalentu (dále PPDE). Opatření k provedení optimalizace musí zajistit snížení koncentrace radonu a PPDE, musí být v dané stavbě realizovatelná a nemohou zhoršit stavebně technický stav stavby.

5. Pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření (dále pracoviště s PZZ):

Dle aktuálního znění § 88 odst. 3 vyhlášky na pracovišti s PZZ, kde je zjištěno překročení objemové aktivity radonu 300 Bq/m³ při výkonu práce nebo je překročena hodnota 1 mSv za rok pro efektivní dávku, která nezahrnuje dávku z přírodního pozadí a z ozáření radonem a z produktů jeho přeměny, musí být na základě opakovaného měření a doby pobytu na pracovišti stanoveny osobní dávky pracovníka.

Dle § 88 odst. 5 vyhlášky, v případě, že na pracovišti mohou být překročeny hodnoty 6 mSv/rok pro efektivní dávku pracovníka nebo 1/3 limitů stanovené ekvivalentní dávky pro oční čočku, kůži, ruce od prstů po předloktí, musí být osobní dávky určovány opakovaně v každém kalendářním roce.

Dle nové legislativy bude na pracovišti s PZZ, na němž bylo zjištěno překročení úrovně 300 Bq/m³ pro průměrnou objemovou aktivitu radonu nebo 1 mSv/rok pro efektivní dávku, která nezahrnuje dávku z přírodního pozadí a z ozáření radonem, povinnost provést nejdříve optimalizaci radiační ochrany a teprve poté provést měření po optimalizaci.

Optimalizační opatření spočívají zejména ve změně používaných surovin, technologie a způsobu nebo režimu práce. Dalším optimalizačním opatřením je úprava pracoviště s PZZ včetně úpravy ventilace.

Pokud po provedení optimalizace radiační ochrany může na pracovišti s PZZ ozáření pracovníka překročit efektivní dávku 6 mSv za rok, musejí být osobní dávky pracovníka na pracovišti určovány opakovaně v každém kalendářním roce.

6. Uvolňování radioaktivní látky z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního záření

Změna se týká i četnosti měření obsahu přírodních radionuklidů v oblasti uvolňování radioaktivní látky z pracoviště s PZZ. Současné znění § 91 odst. 2 vyhlášky stanovuje povinnost provést měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s PZZ poprvé při zahájení provozu tohoto pracoviště a poté při změně, která by mohla ovlivnit obsah radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště, nejméně jednou za 12 měsíců.

V novém znění vyhlášky zůstává výše uvedená povinnost, nově však přibyla možnost, pokud výsledky měření v pěti po sobě jdoucích letech nepřekročí stanovené uvolňovací úroveň, měření a hodnocení musí být dále prováděno alespoň jedenkrát za pět let nebo dojde-li ke změně, která by mohla ovlivnit obsah radionuklidů v uvolňované radioaktivní látce (např. ke změně technologie úpravy vody, zprovoznění jiného zdroje podzemní vody apod.).

7. Oznamování údajů Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost

Zásadní změna nastává ve způsobu oznamování údajů Úřadu. V současné době jsou veškeré údaje o vodovodech, pracovištích s radonem i o pracovištích s PZZ oznamovány na evidenčních listech zasílaných společně s výsledky měření buď v listinné podobě, e-mailem, nebo datovými schránkami.

Nyní dochází k digitalizaci státní správy a Úřad se musel této skutečnosti přizpůsobit. Nově budou v souladu s novelou vyhlášky všechny povinné údaje Úřadu oznamovány prostřednictvím portálu *ireg SÚJB Národní radonová databáze*. Národní radonová databáze (dále jen „NRD“) umožní dálkový přístup do evidence Úřadu.

V souladu s novelou vyhlášky bude evidované údaje o vodovodech a výsledky měření přírodních radionuklidů v pitné vodě prostřednictvím NRD oznamovat úřadu dodavatel vody. Evidované údaje o pracovišti s radonem bude prostřednictvím NRD oznamovat provozovatel pracoviště.

Výsledky stanovení osobních dávek pracovníka na pracovišti s radonem bude prostřednictvím NRD oznamovat držitel povolení ke stanovení osobních dávek na pracovišti s radonem.

Evidované údaje o pracovišti s PZZ bude prostřednictvím NRD oznamovat provozovatel pracoviště.

Výsledky stanovení osobních dávek pracovníka bude prostřednictvím NRD oznamovat držitel povolení ke stanovení osobních dávek na pracovišti s PZZ.

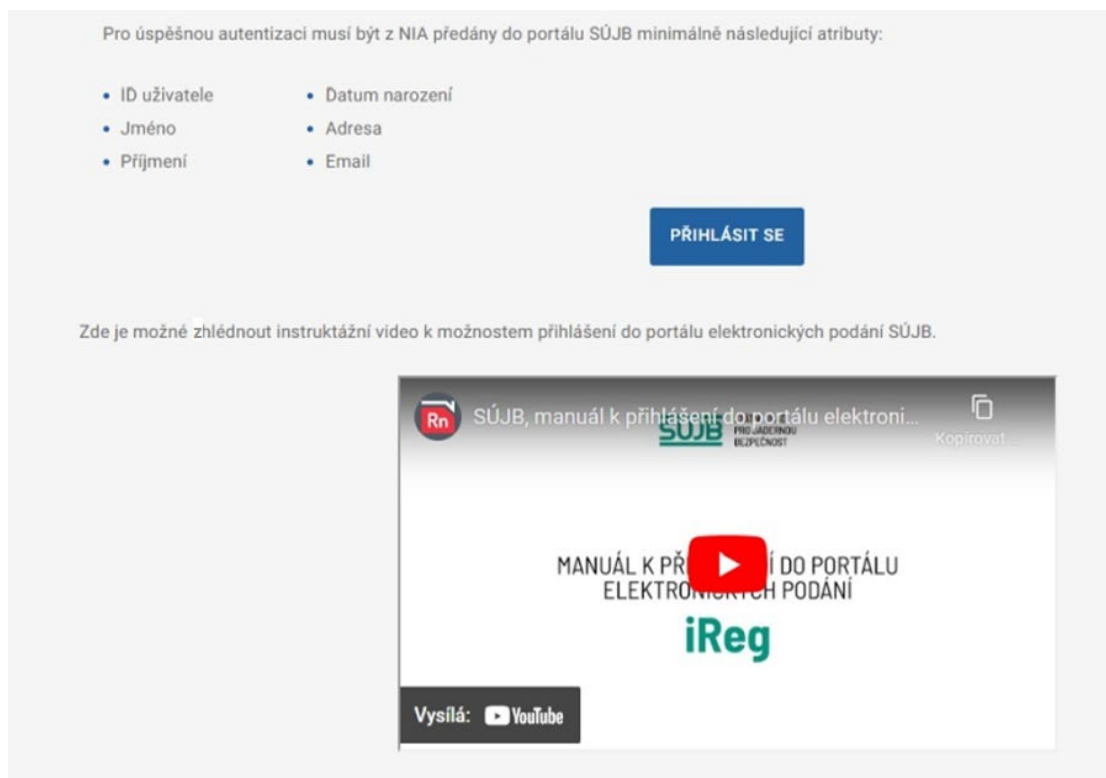
Výsledky měření obsahu přírodních radionuklidů v uvolňované radioaktivní látce z pracoviště bude oznamovat prostřednictvím NRD držitel povolení k měření uvolňované radioaktivní látky z pracoviště s PZZ.

Do NRD bude údaje povinného subjektu vkládat autorizovaná osoba. Půjde o fyzickou osobu, která má zmocnění jednat, oznamovat úřadu evidované údaje a výsledky měření za konkrétní subjekt. Tato osoba bude autorizována úřadem na základě žádosti o autorizaci a po ověření, že jde o osobu oprávněnou za subjekt jednat.

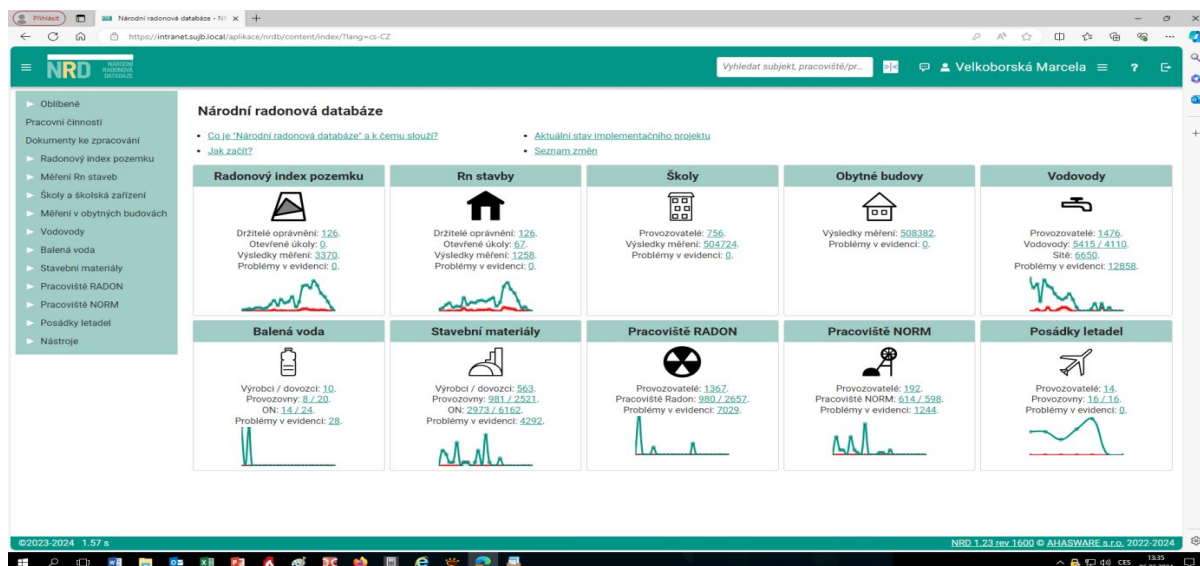
Do ireg portálu SÚJB se jde již dnes přihlásit na adrese ***sujb.gov.cz*** kliknutím na možnost „elektronická podání“ (označeno šipkou na *obr. 1*). Poté se zobrazí stránka, na níž je možné si prohlédnout instruktážní video – manuál k přihlášení do portálu elektronických podání (*obr. 2*). Do ireg portálu SÚJB se lze také přihlásit rovnou prostřednictvím identity občana (např. bankovní identita, eObčanka).



Obr. 1. Stránka ***sujb.gov.cz*** s možností elektronických podání



Obr. 2. Možnost zhlédnutí instruktážního videa



Obr. 3. Národní radonová databáze

Na následující webové adrese jsou uvedeny podrobné návody k provedení autorizace a vkládání dat do NRD:

<https://sujb.gov.cz/radiacni-ochrana/prirodni-zdroje-ionizujiciho-zareni/navody-autorizace-prihlaseni-podani>

8. Závěr

Účelem příspěvku je seznámit dodavatele vody a provozovatele pracovišť s radonem i pracovišť s PZZ s připravovanými změnami prováděcí vyhlášky atomového zákona (vyhláška o radiační ochraně). Některé změny částečně zjednoduší činnosti dodavatelů vody i provozovatelů pracovišť (např. snížení četnosti oznamování údajů o vodovodech nebo prodloužení intervalu mezi měřeními obsahu přírodních radionuklidů v uvolňované radioaktivní látce z pracoviště).

Další důležitou změnou je povinnost provedení optimalizace na pracovišti s radonem a pracovišti s PZZ v případě, že je prvním měřením zjištěno překročení stanovených hodnot, ještě před provedením dalšího měření. V současnosti je běžná praxe provést opakované měření, aniž by před tím bylo provedeno opatření na snížení míry ozáření. Hodnoty zjištěné opakovaným měřením pak bývají obdobné jako při měření prvním.

Zásadní změna nastává ve způsobu oznamování údajů Úřadu o vodovodech a pracovištích. Až bude Národní radonová databáze v plném provozu, stane se cennou databankou všech evidovaných údajů. Přínos to bude i pro provozovatele, kteří již nebudou výsledky a evidované údaje posílat prostřednictvím České pošty nebo datovými schránkami, ale sami (prostřednictvím autorizované osoby) budou moci data do databáze vkládat.

Literatura

- [1] Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon.
- [2] Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně.
- [3] Návrh novely atomového zákona.
- [4] Návrh novely vyhlášky o radiační ochraně.

UPCOMING CHANGES TO THE ATOMIC ACT FOR THE SUPPLY AND TREATMENT OF DRINKING WATER FROM AN UNDERGROUND SOURCE

Keywords: atomic law, decree on radiation protection, drinking water from an underground source, workplace with possible increased radiation from radon, workplace with possible increased radiation from a natural source of radiation, National Radon Database

The article contains proposed changes to the atomic law and the decree on radiation protection for the area of drinking water supply and for workplaces where groundwater is treated. Changes to the Atomic Act and the Decree on Radiation Protection will apply from January 1, 2025.

The article also contains changes in reporting data on water supply systems and workplaces with radon and natural source of radiation to the State Office for Nuclear Safety. The reported data will be recorded in the National Radon Database.

ZPŘESNĚNÍ ODHADU OBSAHU ^{234}U V PEVNÝCH MATERIÁLECH S MOŽNÝM ZVÝŠENÝM OBSAHEM PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ VZNIKAJÍCÍCH NA ÚPRAVNÁCH PODZEMNÍCH VOD

Tereza Doksanská¹, Alena Kelnarová¹

¹Státní ústav radiační ochrany, v. v. i., Bartoškova 28, 140 00 Praha
e-mail: tereza.doksanska@suro.cz, alena.kelnarova@suro.cz

Klíčová slova: úpravna podzemní vody, pevné NORM, surová voda, odpadní voda, spektrometrie gama, radiochemie, poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$

Abstrakt

Pevné látky a odpadní vody uvolňované z pracovišť s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 87 vyhlášky 422/2016 Sb. (NORM), jsou posuzovány z hlediska obsahu přírodních radionuklidů na základě Doporučení SÚJB DR-RO-5.3. V pevných látkách je tento obsah v současnosti stanovován spektrometrií gama, přičemž obtížně měřitelné radionuklidy (^{234}U , ^{230}Th , ^{210}Po , ^{232}Th) jsou konzervativně dopočítávány. Současný způsob dopočtu však není realistický a konzervativní nadhodnocení dopočtených aktivit mnohdy dosahuje míry, která může vést k falešnému převýšení uvolňovacích úrovní. Tento problém se týká i pracovišť uvedených ve vyhlášce č. 422/2016 Sb., § 87 písm. o) provoz zařízení na úpravu vlastností podzemní vody nebo nakládání s vodárenskými kaly z úpravy vody z podzemního zdroje, ze kterých jsou vedle odpadních vod uvolňovány především kaly a filtrační materiály. Cílem naší práce je racionalizace způsobu dopočtů hmotnostních aktivit v Doporučení SÚJB DR-RO-5.3 pro pevné NORM.

Ve Státním ústavu radiační ochrany (SÚRO) Praha byly analyzovány aktivity klíčových členů uranové a thoriové přeměnové řady v souborech vzorků: surová voda – kal/filtrační materiál – odpadní voda z úpraven podzemní vody. Práce byla zaměřena především na izotopy uranu (^{238}U a ^{234}U) a radia (^{226}Ra a ^{228}Ra). Hmotnostní aktivity v pevných NORM byly stanoveny spektrometrií gama (^{238}U , ^{226}Ra a ^{228}Ra), radiochemicky po převedení pevného materiálu do roztoku tavením a po separaci spektrometrií alfa (^{238}U a ^{234}U) a emanometricky (^{226}Ra). Objemové aktivity v surové a odpadní vodě byly stanoveny po chemické separaci spektrometrií alfa (^{238}U a ^{234}U), emanometricky (^{226}Ra) a spektrometrií gama (^{228}Ra).

V příspěvku budou prezentovány stanovené poměry $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, porovnání výsledků, jichž bylo dosaženo současně radiochemickými metodami a spektrometrií gama, a diskutován návrh úpravy dopočtu těžko stanovitelných radionuklidů. Výsledky potvrdily, že poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ je v surové vodě, pevném materiálu i odpadní vodě zachován. Pro zpřesnění dopočtu hmotnostní aktivity v pevném NORM je tedy možné využít znalost poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ v surové nebo odpadní vodě.

1. Úvod

Pevné látky a odpadní vody uvolňované z pracovišť s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 87 vyhlášky 422/2016 Sb. (NORM), jsou posuzovány z hlediska obsahu přírodních radionuklidů na základě Doporučení SÚJB DR-RO-5.3 (dále jen Doporučení SÚJB) [1]. Mezi tato pracoviště patří mimo jiné provoz zařízení na úpravu vlastností podzemní vody nebo nakládání s vodárenskými kaly z úpravy vody z podzemního zdroje.

S ohledem na tento typ pracoviště se odbor monitorování v SÚRO zabývá stanovením objemových aktivit přírodních radionuklidů v surové, pitné i odpadní vodě a hmotnostních aktivit přírodních radionuklidů v pevných materiálech, zejména kalech a filtračních náplních. Na obsah přírodních radionuklidů ve výstupní vodě a v kalech mají zásadní vliv geologické podmínky a proces úpravy vody, např. koagulace a filtrace [2, 3, 4].

V odpadní vodě se primárně stanovuje celková objemová aktivita alfa a beta, při překročení uvolňovacích úrovní (UÚ) jsou stanovovány jednotlivé přírodní radionuklidy a jejich příspěvky k celkovým objemovým aktivitám, tedy ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po .

V pevných látkách je obsah přírodních radionuklidů v současnosti stanovován polovodičovou spektrometrií gama s vysokým rozlišením. Přímě je měřeno šest radionuklidů: ^{238}U , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{40}K , hmotnostní aktivita dalších čtyř radionuklidů ^{234}U , ^{230}Th , ^{210}Po , ^{232}Th , je podle Doporučení SÚJB [1] konzervativně dopočítávána pomocí následujících vzorců:

$$A(^{234}\text{U}) = 2 \cdot A(^{238}\text{U})$$

$$A(^{230}\text{Th}) = 2 \cdot A(^{238}\text{U})$$

$$A(^{210}\text{Po}) = A(^{210}\text{Pb})$$

$$A(^{232}\text{Th}) = A(^{228}\text{Ra}) + A(^{228}\text{Th})$$

Uvedené dopočty předepsané v Doporučení SÚJB [1] jsou však v mnoha případech konzervativní příliš, u $A(^{234}\text{U})$ může dojít i k podhodnocení [5]. Obsahem izotopů uranu a thoria v kalech vznikajících v úpravárnách vod se zabývá např. práce [6]. V SÚRO i jiných laboratořích [7] byla zaznamenána řada případů, kdy hmotnostní aktivity byly pomocí dopočtů nadhodnoceny natolik, že došlo k falešnému převýšení UÚ. Vzorke jsou do laboratoří SÚRO dodávány provozovateli úpraven vody v souladu s vyhláškou 422/2016 Sb., a Doporučením SÚJB [1].

Cílem naší práce je racionalizace dopočtů hmotnostních aktivit pro pevné látky typické pro Českou republiku, jež by mohla být zohledněna při příští revizi Doporučení SÚJB [1].

2. Postup

Z důvodu získání informací o rovnováhách v uranové a thoriové přeměnové řadě byly vypracovány metodiky pro radiochemické stanovení izotopů uranu, thoria a radia v pevných matricích. Ve vzorcích z provozů zařízení na úpravu vlastností podzemní vody nebo nakládání s vodárenskými kaly z úpravy vody z podzemního zdroje dodaných na Odbor monitorování byly v roce 2023 provedeny následující analýzy:

a) Izotopy uranu

Ve vzorcích z 12 pracovišť byl stanoven obsah ^{238}U a ^{234}U . V pevných látkách byla stanovena hmotnostní aktivita ^{238}U současně spektrometrií gama a spektrometrií alfa po radiochemické separaci a hmotnostní aktivita ^{234}U spektrometrií alfa po radiochemické separaci. V surové a odpadní vodě ze stejného pracoviště byly stanoveny objemové aktivity ^{238}U a ^{234}U podle [8]. Pro pevné látky a surovou i odpadní vodu byl spočítán poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$.

b) Izotopy radia

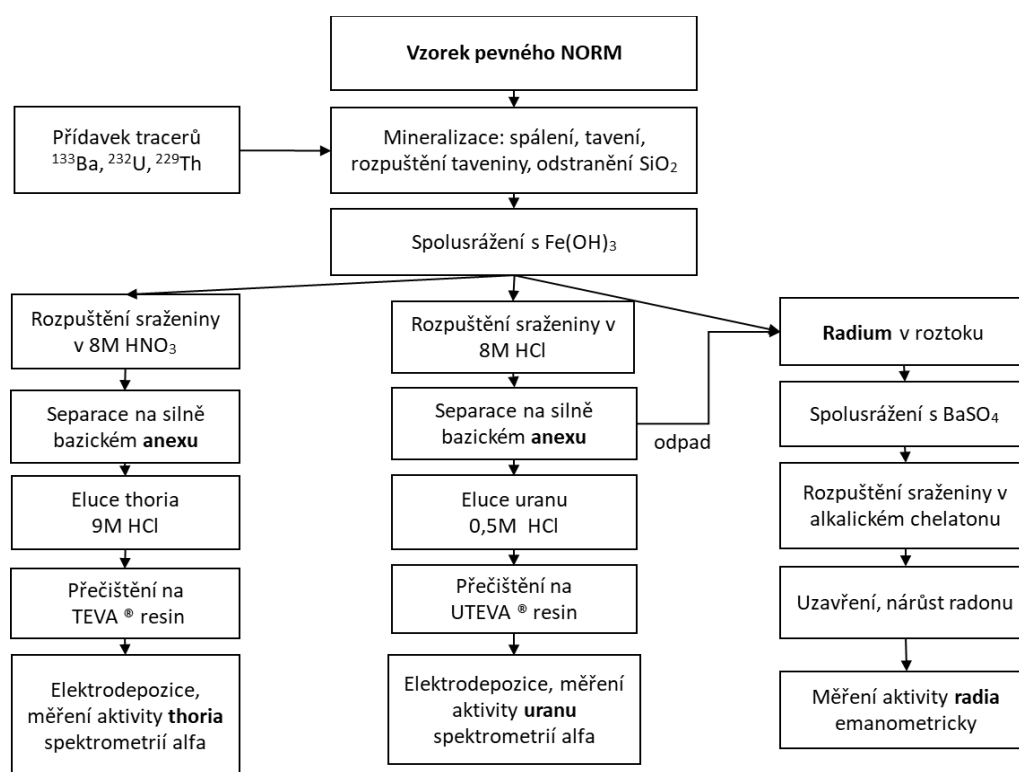
Ve vzorcích z devíti pracovišť byl stanoven obsah ^{228}Ra a ^{226}Ra . V pevných látkách byly izotopy radia stanoveny spektrometrií gama přímo v chemicky neupraveném vzorku a současně ve vzorku, který prošel radiochemickou separací – ^{226}Ra emanometricky v Lucasových

komorách, ^{228}Ra spektrometrií gama. V surové vodě ze stejného pracoviště byly stanoveny objemové aktivity ^{228}Ra a ^{226}Ra podle [9, 10]. Pro pevné látky a surovou vodu byl spočítán poměr $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$.

Poměry $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ v pevné látce a surové/odpadní vodě byly pro každé pracoviště vzájemně porovnány. Cílem bylo potvrdit nebo vyvrátit předpoklad, podle kterého by bylo možné aktivitu těchto radionuklidů odhadnout na základě měření pouze jednoho typu vzorku. Jednalo by se především o ^{234}U v pevných látkách odhadnutý pomocí měření ^{238}U a poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ v surové/odpadní vodě a o ^{228}Ra nebo ^{226}Ra v surové vodě odhadnuté pomocí měření ^{226}Ra nebo ^{228}Ra a poměru $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ v pevné látce. Tyto radionuklidy jsou v pevných látkách a vodách někdy stanovovány paralelně a využití jejich výsledků by v těchto případech laboratorům nepřineslo práci navíc. U sledovaných zařízení na úpravu vody a čistíren odpadních vod nemáme informace o způsobu úpravy surové vody, která má vliv na obsah přírodních radionuklidů v kalech a vyrobené vodě [3, 4, 11].

3. Radiochemické metody měření pevných materiálů

Stanovení izotopů uranu, thoria a radia ve vysušeném, namletém a spáleném vzorku pevné látky je založeno na postupné separaci jednotlivých radionuklidů ze vzorku převedeného do roztoku alkalickým tavením. Proces je znázorněn na schématu v Obr. 1.



Obr. 1. Schéma stanovení izotopů uranu, thoria a radia radiochemickými metodami

a) Izotopy uranu a thoria

Postup stanovení vychází z literatury [12, 13], aplikačních listů Triskem a zkušeností laboratoře SÚRO. Navážka vysušeného, spáleného a umletého vzorku je 0,6 až 1,0 g. Po převedení taveniny do roztoku a odstranění silikátů se uran separuje spolusrážením s hydroxidem železitým, thorium se separuje spolusrážením s $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$. Uran a thorium jsou dále separovány pomocí silně bazického měniče aniontů, uran se sorbuje na silně kyselém anexu z 8M HCl, thorium z 8M HNO₃. Uran se pak přečistí pomocí extrakční chromatografie

na UTEVA® resin, thorium se čistí přes TEVA®resin. Pro stanovení výtěžku celého procesu chemické separace se na začátku zpracování přidávají monitory výtěžků ^{232}U a ^{229}Th . Separovaný analyt se ve formě kationtů elektrolyticky nanese na kovový plíšek a následně je pomocí spektrometrie alfa proměřen (pomocí Passivated Implanted Planar Silicon – PIPS detektory ve vakuu). Aktivita se spočítá na základě známých ploch pod píky, které přísluší monitoru výtěžku a stanovovanému radionuklidu, a známé přidané aktivitě monitoru výtěžku.

b) Izotopy radia

Navážka vysušeného, spáleného a umletého vzorku je 0,6 až 1,0 g. Po převedení taveniny do roztoku a odstranění silikátů se uran od radia odděluje spolusrážením s hydroxidem železitým. Radium v supernatantu se přechišťuje spolusrážením s Ba^{2+} a H_2SO_4 [9]. Pro dosažení vyššího výtěžku se k supernatantu přidá ještě eluát získaný z anexu při separaci uranu. Aktivita ^{228}Ra se stanovuje spektrometrií gama s vysokým rozlišením proměřením sraženiny na filtru po dosažení rovnováhy s ^{228}Ac . Potom se sraženina i s filtrem rozpustí v alkalickém roztoku EDTA. Stanovení ^{226}Ra se následně provádí po dosažení rovnováhy s ^{222}Rn emanometricky v Lucasových komorách. Výtěžek separace se monitoruje pomocí aktivity ^{133}Ba (baryum se používá jako chemický analog radia).

Hmotnostní aktivity ^{238}U , ^{228}Th a ^{226}Ra stanovené podle uvedených postupů byly ve vybraných materiálech porovnány se stanovením pomocí spektrometrie gama jako ověření správnosti prováděného postupu. Jsou považovány za ověřené a výsledky získané jejich pomocí se mohou se spektrometrií gama vzájemně doplňovat.

4. Výsledky

Výsledky potvrdily, že poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ je v surové vodě, pevném materiálu (zejména byly sledovány kaly, upravené vodárenské písky a iontoměničová náplň) a odpadní vodě zachován, viz *Tab. 1*. Ze získaných výsledků vyplývá, že způsob úpravy surové vody nemá vliv na poměr izotopů uranu v pevné látce ani odpadní vodě. Poměry $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ v pevné látce a surové vodě zachovány nejsou, viz *Tab. 2*. Důvodem by mohla být vysoká nejistota stanovení objemové aktivity v surové vodě. Nicméně příčina bude předmětem dalšího výzkumu.

Tab. 1. Poměr aktivity $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ odpadních produktů z provozů na úpravu vody (ÚV) a čistíren odpadních vod (ČOV)

Pracoviště	Pevný materiál	Surová voda objemová aktivita v Bq/l			Pevný odpadní materiál hmotnostní aktivita v Bq/kg			Odpadní voda objemová aktivita v Bq/l		
		^{238}U	^{234}U	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	^{238}U	^{234}U	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	^{238}U	^{234}U	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$
ÚV 1	Tekutý kal	< 0,004	0,006		13,2	14,2	1,1	< 0,003	< 0,003	
ÚV 2	Tekutý kal	0,100	0,126	1,3	109	145	1,3	0,119	0,150	1,3
ÚV 3	Tekutý kal	0,313	0,672	2,1	74,9	148	2,0	0,230	0,480	2,1
ÚV 4	Tekutý kal	0,028	0,080	2,9	18,7	43,5	2,3	0,024	0,079	3,3
ÚV 5	Tekutý kal	0,081	0,139	1,7	192	287	1,5	0,093	0,136	1,5
ÚV 6	Tkaninový filtr	0,073	0,196	2,7	< 36,7			0,202	0,483	2,4
ÚV 7	Anex Lewattit	0,261	0,330	1,3	19 000	24 300	1,3	není		
ÚV 8	Filtrační písek	0,009	0,036	4,1	0,98	4,4	4,5	není		
ÚV 9	Kal z pískových filtrů	0,015	0,017	1,2	14,9	16,1	1,1	0,028	0,034	1,2
ČOV 1	Odvodněný kal	0,030	0,049	1,6	82,0	131	1,6	není		
ČOV 2	Odvodněný kal	0,017	0,032	1,9	73,5	134	1,8	není		
ČOV 3	Odvodněný kal	0,165	0,503	3,0	1 060			19,3	55,0	2,8

Tab. 2. Poměr aktivity $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ odpadních produktů z provozů na úpravu vody (ÚV) a čistíren odpadních vod (ČOV)

Pracoviště	Pevný materiál	Surová voda objemová aktivita v Bq/l			Pevný odpadní materiál hmotnostní aktivita v Bq/kg		
		^{226}Ra	^{228}Ra	$^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$	^{226}Ra	^{228}Ra	$^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$
ÚV 1	Tekutý kal	0,038	0,060	0,6	1 330	1 330	1,0
ÚV 2	Tekutý kal	0,040	0,011	3,6	620	307	2,0
ÚV 3	Tekutý kal	0,0084	0,024	0,4	710	964	0,7
ÚV 4	Tekutý kal	0,028	0,026	1,1	604	411	1,5
ÚV 5	Tekutý kal	0,0065	0,020	0,3	1 610	1 960	0,8
ÚV 7	Anex Lewattit	0,014	0,009	1,5	0,6	< 0,6	
ÚV 9	Kal z pískových filtrů	0,0129	0,0274	0,5	177	144	1,2
ÚV 10	Odvodněný kal	0,0046	< 0,008		102	65	1,6
ÚV 11	Filtrační písek	0,485	0,520	0,9	3 590	3 600	1,0
ČOV 1	Tekutý kal	0,0072	0,057	0,1	44,2	45,0	1,0
ČOV 2	Tekutý kal	0,0024	0,015	0,2	40,6	40,0	1,0

5. Závěr

Pro zpřesnění dopočtu hmotnostní aktivity ^{234}U v pevných látkách uvolňovaných z provozů na úpravu vody, zejména kalů, je možné využít znalosti poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ v surové nebo odpadní vodě. Tento závěr by mohl být zohledněn při příští revizi Doporučení SÚJB [1], kdy by konzervativní dopočet $A(^{234}\text{U}) = 2 \cdot A(^{238}\text{U})$ pro pevné látky mohl být rozšířen o možnost zpřesnění pomocí vztahu $A(^{234}\text{U}) = (^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{voda}} \cdot A(^{238}\text{U})$. Hmotnostní aktivita $A(^{238}\text{U})$ by byla i nadále stanovena spektrometrií gama a poměr $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{voda}}$ měřením objemových aktivit ^{234}U a ^{238}U v surové nebo odpadní vodě z téhož pracoviště. Tento postup by se mohl uplatnit obzvláště v případech, kdy hrozí převýšení UÚ u pevných látek

Literatura

- [1] Doporučení SÚJB DR-RO-5.3 (Rev. 0.0): Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 95 ods. 1 písm. b) atomového zákona, SÚJB, Praha, 2017.
- [2] MULAS, D., CAMACHO, A., SERRANO, I., MONTES S., DEVESA R., DUCH, M. A. Journal of Environmental Radioactivity: *Natural and artificial radionuclides in sludge, sand, granular activated carbon and reverse osmosis brine from a metropolitan drinking water treatment plant*, 2017, vol. 177, str. 233–240.
- [3] PENALVER, A., BACIU, T., BORRULL, F., AGUILAR, C. Water Air Soil Pollut: *Possible factors Influencing the Accumulation of Different Radionuclides in Sludge from a Drinking Water Treatment Plant Located in Southern Catalonia Between 2002 and 2018*, 2020, vol. 231.
- [4] PALOMO, M., PENALVER, A., AGUILAR, C., BORRULL, F. Applied Radiation and Isotopes: *Radioactivity evaluation of Ebro river water and sludge treated in a potable water treatment plant located in the South Catalonia (Spain)*, 2010, vol. 68, str. 474–480.
- [5] Radiologické metody v hydrosféře, 15.–16. května 2015, Hotel Grand, Uherské Hradiště, BOUDA, T.: *Objemové aktivity radionuklidů ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th a izotopické poměry $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách*, odborná přednáška.
- [6] PALOMO, M., PENALVER, A., AGUILAR, C., BORRULL, F. Journal of Hazardous Materials: *Presence of Naturally Occurring Radioactive Materials in sludge samples from several Spanish water treatment plants*, 2010, vol. 181, str. 716–721.

- [7] Radiologické metody v hydrosféře 23, 25.–26. dubna 2023, Hotel U Kata, Kutná Hora, Česká republika, PETRÁKOVÁ KÁNSKÁ, K. (Edit.), str. 92. BOUDA, T. *Měření a hodnocení obsahu izotopů thoria ^{232}Th a ^{230}Th v odpadních materiálech NORM z úpravy podzemní vody na vodu pitnou*, sborník z konference, str. 41.
- [8] ISO 13166. Water quality-Uranium isotopes – Test method using alpha-spectrometry. 2020.
- [9] ČSN 75 7622. Jakost vod – Stanovení radia 226. Praha, ČNI, 2018.
- [10] The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition. IAEA Technical Reports Series No 476, 2014.
- [11] FONOLLOSA, E., NIETO, A., PENALVER, A., AGUILAR, C., BORULL, F. Journal of Environmental Radioactivity: *Presence of radionuclides in sludge from conventional drinking water treatment plants. A review*, 2015, vol. 141, str. 24–31.
- [12] LEHTO, J., XIAOLIN, H. Chemistry and Analysis of Radionuclide; WILEY-VCH Verlag Co.KGaA, Weinheim, Germany, 2011.
- [13] GINGELL, T. THORIUM ISOTOPIC ANALYSIS BY ALPHA SPECTROMETRY. Radiation Protection Dosimetry 2001, 97, 109–116.

REFINING THE ESTIMATION OF THE CONTENT OF ^{234}U IN SOLID MATERIALS RELEASED FROM GROUNDWATER TREATMENT PLANTS

Keywords: groundwater treatment plant, solid NORM, raw water, wastewater, gamma spectrometry, radiochemistry, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio

Solid substances and wastewater released from workplaces handling material with increased natural radionuclide content according to § 87 of Decree 422/2016 Coll. (NORM) are assessed in terms of the content of natural radionuclides based on recommendations DR-RO-5.3 issued by the State Office for Nuclear Safety. In solid substances, this content is currently determined by gamma-ray spectroscopy, while difficult-to-measure radionuclides (^{234}U , ^{230}Th , ^{210}Po , ^{232}Th) are calculated using conservative approach. However, the current method of estimation is not realistic, and the conservative overestimation of the activities often lead to the false exceeding of the clearance levels. This problem also applies to workplaces of type o) operation of a treatment plant to treat underground water or sludge resulting from a source of underground water, from which mainly sludge and filter materials are released in addition to waste water. The goal of our work is the rationalization of the method of mass activities estimation defined in DR-RO-5.3 for solid NORM.

In National Radiation Protection Institute in Prague, the activities of key members of the uranium and thorium decay series were analyzed in sample sets: raw water – sludge/filter material – wastewater from groundwater treatment plants. The work was mainly focused on isotopes of uranium (^{238}U and ^{234}U) and radium (^{226}Ra and ^{228}Ra). Mass activities in solid NORM were determined by gamma-ray spectroscopy (^{238}U , ^{226}Ra and ^{228}Ra), radiochemically after converting the solid material into solution by melting and after separation by alpha spectrometry (^{238}U and ^{234}U) and emanometrically (^{226}Ra). Volume activities in raw and wastewater were determined after chemical separation by alpha spectrometry (^{238}U and ^{234}U), emanometrically (^{226}Ra) and by gamma-ray spectroscopy (^{228}Ra).

The paper will present the obtained ratios of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, comparison of the results that were determined simultaneously by radiochemical methods and gamma-ray spectroscopy, and discuss the proposal for adjusting the addition of difficult-to-measure radionuclides. The results confirmed that the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio is maintained in raw water, solid material and

wastewater. It is therefore possible to use knowledge of the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio in raw or waste water to refine the calculation of mass activity in solid NORM.

DOPORUČENÍ STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST „MĚŘENÍ A HODNOCENÍ OBSAHU PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ V PITNÉ VODĚ“, PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI A PODNĚTY K JEHO REVIZI

Tomáš Bouda

*ALS Czech Republic, s.r.o., Na Harfě 336/9, 190 00 Praha 9,
Laboratoř Česká Lípa, Bendlova 1687/7, 470 01 Česká Lípa,
e-mail: Tomas.Bouda@ALSglobal.com*

Klíčová slova: Doporučení SÚJB, přírodní radionuklidy, měření a hodnocení, pitná voda

Abstrakt

V České republice se měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitných vodách provádí od roku 2018 dle Doporučení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) „Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě“. Během šesti let praktického používání tohoto Doporučení jsme získali zkušenosti, na jejichž základě v tomto článku navrhujeme úpravu či zpřesnění některých kritérií, a to jak pro měření, tak pro hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitných vodách. Nezabýváme se zde drobnými nepřesnostmi a typografickými chybami ve stávajícím Doporučení, které budou jistě při následující revizi Doporučení opraveny.

1. Úvod

Současná radiologická legislativa pitných vod zemí Evropské unie (EU) vychází ze směrnice **Rady 2013/51/EURATOM** vydané 22. října 2013, kterou se stanoví požadavky na ochranu zdraví obyvatelstva, pokud jde o radioaktivní látky ve vodě určené k lidské spotřebě.

Radiologická legislativa jednotlivých států EU z této směrnice vychází. Většinou se jedná jen o drobné úpravy (např. nejvyšší přípustná hodnota pro ^{222}Rn). Ve státech, jako je Česko či Slovensko, jež mají mnohaletou zkušenost v oblasti radiologických rozborů pitných vod, jsou však změny směrnice sofistikovanější.

Česká radiologická legislativa vychází z požadavků atomového zákona č. 263/2016 Sb. [2], podrobně ji specifikuje prováděcí předpis, vyhláška č. 422/2016 Sb., v § 98–101 a v příloze č. 27. Ustanovení prováděcího předpisu jsou detailně rozvedena v Doporučení SÚJB **DR-RO-5.1(Rev. 0.0)** „Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě“. Současná česká legislativa je v platnosti více než šest let, za tuto dobu jsme zanalyzovali tisíce vzorků vod a získali zkušenosti, na jejichž základě navrhujeme zpřesnění některých ustanovení Doporučení [4].

2. Návrh na úpravu detekčního limitu metody stanovení celkové objemové aktivity alfa COAA v pitných vodách

Doporučení [4] uvádí v 5. kapitole požadavky na hodnoty mezí detekce (**and** či **cnd** – nejmenší detekovatelná aktivita či hmotnostní koncentrace na hladině významnosti 5 % / $\alpha = \beta = 0,05/$)

a na nejistoty měření (u_r – relativní kombinovaná standardní nejistota pro objemové aktivity nebo hmotnostní koncentrace rovné nebo vyšší než je čtyřnásobek dle české legislativy [4], resp. jednonásobek dle slovenské legislativy [6] hodnoty a_{ND} či c_{ND}) používaných analytických metod stanovení jednotlivých radionuklidů či parametrů. V následující *tab. 1* jsou uvedeny hodnoty a_{ND} či c_{ND} , resp. u_r z české [4], evropské [1] a slovenské [6] legislativy. V posledním sloupci je též udána referenční hodnota objemové aktivity či koncentrace r_i , v EU označované jako $C_i(der)$, která odpovídá úvazku efektivní dávky 0,10 mSv/rok (spotřeba 730 l pitné vody ročně dospělou osobou; je uvedena v Bq/l, resp. v mg/l na 0,10 mSv/rok).

Tab. 1. Požadavek na radiologické metody z hlediska detekčních limitů a nejistot měření

Parametr / Radionuklid	Detekční limit (a_{ND} či c_{ND}) [viz pozn. 1]			Jednotka	Pozn. EU [1]	Relativní kombinovaná standardní nejistota		Referenční hodnota r_i / $C_i(der)$ [pozn. 2]
	CZ [4]	EU [1]	SK [6]			CZ [4] $a \geq 4 \cdot a_{ND}$	SK [6] $a \geq a_{ND}$	
Tritium 3H	-	10	10	Bq/l	3	-		
^{222}Rn	15	10	10	Bq/l	3	< 10 %	< 10 %	300
COAA	0,05	0,04	0,04	Bq/l	4	< 10 %	< 30 %	-
COAB	0,10	0,40	0,20	Bq/l	4	< 10 %	< 20 %	-
Draslík K	1			mg/l		< 10 %		-
Uran U	0,002			mg/l		< 10 %		0,12
^{234}U	0,05	0,02	0,02	Bq/l		< 10 %	< 10 %	2,8
^{238}U	0,05	0,02	0,02	Bq/l		< 10 %	< 10 %	3,0
^{224}Ra	0,10			Bq/l		< 10 %		2,1
^{226}Ra	0,03	0,04	0,04	Bq/l		< 10 %	< 10 %	0,50
^{228}Ra	0,05	0,02/0,08	0,02	Bq/l	5	< 10 %	< 10 %	0,20
^{210}Pb	0,07	0,02	0,02	Bq/l		< 10 %	< 10 %	0,20
^{210}Po	0,04	0,01	0,01	Bq/l		< 10 %	< 10 %	0,10
^{228}Th	0,05			Bq/l		< 10 %		1,9
^{230}Th	0,05			Bq/l		< 10 %		0,65
^{232}Th	0,05			Bq/l		< 10 %		0,60

Poznámka: COAA - celková objemová aktivita alfa; COAB - celková objemová aktivita beta

Poznámka 1: Detekční limity by se měly počítat podle normy ISO 11929: Stanovení charakteristických limitů (nejmenší významná a nejmenší detekovatelná aktivita, interval spolehlivosti) pro měření ionizačního záření – Základy a aplikace, s pravděpodobností chyby prvního a druhého druhu 0,05 pro všechny limity.

Poznámka 2: Jedná se o přesné hodnoty Odvozené koncentrace $C_i(der)$ či Referenční hodnoty r_i , vypočtené pro indikativní dávku 0,10 mSv při příjmu 730 litrů za rok a pomocí koeficientů dávek stanovených v příloze III v tab. A směrnice 96/29/Euratom [5]; odvozené koncentrace jiných radionuklidů lze vypočítat na stejném základě a hodnoty je možné aktualizovat na základě novějších informací uznaných příslušnými orgány v členském státě. Tato tabulka bere v úvahu pouze radiologické vlastnosti uranu, nikoli jeho chemickou toxicitu.

Poznámka 3: Detekční limit pro tritium a radon je roven 10 % referenční úrovně 100 Bq/l.

Poznámka 4: Detekční limity pro celkovou objemovou aktivitu alfa a beta jsou rovny 40 % vyšetřovacích úrovní 0,10 a 1,0 Bq/l.

Poznámka 5: Detekční limit 0,02 Bq/l platí jen pro počáteční monitoring nového vodního zdroje; jestliže počáteční kontrola prokáže, že objemová aktivita ^{228}Ra nepřevyší 20 % jeho odvozené koncentrace ($C_i(der)$), může být pro rutinní monitorování aktivity ^{228}Ra zvýšen detekční limit na 0,08 Bq/l, dokud není požadována následující kontrola.

V případě pitných vod s vyšším obsahem rozpuštěných látek (více než cca 500 mg/l) je možno při stanovení celkové objemové aktivity alfa (COAA) podle normy ČSN 75 7611, část 4 [7],

dosáhnout v Doporučení [4] „uvedené hodnoty nejmenší detekovatelné objemové aktivity alfa $a_{\text{ND},\alpha}$ “ **0,05 Bq/l** jen obtížně, zejména tím, že se připravené preparáty vzorku a pozadí měří výrazně déle než ostatní rutinní vzorky, někdy i několik dní. V případě laboratoře, která měří několik desítek vzorků denně, viz *tab. 2*, to ani není prakticky možné zajistit. V dalším textu je ukázáno, že lze v těchto spíše výjimečných případech připustit stanovení COAA i s vyšší hodnotou $a_{\text{ND},\alpha}$, a to **0,08 Bq/l**, což je 40 % vyšetřovací úrovně, podobně jako v případě evropské či slovenské legislativy [1, 6], kde však mají velmi nízkou a dá se říci nepraktickou hodnotu vyšetřovací úrovně 0,10 Bq/l.

Tab. 2. Souhrn výsledků celkové objemové aktivity alfa (COAA) analyzovaných v ALS Czech Republic, s.r.o., v letech 2019–2023 (ČSN 75 7611 ZnS(Ag) [7])

COAA [Bq/L]	Počet	% celk. počtu
COAA ≤ 0,010	51713	87,6 %
0,010 < COAA ≤ 0,020	3316	5,6 %
COAA ≤ 0,020	55029	93,2 %
COAA > 0,020	4008	6,8 %
Všechny výsledky COAA	59037	100,0 %

Zdůvodnění této vyšší „povolené“ hodnoty $a_{\text{ND},\alpha}$ ve výjimečných případech vyplývá z níže uvedených *tab. 3 a 4*.

- Počet vzorků s hodnotou $a_{\text{ND},\alpha}$ **0,06–0,08 Bq/l** je jen 3,0 %, tj. jen každý cca 34. vzorek s hodnotou $a_{\text{ND},\alpha}$ menší nebo rovnou 0,08 Bq/l. Jinými slovy, 97,0 % všech výsledků pod mezí detekce 0,08 Bq/l má hodnotu $a_{\text{ND},\alpha}$ menší nebo rovnou „současné“ hodnotě minimální detekovatelné aktivity 0,05 Bq/l dle platného Doporučení [4].
- V *tab. 3 a 4* nejsou navíc uvedeny pouze pitné vody, ale veškeré vzorky vod analyzované dle ČSN 75 7611, část 4 [7] v naší laboratoři. V případě pitných vod bude situace příznivější.
- I kdybychom rozdíl 0,03 Bq/l mezi navrhovanou a současnou hodnotou minimální detekovatelné aktivity (0,08–0,05) přisoudili radionuklidu s nejnižší referenční hodnotou z *tab. 1*, tj. ^{210}Po , odpovídala by tomu indikativní dávka (ID) **0,03 mSv/rok**. Je však známo – nakonec to uvádí i Doporučení [4] –, že majoritními přispěvateli k hodnotě COAA jsou izotopy U a ^{226}Ra . Pokud by tomu totiž tak nebylo, museli bychom i v Česku snížit vyšetřovací úroveň (VÚ) COAA z 0,20 Bq/l na hodnotu 0,10 Bq/l, protože hodnota VÚ 0,20 Bq/l daná jen samotným ^{210}Po by odpovídala hodnotě ID 0,20 mSv/rok. Z tisíců provedených analýz však víme, že tomu tak není. Např. portugalská legislativa [8] bez ohledu na nejistotu měření vyžaduje pro vzorky pitných vod s COAA $\geq 0,11$ Bq/l dodatečné stanovení ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra a ^{210}Po a výpočet ID. Tímto způsobem jsme již zanalyzovali stovky vzorků a v žádném případě nebylo ^{210}Po dominantním přispěvovatelem k ID. V letech 2004–2005 jsme pro naši pobočku v Portugalsku analyzovali 3 600 vzorků pitných vod na COAA a relativní podíl vzorků s COAA vyšší než 0,10 Bq/l, resp. 0,20 Bq/l odpovídal hodnotám z *tab. 2*, kde bylo analyzováno celkem skoro 60 000 vzorků [9]. **Mimo jiné to potvrzuje, že česká hodnota VÚ 0,20 Bq/l [4] je velmi rozumně zvolena, jakož i to, že ve výjimečném**

případě velmi zasolených vod je možno připustit hodnotu minimální detekovatelné objemové aktivity alfa $a_{ND,\alpha}$ 0,08 Bq/l.

- Pokud bude pitná voda natolik zasolená, že nebude možno stanovit COAA s hodnotou $a_{ND,\alpha}$ alespoň 0,08 Bq/l, pak nepůjde o pitnou vodu nikoli z důvodů její radioaktivity, nýbrž z důvodů solnosti.
- Popsanou situaci je možno řešit i tak, že hodnota $a_{ND,\alpha}$ pro COAA zůstane na stejné úrovni, tj. 0,05 Bq/l, ale v poznámce bude připuštěno pro zasolenější vody použít hodnotu $a_{ND,\alpha}$ 0,08 Bq/l.
- Doporučení [4] navíc předpokládá, což nebylo výše zmíněno, že měření celkové objemové aktivity alfa se provádí v intervalu 24–48 hodin od ukončení přípravy preparátů (viz vysvětlivky k tab. 4 v kap. 4.1.2. Doporučení [4]), takže de facto není možné ani připravený preparát měřit delší dobu ke stanovení nižší hodnoty $a_{ND,\alpha}$.

Tab. 3. Souhrn výsledků celkové objemové aktivity alfa (COAA) menších než nejmenší detekovatelná objemová aktivita $a_{ND,\alpha}$ v letech 2019–2023 (ČSN 75 7611 ZnS(Ag) [7])

Hodnota $a_{ND,\alpha}$ [Bq/l]	Počet	% Celkového počtu	Kumulativní počet v %
0,04	41911	92,2 %	92,2 %
0,05–0,08	2435	5,4 %	97,6 %
0,05	43074	94,8 %	94,8 %
0,06–0,08	1272	2,8 %	97,6 %
0,09–0,12	372	0,8 %	98,4 %
0,13–0,16	117	0,3 %	98,7 %
0,17–0,20	70	0,2 %	98,8 %
0,21–0,25	74	0,2 %	99,0 %
0,26–0,30	49	0,1 %	99,1 %
0,31–0,40	92	0,1 %	99,3 %
0,41–0,50	52	0,1 %	99,4 %
0,51–0,75	56	0,1 %	99,5 %
0,75–1,00	43	0,1 %	99,6 %
1,01–2,00	68	0,1 %	99,8 %
2,01–10,0	100	0,2 %	100,0 %
Celkový počet	45439	100,0 %	

Tab. 4. Souhrn výsledků celkové objemové aktivity alfa (COAA) vyšších než nejmenší detekovatelná objemová aktivita aND, α za období 2019–2023 (ČSN 75 7611 ZnS(Ag) [7])

Interval výsledků COAA [Bq/l]	Počet	% Celkového počtu	Kumulativní počet v %
$\geq 0,040$ & $< 0,045$	1111	8,2 %	8,2 %
$\geq 0,045$ & $< 0,055$	1393	10,2 %	18,4 %
$\geq 0,055$ & $< 0,065$	1402	10,3 %	28,7 %
$\geq 0,065$ & $< 0,075$	926	6,8 %	35,5 %
$\geq 0,075$ & $< 0,085$	993	7,3 %	42,8 %
$\geq 0,085$ & $< 0,095$	699	5,1 %	48,0 %
$\geq 0,095$ & $< 0,105$	612	4,5 %	53,5 %
$\geq 0,105$ & $< 0,155$	1788	13,1 %	65,6 %
$\geq 0,155$ & $< 0,205$	1200	8,8 %	74,5 %
$\geq 0,205$ & $< 0,255$	683	5,0 %	79,5 %
$\geq 0,255$ & $< 0,305$	516	3,8 %	83,3 %
$\geq 0,305$ & $< 0,405$	678	5,0 %	88,3 %
$\geq 0,405$ & $< 0,505$	367	2,7 %	91,0 %
$\geq 0,505$ & $< 1,05$	723	5,3 %	96,3 %
$\geq 1,05$ & $< 5,05$	397	2,9 %	99,2 %
$\geq 5,05$ & $< 10,5$	47	0,3 %	99,5 %
$\geq 10,5$ & < 27500	63	0,5 %	100,0 %
Celkový počet	13598		

3. Doporučení stanovovat celkovou objemovou aktivitu beta COAB vždy s korekcí na obsah ^{40}K .

Jistou nelogičností v radiologické legislativě pitných vod jsou hodnoty vyšetřovací úrovně (VÚ) COAB s ohledem na referenční hodnoty ^{228}Ra a ^{210}Pb (viz tab. 1). Ve všech legislativách [4, 1, 6] jsou VÚ poměrně vysoké – 0,50 Bq/l, resp. 1,0 Bq/l –, ale pokud hodnota COAB převyší hodnotu VÚ, bere se k hodnocení nejprve COAB korigovaná na obsah beta aktivity ^{40}K , **COAB-K40**, ovšem paradoxně se porovnává se stejnou hodnotou VÚ.

V posledních letech analyzujeme vzorky pitných vod i ze Saúdské Arábie, kde velmi často bývají poměrně vysoké hodnoty objemové aktivity ^{228}Ra na úrovni 0,X Bq/l, mnohdy vyšší, než je objemová aktivita ^{226}Ra . Hodnota objemové aktivity ^{228}Ra 0,50 Bq/l odpovídá ID 0,25 mSv/rok a ID z obsahu izotopů U a ^{226}Ra je mnohdy menší než 0,10 mSv/rok. Podle evropské legislativy [1] bychom v takovém vzorku stanovovat ^{228}Ra vůbec nemuseli (v Příloze III, odst. 1, písmeno B je sice uvedeno „*Je-li celková aktivita alfa nižší než 0,1 Bq/l a celková aktivita beta nižší než 1,0 Bq/l, členský stát může předpokládat, že ID je nižší než hodnota ukazatele 0,1 mSv, přičemž není zapotřebí žádného radiologického šetření, pokud není z jiných informačních zdrojů známo, že v dané vodě jsou přítomny konkrétní radionuklidy, které mohou vést k tomu, že ID přesáhne hodnotu 0,1 mSv.*“, ale povinnost vyjasňovat zvýšenou COAB nepřevyšující VÚ není). V české legislativě [4] je alespoň uvedeno (tab. 3), že když objemová aktivita ^{226}Ra je vyšší než 0,20 Bq/l, provede se i stanovení ^{228}Ra . Nicméně v téže tabulce je uvedeno, jak již bylo zmíněno výše, že pokud COAB-K40 převyší VÚ 0,50 Bq/l, teprve se provádí stanovení radionuklidů emitujících záření beta.

Tab. 5. Souhrn výsledků celkové objemové aktivity beta **COAB** a celkové objemové aktivity beta korigované na ^{40}K **COAB-K40**, analyzovaných v ALS Czech Republic, s.r.o. v letech 2019–2023 (ČSN 75 7612 [14])

[Bq/l]	Počet	% Celk. počtu	% Celk. počtu
MDA(COAB) $\leq 0,10$	18153	75,5 %	81,9 %
MDA(COAB) $> 0,10$	1560	6,5 %	
$0,10 < \text{COAB} \leq 0,20$	399	1,7 %	14,2 %
$0,20 < \text{COAB} \leq 0,50$	3019	12,5 %	
$0,50 < \text{COAB} \leq 1,00$	531	2,2 %	3,9 %
COAB $> 1,00$	397	1,7 %	
Všechny výsledky COAB	24059	100,0 %	100,0 %

[Bq/l]	Počet	% Celk. počtu	% Celk. počtu
MDA(COAB-K40) $\leq 0,10$	20750	86,3 %	89,8 %
MDA(COAB-K40) $> 0,10$	855	3,6 %	
$0,10 < \text{COAB-K40} \leq 0,15$	710	3,0 %	8,8 %
$0,15 < \text{COAB-K40} \leq 0,20$	558	2,3 %	
$0,20 < \text{COAB-K40} \leq 0,50$	850	3,5 %	
$0,50 < \text{COAB-K40} \leq 1,00$	170	0,7 %	1,4 %
COAB-K40 $> 1,00$	163	0,7 %	
Všechny výsledky COAB-K40	24056	100,0 %	100,0 %

V tab. 5 je pro informaci uveden přehled počtu vzorků analyzovaných v naší laboratoři na celkovou objemovou aktivitu beta, COAB, a na celkovou objemovou aktivitu beta korigovanou na beta záření ^{40}K , COAB-K40, v letech 2019–2023 metodou dle ČSN 75 7612 [14]. Pod mezí detekce (MDA) bylo před korekcí na ^{40}K 82 % výsledků, po korekci na ^{40}K 90 %. Po korekci se počet výsledků pod MDA zvýšil o 9,6 %, počet výsledků nad MDA se snížil celkově o 44 %. Z tab. 5 též vyplývá, že pouze 10 % výsledků má po korekci na ^{40}K hodnotu COAB-K40 vyšší než 0,10 Bq/l, přičemž toto zvýšení není dáno ^{40}K . Z velké části se na tom podílejí dceřiné produkty ^{238}U a ^{226}Ra .

Ačkoli je známo, že zvýšená COAB je dána z 90 % jen příspěvkem beta aktivity ^{40}K , není v české legislativě povinnost stanovovat korigovanou aktivitu beta COAB-K40. A klient si sám o sobě korigovanou aktivitu beta neobjedná, jelikož to legislativa nevyžaduje. Pak ovšem může dojít – a z naší praxe dochází – k tomu, že když je zvýšená COAB vysvětlena přítomností izotopů U a ^{226}Ra a COAB nepřevyšuje „těsně“ vyšetřovací úroveň beta 0,50 Bq/l, a pokud je objemová aktivita ^{226}Ra menší než 0,20 Bq/l, což je též častý případ, nemusí se hodnota COAB blížíci se k hodnotě 0,50 Bq/l nijak objasňovat. V případě evropské a slovenské legislativy může být neobjasněná COAB blízka k 1 Bq/l. Pokud by se v těchto případech provedlo stanovení korigované hodnoty COAB-K40 a tato hodnota by byla menší než 0,20 Bq/l (před korekcí na ^{40}K byla COAB korigovaná na obsahy dceřiných produktů ^{238}U a ^{226}Ra), bylo by jasné, že není třeba stanovovat ^{228}Ra ani ^{210}Pb , resp. že jejich příspěvek k ID je vzhledem k jejich referenčním hodnotám maximálně 0,05 mSv/rok. To je samozřejmě lepší než být v nejistotě, že ID může být až 0,20 mSv/rok.

Závěrem lze tedy z tohoto rozboru navrhnout tyto úpravy budoucí revize Doporučení [4]:

- **Celkovou objemovou aktivitu COAB stanovovat vždy s korekcí na beta aktivitu ^{40}K , COAB-K40.** Stanovení K je poměrně levné a rychlé, na rozdíl od stanovení ^{228}Ra či ^{210}Pb .
- **Pokud nebude hodnota COAB-K40, případně korigovaná i na příspěvky dceřiných produktů ^{238}U a ^{226}Ra , COAB-kor, s výhradou nejistoty měření vyšší než 0,20 Bq/l, nemusí se další objasňování zvýšené hodnoty COAB-kor dále provádět.**
- Skutečnost, že je COAB v pitných vodách dána především přítomností ^{40}K z přírodního draslíku, ještě neznamená, že **hodnoty COAB korigované na ^{40}K , tj. COAB-K40, lze porovnávat na stejnou hodnotu VÚ jako nekorigovanou COAB 0,50 Bq/l.** K je biogenní prvek a příspěvek ^{40}K se ani nezapočítává do ID.

4. Poznámky ke stanovení uranu vs stanovení izotopů uranu ^{238}U a ^{234}U v pitných vodách

Problematikou stanovení izotopů uranu ^{238}U , ^{234}U a ^{235}U ve vodách se zabývá mnoho let [10–13]. Ve vodách – a zejména v podzemních – je vždy nadbytek objemové aktivity ^{234}U vůči aktivitě mateřského ^{238}U . Čím nižší je celková koncentrace uranu, tím je vyšší poměr objemových aktivit $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. V Česku se oprávněně hodnotí radiologie jen těch pitných vod, jež obsahují určitý podíl podzemní vody. V evropské i ve slovenské legislativě [1, 6] se hodnotí „neodůvodněně“ sice všechny druhy pitných vod, ale správně se v případě U vyžaduje stanovení izotopů U. Česká legislativa má dlouhodobou tradici, a proto zřejmě i v současném Doporučení [4] existuje možnost stanovení celkového U, i když se už doporučuje též stanovení izotopů ^{238}U a ^{234}U , pokud to umožňuje vybavení laboratoře. Pro celkové objemové aktivity alfa do cca 0,40 Bq/l se většinou stanovením U oproti stanovením izotopů U nic zásadního nestane, zbytková COAA je nižší než VÚ. Nicméně jsme zaznamenali případy, kde poměr aktivit $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ se blíží k 10 a pak se např. zbytečně stanovuje ^{226}Ra , nebo dokonce ^{210}Po z důvodu vyšší hodnoty zbytkové COAA.

Bylo by tedy vhodné zahrnout do budoucí revize Doporučení [4] ustanovení, aby se minimálně jednou za pět let provedlo stanovení izotopů U u těch zdrojů podzemních vod, kde je „U“ podstatným příspěvovatelem k COAA. Stanovení izotopů U lze snadno zajistit subdodavatelsky. Poměr izotopů $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ se v daném zdroji časově nemění, a lze tedy stanovit opravný faktor pro přepočet hmotnostní koncentrace U na jeho příspěvek k COAA. Je-li např. poměr objemových aktivit $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ roven 2,0, použije se místo faktoru 25,0 korigovaný faktor $25,0 \cdot 3/2 = 37,5$ (při zanedbání příspěvku ^{235}U ; přesně by to bylo 37,6, ovšem i místo 25,0 by se měl používat faktor 25,3 [12]). Kontrolní perioda cca pět let je dostatečná, mezi tím se k pravidelné kontrole zdroje dá použít levnější metoda stanovení celkového U.

5. Zpřesnění pravidel pro výpočet korigovaných objemových aktivit alfa a beta

Podle platného Doporučení [4] se při překročení vyšetřovacích úrovní provádějí dodatečné analýzy doporučených radionuklidů, až je korigovaná aktivita menší než příslušná vyšetřovací úroveň. Problematice těchto korekcí v případě COAB je věnována kapitola 3. V případě COAA je stanovený postup korekcí v pořádku, není však uvedeno, že se v konečném hodnocení bere do úvahy i nejistota měření jednotlivých radionuklidů a COAA.

V případě vyššího poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ může být voda s COAA kolem 1 Bq/l pitná, neboť ID je nižší než 0,1 mSv/rok a hmotnostní koncentrace uranu je nižší než 15 $\mu\text{g/l}$ (zohlednění chemické toxicity U). Nicméně korigovaná COAA-kor na obsah izotopů U a ^{226}Ra vyjde např. $0,21 \pm 0,13$ Bq/l, což bez zahrnutí nejistoty měření do hodnocení může vést k závěru, že vyšší COAA nebyla těmito analýzami dostatečně objasněna. S tímto názorem inspektorů SÚJB jsme se skutečně setkali.

Aby toto nenastalo, stačí v budoucí revizi Doporučení [4] uvést, že korigovaná COAX-kor nesmí prokazatelně překročit VÚX ($X = A$ 0,20 Bq/l; $X = B$ 0,50 Bq/l), tj. musí tedy platit, že $(\text{COAX-kor} - \text{VÚX} - \text{NMX}) \leq 0,0$; kde NMX je rozšířená nejistota COAX-kor.

6. Akreditace zkušební laboratoře vs program zajištění radioační ochrany

Aby jakákoli akreditovaná zkušební laboratoř (ZL) získala od SÚJB povolení k měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve vodě (případně ve stavebním materiálu či v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření), musí mimo jiné předložit tzv. **Program zajištění radiační ochrany (PZRO)**, který v mnohém dubluje existující **Příručku kvality** ZL včetně celého systému zajišťování a kontroly kvality práce ZL. **Tyto rozborů však mohou provádět i neakreditované subjekty či subjekty, které nemají všechny prováděné zkoušky akreditovány, neboť akreditace ZL není z hlediska PZRO požadována.** V řadě činností řízených státem je akreditace ZL postačující, resp. je přímo vyžadována (rozborů pitných vod, odpadních vod, odpadů atd.). Nelze popřít, že radiologické rozborů mají svá specifika a že ZL určitě musejí mít pracovníky se Zvláštní odbornou způsobilostí (ZOZ) k provádění této činnosti, či že ZL musejí od SÚJB získat příslušné povolení. **Místo PZRO by mělo být dostačující vyjádření ZL podpořené všemi potřebnými doklady ke všem požadavkům SÚJB v Žádosti subjektu o toto povolení. Lze si představit i jakousi zkrácenou verzi PZRO.** SÚJB jistě nemá dostatek kvalifikovaných odborníků ke kontrole činnosti ZL. K tomu je tady státní orgán **Český institut pro akreditaci, o. p. s.**

V důsledku této dvojakosti působí na trhu laboratoře, které sice mají Povolení SÚJB k provádění těchto radiologických rozborů, ale v některých činnostech by nevyhověly požadavkům ČIA, o. p. s., na akreditaci.

Dalšími příklady jsou např. požadavky Doporučení [4] na Protokol o zkoušce (kapitola 7 Doporučení). Akreditovaná ZL nemůže vydat Protokol o zkoušce, aniž by byl podepsán v soulase s Příručkou kvality PK. Nemusí na protokole uvádět identifikaci osob, které měření provedly, protože zkoušky mohou provádět jenom osoby, jež mají k provádění zkoušek kvalifikační předpoklady a jež byly k provádění dané zkoušky prokazatelně zaškoleny. Podobně ZL nemusejí na Protokole o zkoušce uvádět seznam použitých přístrojů a pomůcek, čísla ověřovacích listů a dobu platnosti ověření, jelikož musejí dodržovat ustanovení PK a související dokumentace, tj. nemůže se stát, že by ZL ke zkouškám použila přístroj s prošlou či neplatnou kalibrací či ověřením. Pokud by se tak i stalo, dané ZL hrozí odebrání akreditace a tím končí i její činnost na trhu včetně všech důsledků.

Určité skloubení požadavků SÚJB s akreditačními požadavky ČIA, o. p. s., může tedy přinést jen výhody, které zkvalitní celý proces radiologických zkoušek a ušetří zkušebními laboratořím nadbytečnou a často dublující práci.

7. Závěry

Naše laboratoř je akreditována již od roku 1993, hodnocení radiologických rozborů dle požadavků atomového zákona a příslušných Doporučení SÚJB provádí od roku 2005. Ročně

realizujeme desetitisíce radiologických rozborů. Na základě praktických zkušeností jsme v tomto článku vyjádřili některé zásadnější připomínky k Doporučení SÚJB [4] „*Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě*“. Hned po vydání Doporučení jsme na SÚJB na počátku roku 2018 zaslali Poznámky k tomuto Doporučení, kde jsme však řešili spíše drobnější nepřesnosti v Doporučení. Během následujících šesti let praktického používání Doporučení jsme však došli k názoru, že některá ustanovení Doporučení je vhodné při příští revizi aktualizovat s ohledem na současnou situaci.

Jedná se o tyto oblasti:

- 1) Upravit požadavek na nejmenší detekovatelnou objemovou aktivitu alfa, α , s ohledem na nemožnost dosáhnout v některých výjimečných případech požadované hodnoty 0,05 Bq/l v případě zasolenějších pitných vod. Řešení některých laboratoří v neúměrném prodloužení měření nepřichází u velké komerční laboratoře do úvahy. V článku je prokázáno, že zvýšení hodnoty minimální α na 0,08 Bq/l v některých výjimečných případech neohrozí zdraví obyvatelstva a radiologická kvalita pitné vody bude stále pod kontrolou. Jde v průměru asi o 3 % všech radiologických analýz pitných vod.
- 2) Doporučujeme zpřesnit požadavky na hodnocení celkové objemové aktivity beta COAB. COAB je dána především příspěvkem beta záření izotopu draslíku ^{40}K . K je biogenním prvkem a příspěvek ^{40}K se ani nezapočítává do hodnoty ID. Doporučujeme vyžadovat stanovení COAB vždy s korekcí na ^{40}K a tuto korigovanou hodnotu COAB-K40 neporovnávat jako doposud se stávající vyšetřovací úrovní 0,50 Bq/l, nýbrž s hodnotou 0,10–0,20 Bq/l. Je opět ukázáno, že se zpřesní hodnocení PV, nebude to mít vliv na radiologickou kvalitu PV ani na zdraví obyvatel. Naopak toto zpřesnění vyloučí některé případy, kdy mohla být ID překročena, aniž by to bylo v rozporu se stávajícím Doporučením.
- 3) Co se týče stanovení uranu, resp. izotopů uranu ^{238}U a ^{234}U , navrhujeme zpřesnit stávající ustanovení Doporučení tak, aby se v případě pitných vod, u nichž je uran významným přispěvovatelem k celkové objemové aktivitě alfa, zejména na počátku a poté v intervalu pěti let, provádělo stanovení izotopů uranu. Tímto způsobem lze stanovit opravný faktor pro přepočítání příspěvku hmotnostní koncentrace uranu k COAA, který lze v mezinárodním měřítku používat k provozním kontrolám tohoto zdroje pomocí stávající metody stanovení uranu. Evropská legislativa jednoznačně požaduje místo uranu stanovovat izotopy ^{238}U a ^{234}U , což však není při tomto způsobu hodnocení PV nutné.
- 4) Dále je navrženo zpřesnění pravidel pro výpočet korigovaných aktivit COAA a COAB, aby se při hodnocení korigovaných hodnot aktivit používaly i nejistoty měření, tak jako to Doporučení předepisuje v případě porovnávání naměřených hodnot objemových aktivit COAA a COAB s hodnotami vyšetřovacích úrovní.
- 5) Konečně poslední doporučení se týká Programu zajištění radiační ochrany PZRO, který v případě akreditovaných zkušebních laboratoří určitým způsobem dubluje jejich Příručku kvality PK. Stávající situace je rozebrána a je navrženo skloubení požadavků SÚJB s akreditačními požadavky ČIA, o. p. s., které může přinést oboustranné výhody, jež zkvalitní celý proces radiologických zkoušek a ušetří zkušebními laboratořmi nadbytečnou a často dublující práci.

Literatura

- [1] SMĚRNICE RADY 2013/51/EURATOM ze dne 22. října 2013, kterou se stanoví požadavky na ochranu zdraví obyvatelstva, pokud jde o radioaktivní látky ve vodě určené k lidské spotřebě (Úřední věstník Evropské unie L 296, 7. listopadu 2013, s. 12).
- [2] Zákon č. 263/2016 Sb. (*zde jen zákon*), atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů, Sbírka zákonů č. 263/2016, Částka 102, s. 3 938–4 066.
- [3] Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, Sbírka zákonů č. 422/2016, Částka 172, s. 6 618–6 904.
- [4] SÚJB (2017): *DOPORUČENÍ SÚJB „Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě“*, DR-RO-5.1(Rev. 0.0) č. j. SÚJB/OS/19078/2017, Praha 2017, 40 s.
- [5] SMĚRNICE RADY 96/29/EURATOM ze dne 13. května 1996, kterou se stanoví základní bezpečnostní standardy na ochranu zdraví pracovníků a obyvatelstva před riziky vyplývajícími z ionizujícího záření (Úř. věst. L 159, Vol. 39, 29. června 1996, s. 1), Příloha III, Tabulka (A) „*Committed effective dose per unit intake via ingestion (Sv/Bq) for members of the public*“.
- [6] Vyhláška 45/2024 Z. z., Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky o obmedzovaní ožiarenia obyvateľov z pitnej vody, z prírodnej minerálnej vody a z vody vhodnej na prípravu stravy pre dojčatá.
- [7] ČSN 75 7611 (2020): Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity alfa [Část 4: Měření směsi odparku vzorku vody se scintilátorem ZnS(Ag)].
- [8] Portugalská verze Transposition from 2013/51/EURATOM to Portuguese legislation.
- [9] BOUDA, T. Porovnání české radiologické legislativy pitných vod s legislativou některých států EU/Comparison of Czech Radiological Legislation of Drinking Waters with Legislation of some countries of EU. Sborník z XXV. Konference „*Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství*“, České Budějovice, 24–25. duben 2018/ Proceedings from XXV. Conference „*Radionuclides and Ionizing Radiation in Water Management*“, České Budějovice, 24–25 April 2018.
- [10] BOUDA, T. Objemové aktivity radionuklidů ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th a izotopické poměry $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách (Activity concentrations of ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th and ^{232}Th and isotopic ratios of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in waters). Sborník z konference *Radiologické metody v hydrosféře XV. (Proceedings from the Conference Radiological methods in hydrosphere XV)*, ISBN 978-80-86832-84-5. Uherské Hradiště 2015, s. 74–82.
- [11] BOUDA, T. Porovnání stanovení uranu se stanovením izotopů uranu ^{238}U a ^{234}U ve vodách s ohledem na novou evropskou a českou radiologickou legislativu pitných vod (Comparison of uranium determination with the determination of isotopes of uranium ^{238}U and ^{234}U in waters with respect to the new European and Czech Radiological Legislation on Drinking Water). Sborník z konference *Radiologické metody v hydrosféře 17. (Proceedings from the Conference Radiological methods in hydrosphere 17)*, ISBN 978-80-88238-00-3. Litomyšl 2017, s./p. 36–47.

- [12] BOUDA, T. Evaluation of the dependence of the activity concentrations ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in waters on the ^{238}U activity concentration/Vyhodnocení závislosti poměru aktivitních koncentrací izotopů uranu $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách na aktivitní koncentraci ^{238}U . Proceedings abstract XIX. *Radiochemical conference „RadChem 2022 Report of contributions“*, České Budějovice, 15–20 May 2022/Sborník abstrakt XIX. *Radiochemické konference „RadChem 2022 Report of contributions“*, Mariánské Lázně, 15.–20. květen 2022, p./s. 215–216.
- [13] BOUDA, T. Vyhodnocení závislosti poměru aktivitních koncentrací izotopů uranu $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách na aktivitní koncentraci ^{238}U (Evaluation of the dependence of the activity concentrations ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in waters on the ^{238}U activity concentration). Sborník z XXVI. Konference „Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství“/Proceedings from XXVI. Conference "Radionuclides and ionizing radiation in water management". ISBN 978-80-802-02982-3. České Budějovice, 7.–8. červen 2022/ 7–8 June 2022). s./p. 39–53.
- [14] ČSN 75 7612 (2019): Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity beta.

RECOMMENDATION OF STATE OFFICE FOR NUCLEAR SAFETY "MEASUREMENT AND ASSESSMENT OF THE CONTENT OF NATURAL RADIONUCLIDES IN DRINKING WATER" – PRACTICAL EXPERIENCES AND SUGGESTIONS FOR ITS REVISION

Keywords: Recommendations of the State Office for Nuclear Safety, natural radionuclides, measurement and assessment, drinking water

In the Czech Republic, the measurement and assessment of the content of natural radionuclides in drinking water has been carried out since 2018 according to the State Office for Nuclear Safety Recommendation "Measurement and assessment of the content of natural radionuclides in drinking water for public use and in bottled water". During the six years of practical use of this Recommendation, we have gained a lot of experience, on the basis of which we propose in this article to modify or refine some criteria for both measurement and assessment of the content of natural radionuclides in drinking water. We are not concerned with minor inaccuracies and typographical errors in the current Recommendation, which will surely be corrected in the next revision of the Recommendation.

STANOVENÍ AKTIVITY DLOUHODOBÝCH RADIONUKLIDŮ V PODZEMNÍCH VODÁCH PRO POTŘEBY CHARAKTERIZACE LOKALITY HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

Michal Fejgl¹, Ivo Světlík², Ondřej Pařízek¹

¹*Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.*

²*Ústav jaderné fyziky AV ČR*

e-mail: michal.fejgl@suro.cz

Klíčová slova: I-129, He-4, Cl-36, Kr-81, urychlovačová hmotnostní spektrometrie, pórová voda

Abstrakt

Příspěvek shrnuje analytické postupy vhodné k charakterizaci lokality určené k ukládání radioaktivních odpadů (RO). Jedním ze základních předpokladů výběru lokality pro ukládání RO je skutečnost, že geologická vrstva vybraná pro budování úložiště je přirozeně izolována od zdrojů podzemní vody nacházejících se v nadložních vrstvách. V tomto příspěvku jsou popsány postupy, jak lze tuto izolovanost stanovit pomocí radionuklidů přirozeně se vyskytujících v pórové vodě hornin. Vhodnými radionuklidy jsou především I-129, Kr-81 a Cl-36, dále pak stabilní He-4 zejména díky tomu, že se v pórových vodách typicky vyskytují ve stanovitelných koncentracích a že jsou v obvyklých formách mimořádně mobilní.

Příspěvek shrnuje vhodné postupy stanovení aktivity zmíněných radionuklidů, dostupnost těchto postupů v České republice a vymezuje podmínky, za nichž je jejich využití vhodné.

Výzkum byl podpořen projektem TK05010167.

VYLUHOVÁNÍ RADIOAKTIVNÍCH PRVKŮ Z HORNINOVÉHO MATERIÁLU

**Hana Sýbková¹, Michaela Kozlovská¹, Petra Ježková¹, Miroslav Jurda²,
Miloslav Němec², Petr Otáhal¹**

¹ Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i.

² Státní úřad pro jadernou bezpečnost

e-mail: sybkova@sujchbo.cz

Klíčová slova: vyluhování radionuklidů, odval, uran ve vodě, ²²⁶Ra ve vodě

Abstrakt

V rámci dostavby dálnice D4 mezi městy Příbram a Písek je využíván horninový materiál z odvalů po těžbě uranu, která v minulosti probíhala v okolí Příbrami. V rámci kontrolní činnosti Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) byly odebrány vzorky použitého kameniva a v laboratořích Státního ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i. (SÚJCHBO), byl proveden vyluhovací experiment s těmito vzorky.

V jednotlivých vzorcích byly gamaspektrometricky stanoveny hmotnostní koncentrace dlouhodobých radionuklidů. Následně byly vzorky vyluhovány standardizovaným postupem dešťovou vodou, přefiltrovány a v rozpuštěné i nerozpuštěné složce vzorků vod po vyluhování byly stanoveny hmotnostní koncentrace uranu a objemová aktivita radionuklidu ²²⁶Ra.

1. Úvod

K dostavbě 32 kilometrů dlouhého úseku dálnice D4 mezi Příbramí a Novou Hospodou na Písecku je využíván horninový materiál z odvalů po těžbě uranu, která v minulosti probíhala v okolí Příbrami. Konkrétně se jedná o odvaly šachet číslo 11A a 19. Jde tak o dobrý příklad recyklace materiálu, který by jinak zůstal nadále nevyužit.

V rámci kontrolní činnosti SÚJB byly odebrány vzorky kameniva a haldoviny používaného při dostavbě dálnice a v laboratořích SÚJCHBO byl s těmito vzorky proveden vyluhovací experiment s dobou vyluhování 7 a 14 dní. Výše zmíněné podmínky louhování byly navrženy z důvodu jednoznačného potvrzení, anebo vyvrácení přechodu zájmových radionuklidů mezi jednotlivými interagujícími složkami.

2. Použité metodiky

Pro stanovení hmotnostních aktivit dlouhodobých radionuklidů ve vzorcích kameniva a haldoviny a v nerozpuštěné složce vzorků vody byla použita interní akreditovaná metodika M-5: Stanovení aktivity gamaspektrometrickou metodou [1]. Konzervativní odhad hmotnostní aktivity radionuklidů ²¹⁰Po, ²³⁰Th, ²³²Th a ²³⁴U ve vzorcích kameniva a haldoviny byl proveden dle Doporučení SÚJB [2].

Stanovení hmotnostní koncentrace uranu a objemové aktivity ²²⁶Ra v rozpuštěné složce vody bylo provedeno interními akreditovanými metodikami M-13: Stanovení uranu ve vybraných typech vzorků [3] a M-14: Stanovení objemové aktivity ²²⁶Ra ve vybraných typech vzorků [4].

3. Popis experimentu

Pracovníky DIAMO s. p., o. z., SUL Příbram bylo odebráno devět vzorků kameniva různých frakcí a haldoviny používaných při dostavbě dálnice a dodáno do laboratoří Odboru jaderné ochrany SÚJCHBO. Přehled a charakteristiku těchto vzorků shrnuje *tab. 1*.

Tab. 1. Přehled dodaných vzorků kameniva a haldoviny

Označení vzorku zadavatel	Odval šachty č.	Frakce kameniva	Vysoký podíl jílovité složky ve vzorku	Roztřídění vzorku na:	
				Opláchnuté kamenivo	Jílovitá složka
0/8	19	0/8	ano	---	---
8/16	19	8/16	---	---	---
16/32	19	16/32	---	---	---
32/63	19	32/63	---	---	---
0/32	19	0/32	ano (velmi)	ano	ano
0/63	19	0/63	ano	---	---
63/125	19	63/125	---	---	---
11A	11A	haldovina	ano (velmi)	ano	ano
11B	11A	haldovina	ano (velmi)	---	---

V jednotlivých vzorcích byla po dosažení radioaktivní rovnováhy mezi radionuklidem ^{226}Ra a přeměnovými produkty radonu gamaspektrometricky stanovena hmotnostní koncentrace dlouhodobých radionuklidů – ^{40}K , ^{228}Th , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra a ^{238}U . Dle Doporučení [2] byl u těchto vzorků vypočten konzervativní odhad hmotnostní aktivity radionuklidů ^{210}Po , ^{230}Th , ^{232}Th a ^{234}U .

Z každého vzorku bylo naváženo po 1 kg kameniva do dvou 5litrových kádinek a zalito 2 l dešťové vody, u které byla předem stanovena hmotnostní koncentrace uranu a objemová aktivita ^{226}Ra . Takto připravené vzorky byly 1x denně promíchány. Doba louhování byla stanovena u první kádinky na jeden týden, u druhé kádinky na dva týdny. Po uplynutí stanovené doby louhování byly vzorky přefiltrovány a rozděleny na rozpuštěnou a nerozpuštěnou složku.

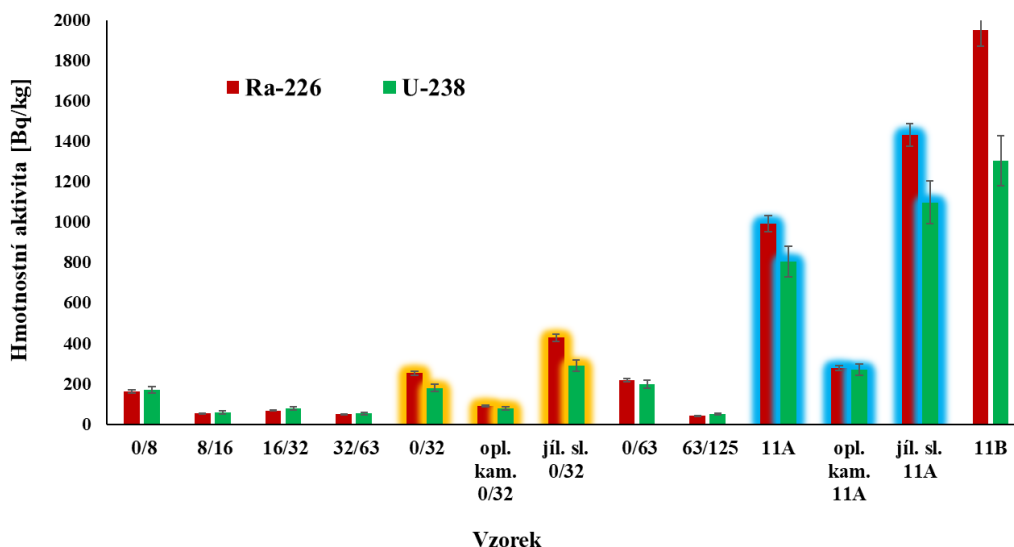
V rozpuštěné složce vzorků vody po vyluhování byla následně stanovena hmotnostní koncentrace uranu a objemová aktivita radionuklidu ^{226}Ra . V nerozpuštěné složce vzorků vody po vyluhování byla vážením stanovena hmotnostní koncentrace nerozpuštěné složky a po dosažení radioaktivní rovnováhy mezi radionuklidem ^{226}Ra a přeměnovými produkty radonu byla gamaspektrometricky stanovena objemová aktivita radionuklidů ^{226}Ra a ^{238}U . Z objemové aktivity radionuklidu ^{238}U byla vypočtena hmotnostní koncentrace přírodního uranu za předpokladu přírodního zastoupení jednotlivých izotopů uranu v daných vzorcích.

Jílovité složky vzorků byly vyluhovány stejným způsobem jako dodané vzorky. V rozpuštěné složce vzorků vod po vyluhování jílovité složky vzorků byly po přefiltrování radiochemicky stanoveny hmotnostní koncentrace uranu a objemová aktivita radionuklidu ^{226}Ra . V nerozpuštěné složce vzorků vod po vyluhování jejich jílovité složky byla stanovena hmotnostní koncentrace nerozpuštěné složky, objemová aktivita ^{226}Ra a ^{238}U a přepočet

na hmotnostní koncentraci přírodního uranu stejným způsobem jako v nerozpuštěné složce dodaných vzorků.

4. Výsledky hmotnostních aktivit dlouhodobých radionuklidů v kamenivu a haldovině

Porovnání hmotnostních aktivit radionuklidů ^{226}Ra a ^{238}U v kamenivu, haldovině a námi upravených vzorcích je shrnuto na *obr. 1*. U vzorků, které byly v laboratoři přetříděny na kamenivo a jílovitou složku, jsou stanovené hodnoty hmotnostní aktivity jednotlivých radionuklidů podbarveny oranžově, resp. modře.

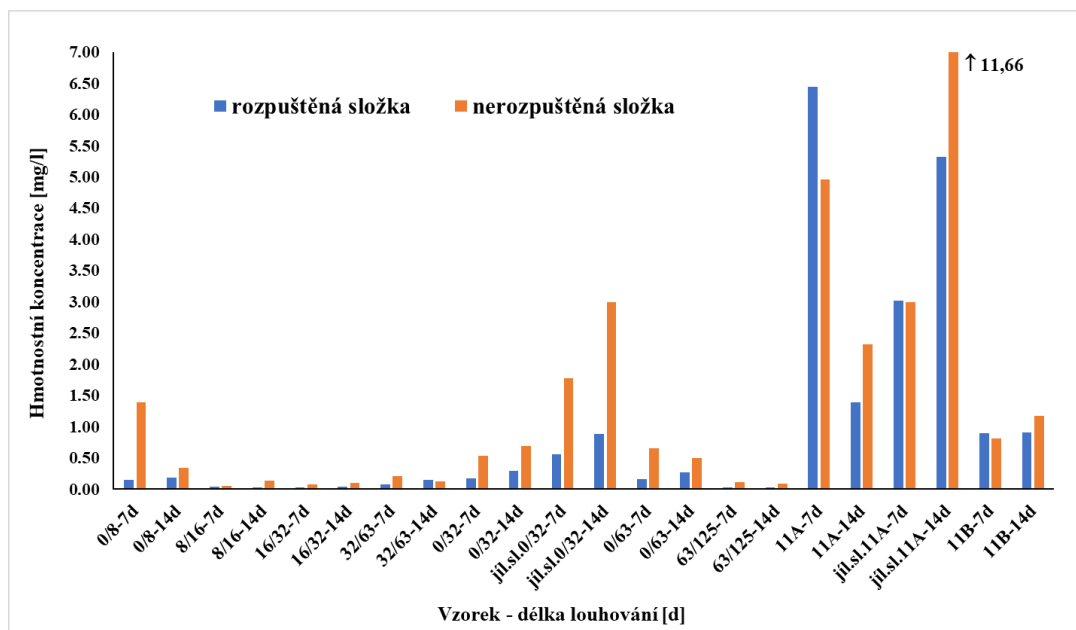


Obr. 1. Hmotnostní aktivity ^{226}Ra a ^{238}U ve vzorcích kameniva a haldoviny

U vzorků, které obsahovaly velké množství jílovité složky a byly roztříděny na kamenivo a jílovitou část, je stanovená hmotnostní aktivity radionuklidů z uran-radiové řady v jílovité složce podstatně vyšší než v opláchnutém kamenivu.

5. Výsledky stanovené hmotnostní koncentrace uranu a objemové aktivity ^{226}Ra v dešťové vodě po vyluhování

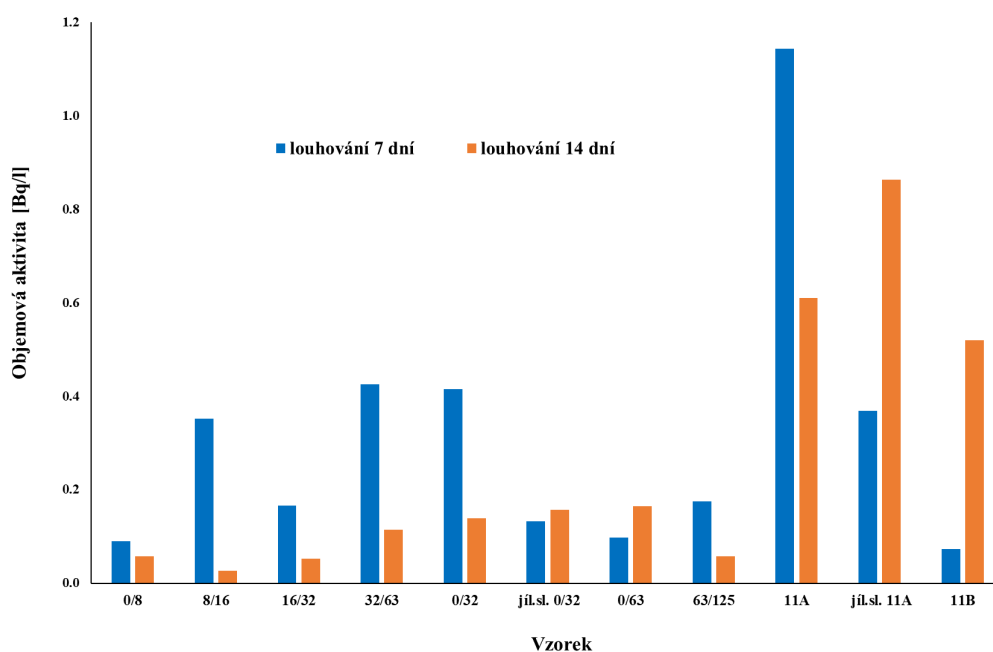
Na *obr. 2–4* jsou zobrazeny stanovené hodnoty hmotnostní koncentrace uranu a objemové aktivity radionuklidu ^{226}Ra ve vzorcích dešťové vody po vyluhování, a to jak v rozpuštěné, tak i v nerozpuštěné složce vzorků vod. Rozdílné hodnoty obou parametrů ve vzorcích vody po louhování po dobu 7 nebo 14 dní jsou dány tím, že v kádinkách byly různé vzorky a oba výše zmíněné radionuklidy nejsou v dodaných vzorcích distribuovány homogenně.



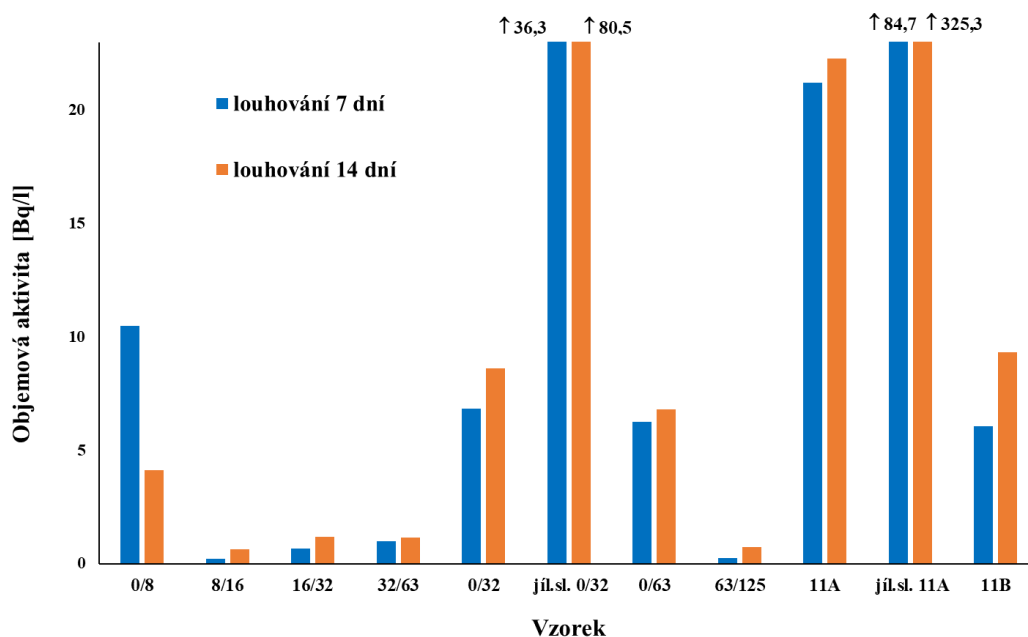
Obr. 2. Hmotnostní koncentrace uranu v rozpuštěné a nerozpuštěné složce vzorků vody

Ve vzorcích dešťové vody po vyluhování vzorků kameniva a haldoviny, jež obsahují vysoký podíl jílovité složky, jsou patrné mnohem vyšší stanovené hodnoty hmotnostní koncentrace uranu i objemové aktivity radionuklidu ^{226}Ra , a to jak v rozpuštěné, tak i v nerozpuštěné složce vzorků vody než u ostatních vzorků.

U většiny vzorků jsou stanovené hodnoty objemové aktivity radionuklidů ^{226}Ra v rozpuštěné složce vzorků při louhování po dobu jednoho týdne vyšší než při louhování po dobu dvou týdnů. Tato skutečnost může být vysvětlena dlouhou dobou interakce neokyselené vody se skleněnými stěnami kádinek, čímž mohlo docházet k depozici radionuklidů, zejména ^{226}Ra .

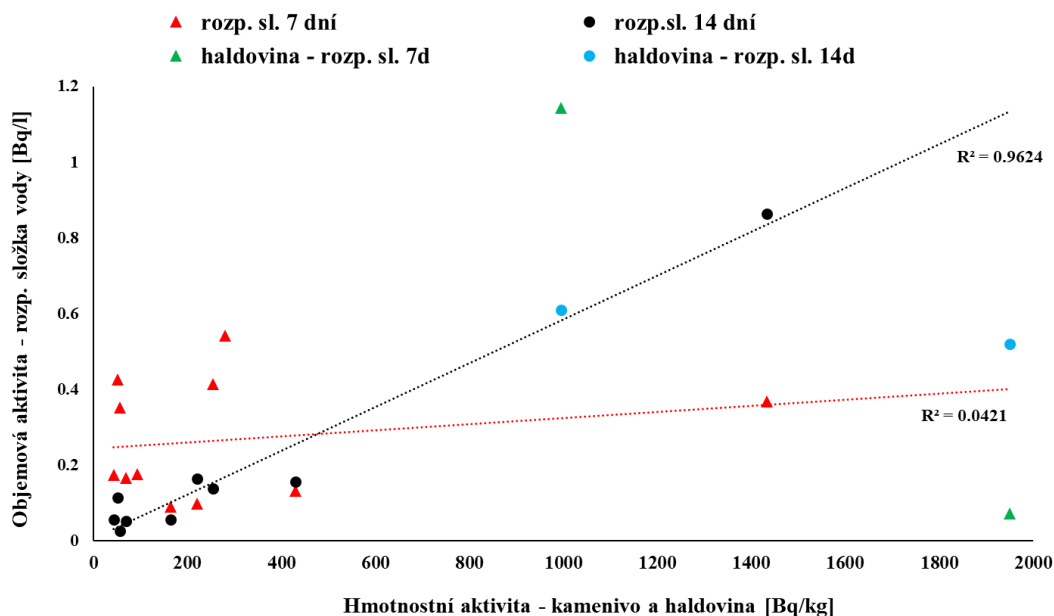


Obr. 3. Objemová aktivita radionuklidu ^{226}Ra v rozpuštěné složce vzorků vody

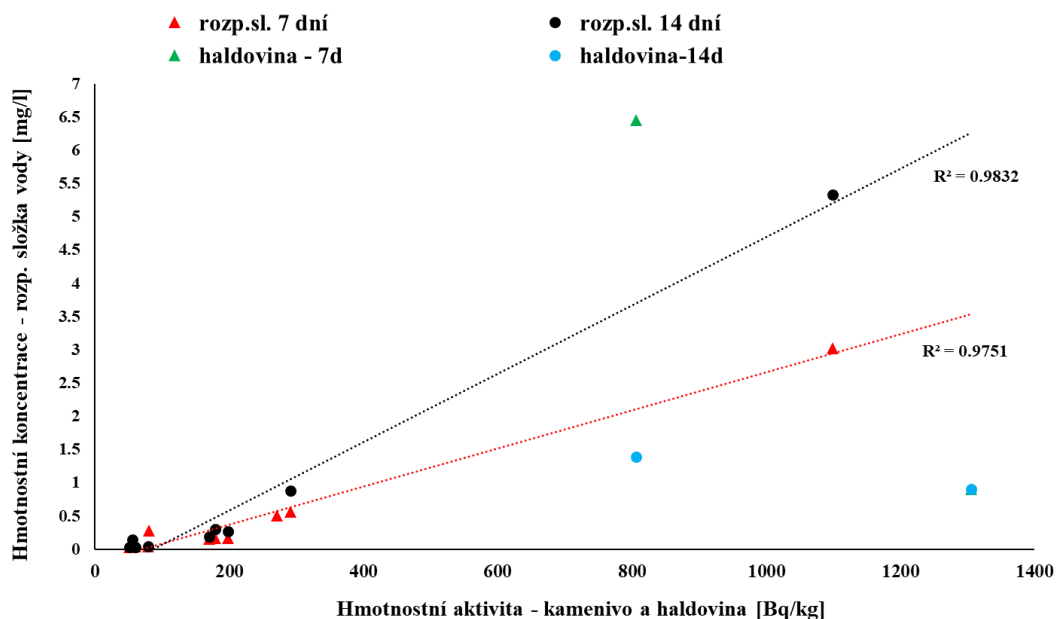


Obr. 4. Objemová aktivita radionuklidu ^{226}Ra v nerozpuštěné složce vzorků vody

Rovněž byla zkoumána závislost mezi hmotnostní koncentrací radionuklidů ^{226}Ra a ^{238}U ve vzorcích kameniva, respektive haldoviny, a hmotnostní koncentrací uranu a objemovou aktivitou radionuklidu ^{226}Ra v rozpuštěné složce vzorků vody po vyluhování viz *obr. 5* a *6*.



Obr. 5. Závislost objemové aktivity radionuklidu ^{226}Ra ve vzorcích vody na hmotnostní aktivitě tohoto radionuklidu ve vzorcích kameniva a haldoviny



Obr. 6. Závislost hmotnostní koncentrace uranu ve vzorcích vody na hmotnostní aktivitě radionuklidu ^{238}U ve vzorcích kameniva a haldoviny

Z obr. 5 je zřejmé, že závislost objemové aktivity radionuklidu ^{226}Ra v rozpuštěné složce vzorků vody na hmotnostní aktivitě tohoto radionuklidu se projevuje pouze u vzorků vody po louhování kameniva po dobu 14 dní. Z obr. 6 je patrné, že lineární závislost hmotnostní koncentrace uranu v rozpuštěné složce vzorků vody na hmotnostní aktivitě radionuklidu ^{238}U se projevuje u vzorků vody po louhování kameniva po dobu jak 7, tak i 14 dní.

6. Závěr

Ve vzorcích kameniva a haldoviny z odvalů, jež byly použity při stavbě dálnice D4, byly gamaspektrometricky stanoveny hmotnostní koncentrace dlouhodobých radionuklidů. Následně byl realizován vyluhovací experiment, který umožnil stanovit objemovou aktivitu radionuklidu ^{226}Ra a hmotnostní koncentraci uranu z jednotlivých frakcí použitého kameniva a haldoviny.

Na základě realizovaných experimentů lze konstatovat, že za výše popsanych extrémních laboratorních podmínek se z jílovité složky pevných vzorků radionuklidy (zejména uran) pravděpodobně louhují do rozpuštěné složky vody více než z kameniva.

Rozdílné hodnoty obou výše uvedených parametrů ve vzorcích vody po louhování po dobu 7 nebo 14 dní jsou dány tím, že v kádinkách byly různé vzorky a oba výše zmíněné radionuklidy nejsou v dodaných vzorcích distribuovány homogenně.

7. Poděkování

Tento článek byl připraven z programového financování podprogramu 175 303 – Prevence a opatření ochrany obyvatelstva před dopady jaderných, chemických a biologických zátěží životního prostředí a teroristických hrozeb.

Literatura

- [1] BURIAN, I., VESELÁ, Z., KOZLOVSKÁ, M. (2022). Interní metodika M-5 – Stanovení aktivity gamaspektrometrickou metodou.
- [2] Doporučením SÚJB DR-Ro-5.3(Rev.0.0). Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 95 odst. 1 písm. b) atomového zákona.
- [3] VESELÁ, Z., BURIAN, I., BUŠTOVÁ, J. (2014). Interní metodika M-13 – Stanovení uranu ve vybraných typech vzorků.
- [4] VESELÁ, Z., BURIAN, I., BUŠTOVÁ, J. (2014). Interní metodika M-14 – Stanovení objemové aktivity ^{226}Ra ve vybraných typech vzorků

RADIOACTIVE ELEMENTS LEACHING FROM ROCK MATERIAL

Keywords: leaching of radionuclides, dumps, uranium in water, ^{226}Ra in water

As part of the completion of the D4 highway, between the towns of Příbram and Písek, rock material from the uranium mining dumps that took place in the vicinity of Příbram is being used. As part of the SONS' control activities, samples of used aggregate were taken, and in the National Institute for Nuclear, Chemical and Biological Protection laboratories, a leaching experiment was performed with these samples.

The mass concentrations of long-lived radionuclides were precisely determined using gamma spectrometry in each sample. Following this, a standardized procedure involving rainwater was used to leach the samples. The resulting water samples were then filtered, and the mass concentration of uranium and the volume activity of the radionuclide ^{226}Ra were determined in both the dissolved and undissolved components.

KONTINUÁLNÍ STANOVENÍ AKTIVITY GAMA VE SRÁŽKOVÝCH VODÁCH

Michal Fejgl¹, Miroslav Hýža¹, Karin Fantínová¹

¹*Státní ústav radiační ochrany*

e-mail: michal.fejgl@suro.cz

Klíčová slova: srážková voda, aktivita gama, kontinuální měření.

Abstrakt

Vývoj přístrojů umožňujících kontinuální stanovení radioaktivity ve vzorcích životního prostředí je součástí všeobecného trendu směřujícího k získání datových podkladů umožňujících např. charakterizovat aktuální migraci radioaktivní kontaminace nebo zpětné stanovení místa jejího úniku.

V konferenčním příspěvku bude prezentováno aktuálně vyvíjené zařízení umožňující kontinuální stanovení aktivity gama ve srážkových vodách. Zařízení je vybaveno sběračem srážkové vody o ploše 1 m², odebraná voda je následně proměřována pomocí třípalcového NaI(Tl) detektoru v průtočné Marinelliho nádobě. Průtok vzorku je poháněn gravitačně, rychlost průtoku je řízena softwarem prostřednictvím redukčního ventilu.

Vlastnosti zařízení jsou koncipovány tak, aby umožňovalo příznivé detekční vlastnosti při rozsahu objemu analyzované vody 0,5 až 6 l.

Součástí příspěvku bude prezentace konstrukce vyvíjeného zařízení a citlivosti detekce stanovené v poloterénních podmínkách.

Výzkum byl podpořen projektem VK01020090.

TRITIUM V POVODÍ VLTAVY A LABE

**Diana Marešová¹, Magdaléna Balejová², Jiří Medek³, Barbora Sedlářová¹,
Eva Juranová¹**

¹*Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i*

²*Povodí Vltavy, státní podnik*

³*Povodí Labe, státní podnik*

e-mail: diana.maresova@vuv.cz

Klíčová slova: tritium, povrchová voda, odpadní voda, srážky

Abstrakt

V příspěvku byl proveden přehled o zdrojích tritia v povodí Vltavy a Labe a existujících datech o tritiu v povodí a jejich charakteristikách v závislosti na účelu jejich realizace. Dále byl hodnocen vývoj objemových aktivit tritia ve srážkových a povrchových vodách. Na závěr byla vyhodnocena bilance tritia depozicí tritia ve srážkách na české části povodí Labe a na odtoku z České republiky (ČR) v profilu Labe Hřensko.

1. Úvod

Tritium je kosmogenní radioizotop vodíku s poločasem rozpadu 12,32 roku [1]. V přírodě vzniká především v horních vrstvách atmosféry působením kosmického záření. Rovněž vzniká při umělých jaderných reakcích v souvislosti s využíváním jaderné energie. Doposud největším zdrojem tritia v atmosféře byly atmosférické testy jaderných zbraní v padesátých a šedesátých letech minulého století. Ve srovnání s atmosférickými testy jaderných zbraní jsou ostatní antropogenní zdroje tritia v globálním měřítku minoritní a mají spíše lokální význam [2]. Díky jeho fyzikálně-chemickým vlastnostem má tritium široké využití jako stopovač, zejména v oblasti hydrologických a hydrogeologických aplikací. V podmínkách ČR je tritium nejvíce spojováno s provozem našich jaderných elektráren zejména proto, že při běžném provozu jaderné elektrárny se z hlediska celkových aktivit jedná o nejvýznamnější radionuklid v kapalných výpustích. V současnosti se kromě očekávané dostavby nových jaderných zdrojů začíná diskutovat i možnost využití malých modulárních reaktorů na místo postupně odstavovaných tepelných elektráren. Lze tedy očekávat zvýšený zájem o problematiku tritia v prostředí.

Na data o tritiu v životním prostředí jsou kladeny odlišné požadavky v závislosti na účelu. Jiné nároky jsou kladeny na data pro kontrolu dodržování limitů v souvislosti s provozem jaderných zařízení, jiné pro stopovací aplikace. Je tedy nutná komplexní znalost o jeho zdrojích v zájmových povodích. S ohledem na výše uvedené byl proveden přehled o zdrojích tritia, existujících datech a vývoji objemových aktivit tritia ve srážkových a povrchových vodách v povodí Vltavy a Labe.

2. Existující data

Rozbor stavu existujících dat šíření umělých radionuklidů včetně tritia v tocích ovlivněných provozem našich jaderných elektráren byl jedním z cílů projektu MURAD (TK02010064 „Koncepce nového systému modelování šíření umělých radionuklidů v hydrosféře včetně

asimilace dat pro potřeby státu při běžném provozu jaderných zařízení i jeho havárii s dopadem na okolí“) [3].

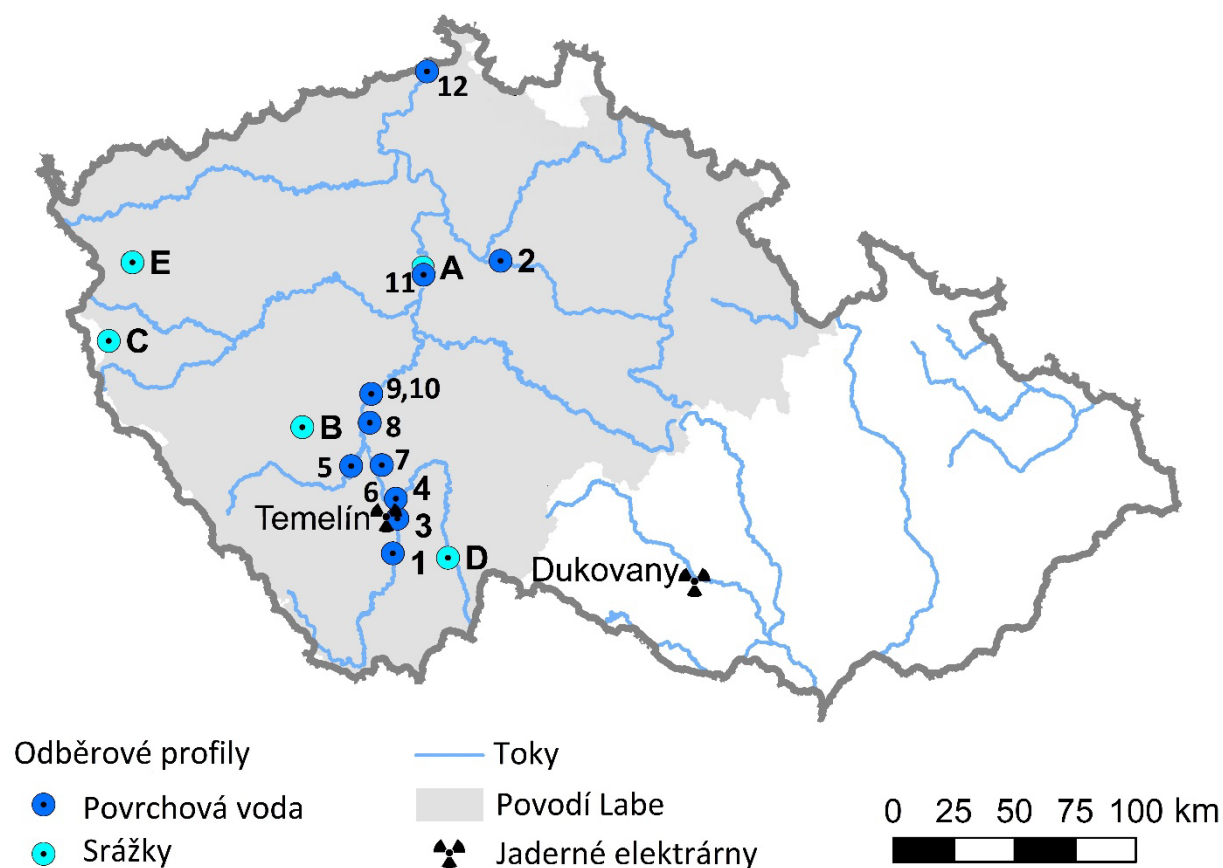
Hlavní databází shromažďující data o radioaktivitě v životním prostředí ČR je databáze MonRaS provozovaná Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) [4], kde jsou shromažďována data vznikající v rámci monitorování podle Národního programu monitorování [5]. Tato databáze obsahuje i data předávaná provozovatelem jaderných elektráren, který je získává v rámci svých programů monitorování okolí („*Program monitorování okolí Jaderné elektrárny Temelín*“, „*Program monitorování okolí Jaderné elektrárny Dukovany*“). Kromě výše uvedeného jsou data o objemových aktivitách umělých radionuklidů pravidelně sbírána také v rámci aktivit jiných subjektů. Jedná se zejména o monitoring kvality povrchových vod pro hodnocení stavu vod, který zajišťují podniky Povodí. Tato data jsou dále shromažďována Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) v databázi Informační systém veřejné správy – VODA [6], všechna data však nejsou volně zveřejňována. Dostupné informace byly shromážděny ve specializované veřejné databázi [7] a specializované mapě s odborným obsahem [8]. Data jsou tedy pořizována pro různé účely a též jejich charakteristiky mohou být různé. Pro jednotlivé aplikace tak nemusejí být všechna dostupná data využitelná, případně nemusejí ani existovat.

V příspěvku byla použita data realizovaná v rámci „*Programu monitorování okolí ETE*“ (dodavatel dat Laboratoře radiační kontroly okolí, dále uváděné jako ETE) [9], „*Programu sledování a hodnocení vlivu jaderné elektrárny Temelín na životní prostředí*“ (dodavatel dat Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., dále jen VÚV TGM) [10, 11], sledování Povodí Vltavy, státní podnik (dále PVL), Povodí Labe, státní podnik (dále PL) (dodavatel dat VÚV TGM) a MonRas (dodavatel dat VÚV TGM) [4]. Podrobné zpracování dat bylo provedeno pro období 2016–2022. Odběrová místa a jejich základní charakteristika jsou uvedeny v *obr. 1* a *tab. 1*.

3. Zdroje tritia v povodí Vltavy a Labe

Jak bylo uvedeno výše, největším zdrojem tritia v atmosféře, který je stále měřitelný, byly testy jaderných zbraní v padesátých a šedesátých letech minulého století. Globální přenos atmosférou je tak stále významným zdrojem tritia v hydrosféře i v lokalitách bez přímého vlivu jaderného zařízení. Existuje celosvětová síť, jež zveřejňuje údaje o izotopech, včetně tritia ve srážkách (Global Network of Isotopes in Precipitation GNIP) [12], kterou zajišťuje Mezinárodní atomová agentura se sídlem ve Vídni. Zejména pro účely využití tritia jako stopovače např. v hydrogeologických studiích je nutná znalost dlouhodobého vývoje objemové aktivity tritia ve srážkách v dané lokalitě. Pro oblast střední Evropy, tedy i ČR, se obvykle používají záznamy z Vídně (Rakousko) [12], kde existuje dlouhodobá řada sledování od šedesátých let minulého století, protože v ČR takto dlouhodobé záznamy nejsou.

Ve VÚV TGM je dlouhodobě sledována objemová aktivita tritia ve srážkách v lokalitách Praha Podbaba a Kocelovice. Vzorky srážek jsou odebírány jedenkrát měsíčně (směsný měsíční vzorek). Základní vyhodnocené charakteristiky pro uvedené lokality jsou v *tab. 2*. Průměrná objemová aktivita tritia ve srážkách ve sledovaném období byla cca 1 Bq/l.



Obr. 1. Mapa odběrových míst vzorků v povodí Vltavy a Labe

Tab. 1. Základní charakteristika odběrových míst

Povrchová voda		Zdroj dat	Počet vzorků za rok
1	Vltava Hluboká	PVL	12
2	Labe Lysá	PL	12
3	Vltava Hněvkovice	ETE VÚV TGM	12 4
4	Lužnice Koloděje	VÚV TGM	4
5	Otava Topělec	VÚV TGM	4
6	Vltava Hladná	ETE VÚV TGM	12 4
7	Podolský most	PVL	7
8	Žďákovský most	PVL	7
9	VN Orlík nad hrází	PVL	7
10	Vltava Solenice	PVL ETE	12 12
11	Vltava Praha Podolí	PVL MonRas	12 52
12	Labe Hřensko	PL	12
Srážky		Období sledování	
A	Praha Podbaba	2001–2022	12
B	Kocelovice	2006–2022	12
C	Přimda	2001–2005	12
D	Lužnice	2001–2012	12
E	Závišín	2001–2005	12

Tab. 2. Charakteristické hodnoty vyhodnocené pro průměrné roční objemové aktivity tritia ve srážkách v období 2016–2022

	Minimum	Maximum	Průměr	Medián
	[Bq/l]			
Praha Podbaba	1,09	1,40	1,21	1,18
Kocelovice	0,95	1,22	1,06	1,04
Srážky ČR (pozadí)	1,06	1,31	1,13	1,09

Významným zdrojem tritia v povodí Vltavy a Labe je jaderná elektrárna Temelín, jež od svého uvedení do provozu uvolňuje průměrně 40 TBq/r [9]. Pro úplnost uvádíme ještě další zdroj, kterým je ÚJV Řež, a. s. [13]. Jedná se o významně menší zdroj, jenž uvolňuje tritium v kapalných výpustech nepravidelně. Údaje o výpustech v povodí jsou shrnuty v tab. 3.

Tab. 3. Údaje o kapalných výpustech tritia v povodí Vltavy a Labe

	Minimum	Maximum	Průměr	Medián
	Bq/r			
ČEZ, a. s. JETE (2002–2022)	1,19E + 13	6,38E + 13	4,05E + 13	4,08E + 13
ÚJV Řež, a. s. (2016–2022)	0,00	4,87E + 11	4,66E + 10	3,87E + 09

4. Hodnocení tritia v povrchových vodách

Jak bylo uvedeno výše, data o tritiu jsou pořizována z různých důvodů, nejčastěji pro zajištění kontroly dodržování autorizovaných limitů, proto mohou mít odlišné charakteristiky, především s ohledem na různou citlivost použité metody, četnost vzorkování, případně vzdálenost od zdroje. Tyto podrobnosti je nutné zohlednit při využití dat. Zejména pro účely hodnocení pozadí má zásadní vliv citlivost analytické metody zvolená na základě účelu měření. Z tohoto důvodu byly podrobně zpracovány roční průměrné aktivity z profilů bez přímého vlivu elektrárny (tab. 4). Pro účely dodržování autorizovaných limitů je dostačující méně citlivá metoda s minimy na úrovni 2,6–3,0 Bq/l. Ze zpracování dat z ostatních profilů s citlivější analytickou metodou je však zřejmé, že reálné pozadí tritia nemůže být méně citlivou metodou postiženo. Proto pro hodnocení pozadí v povrchových vodách nebyla zahrnuta data ETE. Průměrná objemová aktivita tritia v tocích bez přímého vlivu jederného zařízení byla v hodnoceném období méně než 1 Bq/l.

Tab. 4. Charakteristické hodnoty vyhodnocené pro roční průměrné objemové aktivity tritia v profilech bez přímého vlivu JETE v období 2016–2022

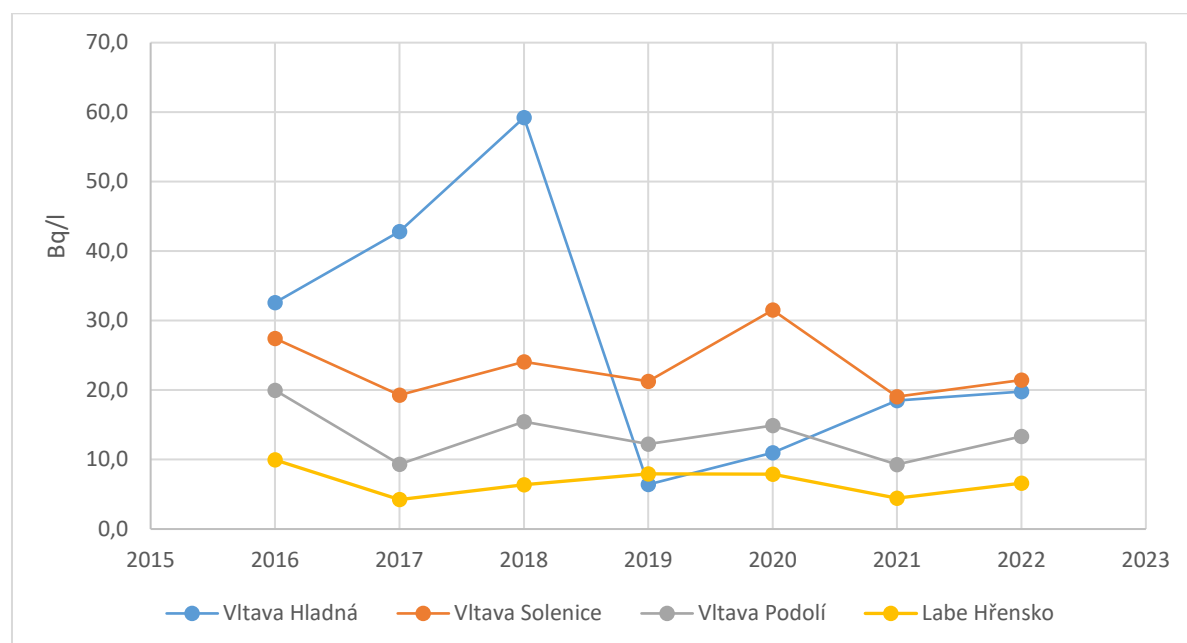
	Minimum	Maximum	Průměr	Medián
	Bq/l			
Vltava Hluboká	0,81	0,91	0,86	0,87
Labe Lysá	0,71	0,85	0,77	0,78
Lužnice Koloděje	1,02	1,29	1,16	1,20
Otava Topělec	1,05	1,21	1,09	1,06
Vltava Hněvkovice	0,79	1,13	1,03	1,06
Toky ČR (pozadí)	0,87	0,95	0,90	0,89
Vltava Hněvkovice (ETE)	2,6	3,0	2,8	2,8

V případě hodnocení profilů ovlivněných výpustmi z ETE nabývají na významu další jmenované vlivy, tj. četnost vzorkování, případně vzdálenost od zdroje. Byla provedena analýza dat z období 2016–2022 od různých dodavatelů dat na vybraných profilech (*tab. 5*).

Tab. 5. Charakteristické hodnoty vyhodnocené pro různé dodavatele a v profilech ovlivněných výpustmi z ETE v období 2016–2022, hodnoty v závorce se vztahují pro roční průměrné objemové aktivity (RP)

	Vltava Hladná		Vltava Solenice		Vltava Podolí	
	VúV TGM(RP)	ETE (RP)	PVL (RP)	ETE (RP)	PVL (RP)	MonRas (RP)
N za rok	4	12	12	12	12	52
	Bq/l					
Minimum	1,3 (1,9)	2,6 (4)	6,8 (14,9)	9,8 (20,3)	2,1 (8,7)	2,6 (9,2)
Maximum	104,6 (28)	493,6 (78,3)	49,8 (28,2)	59,1 (35,5)	45,8 (20,3)	50,9 (19,9)
Průměr	9,4	33,1	21,8	25,6	13,7	13,5
Medián	2,0 (6,5)	3,1 (24,1)	18,1 (18)	22,7 (23)	12,0 (12)	12,0 (12,9)

Z *tab. 5* je zřejmé, že vzhledem k blízkosti zdroje a diskontinuálnímu vypouštění odpadních vod obsahujících tritium jsou v profilu Vltava Hladná zjištěny objemové aktivity ve velkém rozpětí. Z vyhodnocených charakteristik vyplývá, že rozložení hodnot není rovnoměrné, zejména při četnosti vzorkování 4x ročně není zjištěná průměrná hodnota vypovídající. I v profilu Vltava Solenice, kde oba subjekty vzorkují 12x ročně, je rozdíl středních hodnot od dvou dodavatelů významný. Naopak v profilu Vltava Podolí už vzhledem ke vzdálenosti od zdroje není významný rozdíl středních hodnot hodnocených souborů s různými četnostmi vzorkování. Vývoj ročních průměrných aktivit tritia při zahrnutí dat od různých dodavatelů v podélném profilu Vltavy a Labe v hodnoceném období 2016–2022 je znázorněn v grafu na *obr. 2*. Ze souhrnného hodnocení je zřejmý pokles průměrných hodnot v podélném profilu v důsledku ředění, s výjimkou profilu Vltava Hladná, kde je zřejmé, že při dané četnosti vzorkování není postiženo reálné rozložení výpustí.

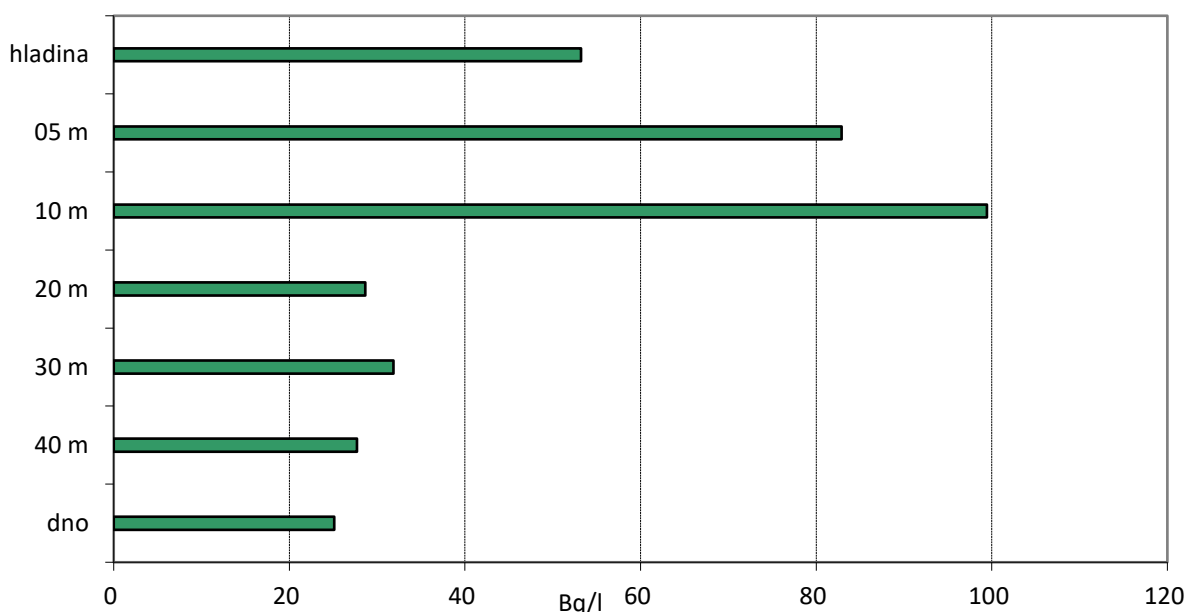


Obr. 2. Vývoj ročních průměrných aktivit tritia v podélném profilu Vltavy a Labe v období 2016–2022

Specifickou lokalitou z hlediska sledování tritia v povrchové vodě je vodní nádrž Orlík, kde dochází ke změnám nejen v podélném, ale i vertikálním profilu. Sledování objemové aktivity tritia provádí PVL ve vertikálně odebraných vzorcích v profilech Vltava Podolský most, Vltava Žďákovský most a VN Orlík hráz. Vzorky jsou odebírány jednou za měsíc, obvykle v období duben až říjen. Hlavními faktory ovlivňujícími vývoj objemových aktivit ve vertikálním i podélném profilu VN Orlík jsou zejména diskontinuální vypouštění odpadních vod obsahujících tritium z jaderné elektrárny Temelín, hydrologické a meteorologické podmínky a sezonní jevy jako cirkulace nebo teplotní zonace v nádrži. Vyhodnocené rozmezí hodnot objemových aktivit a ročních průměrných aktivit je uvedeno v *tab. 6*. Příklad průběhu objemových aktivit tritia ve vertikálním profilu je znázorněn na *obr. 3*.

Tab. 6. Zaznamenané minimální a maximální hodnoty ve VN Orlík a minimální a maximální roční průměrné hodnoty (RP) v období 2016–2022

	Minimum	Maximum	Minimum (RP)	Maximum (RP)
	Bq/l			
VNO Podolský most	1,9	255,0	21,1	57,0
VNO Žďákovský most	2,4	99,4	16,7	32,6
VNO hráz	4,8	74,0	15,8	33,1



Obr. 3. Příklad průběhu objemové aktivity tritia ve vertikálním profilu VN Orlík v odběrovém místě Žďákovský most

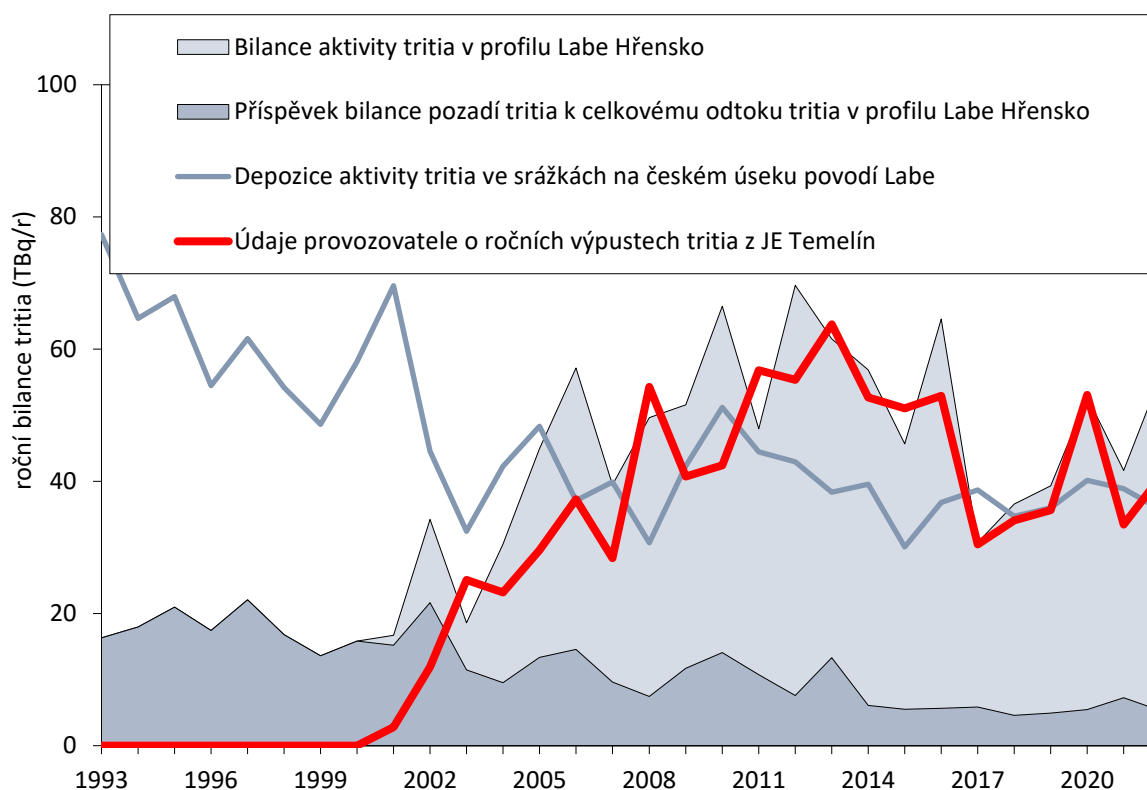
5. Vyhodnocení bilance tritia v povodí Vltavy a Labe

S použitím dříve publikovaných výsledků [14], výsledků sledování objemové aktivity tritia v profilu Labe Hřensko a ve srážkách v ČR prezentovaných v příspěvku a dále údajů ČHMÚ o ročních průtocích v profilu Labe Hřensko a množství srážek v české části povodí Labe [15], byla vypočtena depozice tritia ve srážkách a bilance na odtoku z ČR. Zpracování včetně porovnání s údaji o výpustích tritia podle ČEZ a. s., je uvedeno na *obr. 4*.

6. Závěr

V české části povodí Labe jsou hlavními zdroji tritia atmosférická depozice s doznívajícím vlivem testů jaderných zbraní v minulém století a provoz jaderné elektrárny Temelín. Objemová aktivita tritia ve srážkách i v povrchových vodách bez přímého vlivu ETE v hodnoceném období 2016–2022 byla přibližně 1 Bq/l. Dále jsou ve Vltavě a Labi v důsledku vlivu výpustí z ETE zjišťovány hodnoty na úrovni jednotek až desítek Bq/l.

Data o tritiu jsou pořizována různými dodavateli pro různé účely, nejčastěji se jedná o kontrolu dodržování autorizovaných limitů. Proto se charakteristiky pořizovaných dat mohou lišit a je třeba zvážit, zda jsou vyhovující pro požadované účely při jejich dalším využití.



Obr. 4. Porovnání bilance tritia na profilu Labe Hřensko s depozicí tritia na české části povodí Labe a údaji o ročních výpustích tritia z ETE

7. Poděkování

Příspěvek byl připraven za finančního přispění institucionální podpory Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka a byly v něm využity výsledky projektu „*Koncepce nového systému modelování šíření umělých radionuklidů v hydrosféře včetně asimilace dat pro potřeby státu při běžném provozu JEZ i jeho havárii s dopadem na okolí*“ (TK02010064), který byl financován státní podporou Technologické agentury ČR v rámci „*Programu THÉTA*“.

Literatura

- [1] LUCAS, L. L., UNTERWEGER, M. P. Comprehensive review and critical evaluation of the half-time of tritium. J Res Natl Inst Stand Technol., 2000, 105: 541–549.

- [2] PENZHORN, R. D. Natural and man-made sources of tritium: applications of tritium [Kap.] In: TOSTI, S., GHIRELLI, N. (eds.) Tritium: Production, Uses and Environmental Impact. New York: Nova Publishers 2013, s. 339–354, ISBN 978-1-62417-270-0.
- [3] JURANOVÁ E., SEDLÁŘOVÁ, B., MAREŠOVÁ, D., POHLOVÁ, I., NOVÁK, M.; DAVÍDKOVÁ, Z., MAŘÍKOVÁ, Š.. Umělé radionuklidy v povrchových vodách v okolí jaderných elektráren Temelín a Dukovany. In: Sborník konference Radiologické metody v hydrosféře 23, Chrudim, 2023. ISBN 978-80-88238-27-0.
- [4] MonRaS – Monitorování radiační situace [on-line]. B.m.: SÚJB. Dostupné z: https://www.sujb.cz/aplikace/monras/?lng=cs_CZ
- [5] Národní program monitorování, Monitorování radiační situace na území České republiky [on-line]. SUJB. 2018. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/npm>
- [6] Informační systém veřejné správy – VODA [on-line]. B.m.: ČHMÚ. Dostupné z: <https://isvs.chmi.cz/ords/f?p=11009:HOME:15098740145438::::>
- [7] JURANOVÁ, E., STRNAD, F., SEDLÁŘOVÁ, B., MAREŠOVÁ, D., BERAN, A., POHLOVÁ, I. Databáze objemových aktivit umělých radionuklidů v tocích [on-line]. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2022. Dostupné z: <https://www.vuv.cz/koncepce-noveho-systemu-modelovani-sireni-umelych-radionuklidu-v-hydrosfere/aplikovane-vysledky-x-koncepce-noveho-systemu-modelovani-sireni-umelych-radionuklidu-v-hydrosfere/databaze-objemovych-aktivit-umelych-radionuklidu-v-tocich/>
- [8] Mapa objemových aktivit umělých radionuklidů v tocích [on-line]. [map]. 2022. vyd. B.m.: VÚV TGM, v. v. i. nedatováno. Dostupné z: www.dibavod.cz/murad-mapa
- [9] POSPÍCHAL, J. Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2016–2022, ČEZ, a. s., Jaderná elektrárna Temelín, 2017–2023.
- [10] HANSLÍK, E. a kol. Sledování a hodnocení jakosti povrchových a podzemních vod a jejich změn v souvislosti s vlivem výstavby a provozu jaderné elektrárny Temelín na její okolí, VÚV TGM., Praha, 2002–2019.
- [11] MAREŠOVÁ, D. a kol. Sledování a hodnocení jakosti povrchových a podzemních vod a jejich změn v souvislosti s vlivem výstavby a provozu jaderné elektrárny Temelín na její okolí. VÚV TGM., Praha, 2020–2023.
- [12] Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Dostupné z: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html
- [13] Zpráva o výsledcích činnosti Státního úřadu pro jadernou bezpečnost při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2016–2022, Část II, SÚJB 2017–2023. Dostupné z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocní_zpravy/
- [14] MAREŠOVÁ, D., HANSLÍK, E., JURANOVÁ, E., SEDLÁŘOVÁ, B. (2018) Stanovení velmi nízkých objemových aktivit tritia pro potřeby využití tritia jako stopovače, VTEI, (60), 4: 4–8.
- [15] Hydrologická ročenka České republiky 2016–2022, ČHMÚ, 2023, dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/hydro/hydrologicke_rocenky

TRITIUM IN THE VLTAVA AND ELBE RIVERS

Keywords: Tritium, surface water, wastewater, precipitation

The paper provided an overview of tritium sources in the Vltava and Elbe basins; existing data on tritium in the watershed and their characteristics depending on the purpose of their realization. The evolution of tritium volume activities in precipitation and surface water was evaluated. Tritium balance was evaluated in the tritium deposition in precipitation in the Czech part of the Elbe river basin and in the outflow from the Czech Republic in the Elbe Hřensko profile.

SLEDOVANIE ÚROVNE TRÍCIA V HRANIČNÝCH TOKOCH SLOVENSKA

Enrico Mariaca¹, Mária Vojtková¹, Gabriela Wallová¹

¹Výskumný ústav vodného hospodárstva, Nábr. arm. gen. L. Svobodu 5 (7), 812 49 Bratislava
e-mail: enrique.mariaca@vuvh.sk

Kľúčové slová: monitoring, trícium, rádioaktivita, hraničné toky, Dunaj, Tisa

Abstrakt

Sledovanie úrovne trícia v hraničných tokoch Slovenska sa na Výskumnom ústave vodného hospodárstva (VÚVH) v Bratislave uskutočňuje už od 80. rokov minulého storočia. V rokoch 2013–2021 prebiehala na VÚVH v Bratislave v rámci Kohézneho fondu III. etapa monitorovania a hodnotenia stavu vôd. Táto etapa zahŕňala zabezpečenie odberu vôd, sledovanie kvality povrchovej vody v hraničných tokoch, prípravu a spracovanie vzoriek, analytické práce a vyhodnocovanie výsledkov monitorovania. Momentálne prebieha na VÚVH v Bratislave už IV. etapa programu monitorovania vôd Slovenska, ktorá špecifikuje výkon monitorovania vôd realizovaného v zmysle európskej a národnej legislatívy a medzinárodných dohôd. V spolupráci so susednými krajinami Rakúskom a Maďarskom sa sleduje kvalita vody Dunaja, ktorá priteká z Rakúska na naše územie a opúšťa naše územie do Maďarska. Monitorujú sa hraničné toky, odbery sa vykonávajú súčasne s rakúskou alebo s maďarskou stranou a raz do roka sa porovnávajú a zjednocujú výsledky monitorovania.

V rámci monitorovania rieky Dunaj a ostatných hraničných tokov Slovenska sa na Oddelení rádiochémie VÚVH stanovovali vybrané rádiochemické ukazovatele. V našom príspevku sme sa zamerali na sledovanie úrovne trícia vo vzorkách povrchových vôd v hraničných tokoch Slovenska, a to západné toky – rieky povodia Dunaja a východné toky – rieky povodia Tisy.

1. Úvod

Slovensko je bohaté na rieky a potoky. Delí sa na tri hlavné povodia – povodie Dunaja (západné toky SR), povodie Tisy (východné toky SR) a povodie Dunajca (severné toky SR). Do Dunaja pritekajú zo severu rieky Morava, Váh, Nitra, Hron a Ipel'. Rieka Tisa má na území Slovenska dve hlavné zásobárne, povodie Bodrogu a povodie rieky Slaná. Až na území Rumunska sa Tisa vlieva do Dunaja. Dunajec odvádza vody z vlastného povodia aj z povodia rieky Poprad na sever do Visly, ktorá ústi do Baltského mora. Všetky slovenské rieky ústia do Čierneho alebo Baltského mora. Dunaj odvádza povrchové vody až z 96 % územia Slovenska [1].

Na obr. 1 sú znázornené všetky povodia Európy. Je zrejmé, že povodie Dunaja je jedno z najrozsiahlejších v Európe (druhé po Volge). Plocha povodia je 801 463 km² a dĺžka toku je 2 857 km [2].



Obr. 2. Povodia Európy [3]

Dunaj sa charakterizuje nie len ako rieka, ale aj ako chránená krajinná oblasť, ktorá vytvára podmienky na uchovanie pôvodného živočíšstva tejto oblasti [4]. Má nielen vysokú environmentálnu, ale aj ekonomickú a sociálnu hodnotu. Dunaj vo veľkej miere slúži ako zdroj pitnej, úžitkovej a závlahovej vody. Jeho vody sa využívajú v odvetviach poľnohospodárstva, priemyslu, v rybolove, v cestovnom ruchu a na rekreáciu. Rieka Dunaj slúži aj na výrobu energie, plavbu a konečnú likvidáciu odpadových vôd [5].

Slovenský úsek Dunaja je pomerne krátky, ale nemá jednotný charakter. Pri vstupe na naše územie má charakter vysokohorskej rieky. V strednom úseku pri Medveďove sa mení na nížinný.

Dunaj ako jedna z najdôležitejších riek v Európe je hlavným recipientom odpadových vôd z viacerých jadrovej-energetických zariadení. Už pri vstupe na územie Slovenska je Dunaj ovplyvnený odpadovými vodami jeho prítokov z okolí jadrových elektrární (ďalej len „JE“). V Nemecku je to JE Gundremmingen (riečka Dunaj) a JE Isar (prítok rieky Isar). V Rakúsku sú v prevádzke tri reaktory používané na výskum. V Českej republike je to len JE Dukovany

(prítok rieky Morava). Na našom území je to JE Jaslovské Bohunice (prítok rieky Váh) a JE Mochovce (prítok rieky Hron) [5]. Monitorovanie Dunaja preto zohráva kľúčovú úlohu pre stabilitu kvality životného prostredia. Voda v určitej miere obsahuje množstvo rádioaktívnych látok, ktoré nie sú vo všeobecnosti viazané na molekuly vody (s výnimkou trícia), ale na soli vo vode rozpustené, na suspendované látky a vo vode sa nachádzajúcej flóry a fauny [6].

Trícium je mäkký beta žiarič s polčasom rozpadu 12,3 rokov. Pri sledovaní jeho podielu rádioaktivity vo vodách je potrebné rozlišovať pôvod výskytu. Prírodný pôvod (pochádzajúci z prírodných zdrojov, tj. kozmogénny rádionuklid), ktorý vzniká nepretržite v horných vrstvách atmosféry interakciou kozmického žiarenia s jadrami atómov ^{14}N (n ^3H) ^{12}C a na zemský povrch sa transformuje vo forme zrážok. Umelý pôvod (pochádzajúci z ľudskej činnosti, tj. antropogénny rádionuklid), ktorého najvýznamnejším zdrojom v životnom prostredí je prevádzka zariadení JE.

Prevažná časť uvoľňovaného trícia z jadrovej energetiky je vo forme tríciových vod, ktorá sa podieľa na kontaminácii okolitých vodných systémov a indikuje znečistenie hydrosféry v okolí JE. Z legislatívnych predpisov Slovenskej republiky vyplývajú požiadavky na kvalitu povrchovej a podzemnej vody. Nariadenie vlády SR č. 269/2010, Z. z., v Prílohe č. 1, časť D definuje limitnú hodnotu pre trícium v povrchovej vode, uvedené v tab. 3 [7].

Tab. 1. Ukazovatele kvality vody – ukazovatele rádioaktivity

Ukazovateľ	Symbol	Jednotka	Limitná hodnota
Celková objemová aktivita alfa	$C_{A\alpha}$	Bq/l	0,5
Celková objemová aktivita beta	$C_{A\beta}$	Bq/l	1
Rádium 226	$C_{A226\text{Ra}}$	Bq/l	0,2
Urán prírodný	$U_{\text{nat.}}$	$\mu\text{g/l}$	50
Trícium	$C_{A3\text{H}}$	Bq/l	100,0
Stroncium	$C_{A90\text{Sr}}$	Bq/l	1,0
Cézium	$C_{A137\text{Cs}}$	Bq/l	0,5

Poznámka: Na hodnotenie kvality povrchovej vody pre ukazovatele podľa NV SR č. 269/2010, Z. z., v Prílohe č. 1, v časti D sa používa hodnota ročného aritmetického priemeru vypočítaná z nameraných hodnôt.

Kvalita povrchovej vody sa podľa STN 75 7220: 1999 (Kvalita vody. Kontrola kvality povrchových vôd [8]) zaraďuje do štyroch tried. U trícia sú jednotlivé triedy pre zodpovedajúce objemové aktivity uvedené v tab. 2.

Tab. 2. Triedy kvality povrchovej vody pre trícium.

Ukazovateľ	Jednotka	Trieda I.	Trieda II.	Trieda III.	Trieda IV.	Trieda V.
Trícium	Bq/l	< 100	< 500	< 1 000	< 5 000	< 5 000

2. Miesta odberu

V rámci IV. etapy programu monitorovania vôd Slovenska [9] sa odberové miesta pre rádiologický rozbor hraničných tokov v povodí rieky Dunaj a Tisa definovali nasledovne:

- Západné toky – povodie rieky Dunaj:
 - Dunaj - Bratislava ľavý a pravý breh (vstup na Slovensko)
 - Váh - Komárno
 - Hron - Kamenica
 - Ipel' - Salka

- *Dunaj - Szob – stred (výstup zo Slovenska)*
- Východné toky – povodie rieky Tisa:
 - *Bodrog - Streda nad Bodrogom*
 - *Bodva - Hostovce (Hidvégdó)*
 - *Hornád - Hidasnémeti*
 - *Roňava - Slovenské Nové Mesto*
 - *Slaná - Sajópuspoki*
 - *Sokoliansky potok - Tornyosnémeti*
 - *Tisa - Zemplénagárd*

Miesta odberu sú vyznačené na mape Slovenska (obr. 2). Odber vzoriek sa uskutočňoval štyri krát do roka. Výnimkou bol rok 2019, kedy sa odber na odberovom mieste Tisa - Zemplénagárd uskutočnil len tri krát za rok a takisto rok 2017, kedy sa v odberových miestach Bodrog - Streda nad Bodrogom, Roňava - Slovenské Nové Mesto a Tisa - Zemplénagárd uskutočnil odber len tri krát za rok. V roku 2020 a 2021 nebola dodržaná frekvencia odberov vzhľadom na pandemické opatrenia spojené s covid-19. V roku 2020 sa vykonal odber z miesta Dunaj - Szob – stred len vo februári. V roku 2021 neboli na odberovom mieste Szob – stred odobraté žiadne vzorky povrchovej vody [6]. V období od 1. januára 2022 do 31. decembra 2023 prebiehali odbery vzoriek podľa monitorovacieho plánu bez obmedzení. Odber vzoriek povrchových vôd prebiehal v súlade so STN EN ISO 5667-6 [10].



Obr. 3. Odberové miesta pre monitoring hraničných tokov SR [1]

3. Metodika

Stanovenie objemovej aktivity trícia vo vzorkách povrchových vôd v hraničných tokoch Slovenska sa vykonávalo metódou kvapalinovej scintilačnej spektrometrie podľa normy STN EN ISO 9698 [11]. Úprava vzorky bola vykonaná predestilovaním 20 ml vzorky do sucha. Následne bolo do plastovej vialky s objemom 20 ml pridaných 8 ml vzorky a 12 ml scintilátora UltimaGold LLT. Vzorky sa merali na prístroji Quantulus GCT 6220 po dobu 30 minút v 10 cykloch.

4. Výsledky

Výsledky sledovania úrovne trícia v povrchových vodách pre západné a východné toky SR za obdobie 2013–2023 sú zhrnuté v *tab. 3* a *tab. 4* a graficky zobrazené na *obr. 3* a *obr. 4*. Na odberovom mieste Hron ~ Kamenica nad Hronom bola v auguste 2023 nameraná najvyššia hodnota objemovej aktivity trícia 97,3 Bq/l. Táto zvýšená hodnota bola pravdepodobne dôsledkom vypúšťania odpadovej vody z JE Mochovce. V ostatných západných tokoch sa hodnoty objemovej aktivity trícia pohybovali medzi 9,5–39,7 Bq/l.

Tab. 3. Výsledky stanovenia obj. aktivity trícia pre západné toky – povodie rieky Dunaj za obdobie 2013–2023

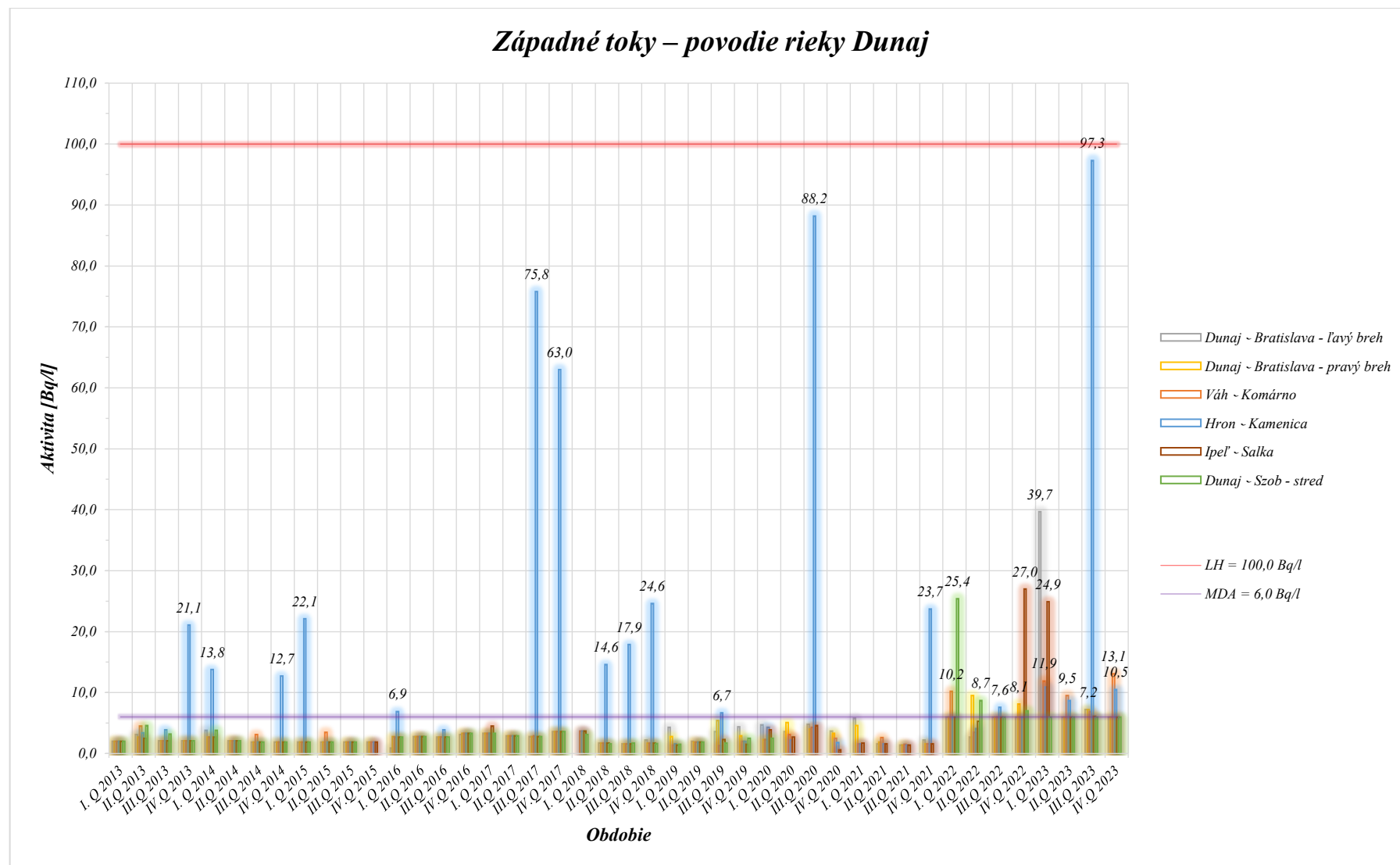
Tok	Odberové miesto	Kód vodného útvaru	Riečny kilometer	³ H [Bq/l]
Dunaj	Bratislava – ľavý breh	SKD0016	1 869,0	MDA – 39,7
Dunaj	Bratislava – pravý breh	SKD0016	1 869,0	MDA – 9,5
Váh	Komárno	SKV0027	1,5	MDA – 13,1
Hron	Kamenica nad Hronom	SKR0005	1,7	MDA – 97,3
Ipeľ	Salka	SKI0004	12,0	MDA – 27,0
Dunaj	Szob – stred	SKD0018	1 707,0	MDA – 25,4

MDA – najmenšia detegovateľná objemová aktivita (vypočítaná podľa STN 75 7600 [12]). Pre dosiahnutie 20 % relatívnej rozšírenej neistoty máme stanovenú MDA na úrovni 6,0 Bq/l.

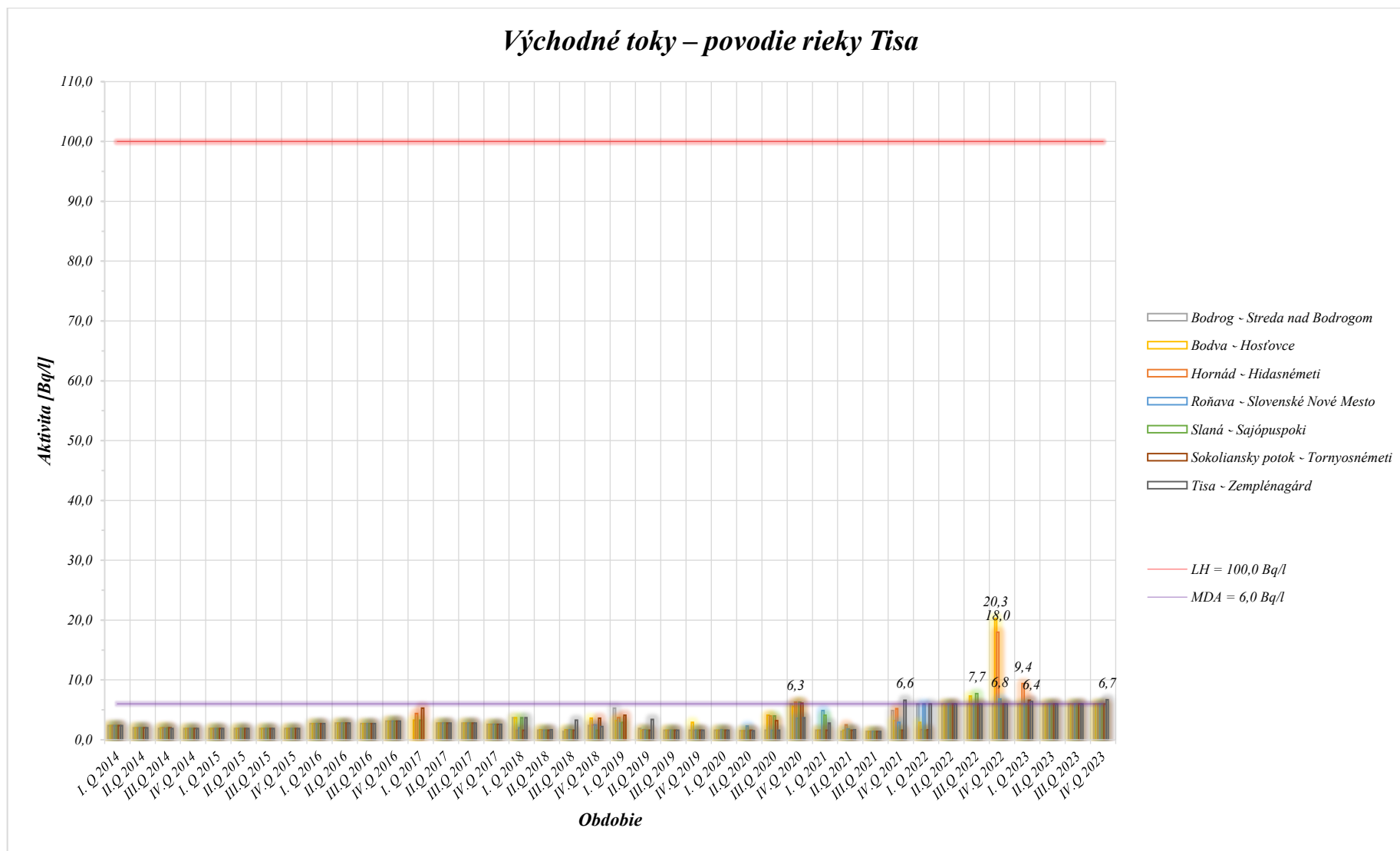
Na odberovom mieste Bodva ~ Host'ovce bola v novembri 2022 nameraná najvyššia hodnota objemovej aktivity trícia 20,3 Bq/l. Podobná hodnota bola v tom istom období nameraná na odberovom mieste Hornád ~ Hidasnémeti, a to na úrovni 18,0 Bq/l. Na ostatných odberových miestach východných tokov (Bodrog, Roňava, Slaná, Sokoliansky Potok, Tisa) sa hodnoty objemovej aktivity trícia hraničných tokov pohybovali na úrovni MDA.

Tab. 4. Výsledky stanovenia obj. aktivity trícia pre východné toky – povodie rieky Tisa za obdobie 2014–2023

Tok	Odberové miesto	Kód vodného útvaru	Riečny kilometer	³ H [Bq/l]
Bodrog	Streda nad Bodrogom	SKB0001	5,0	MDA – 6,0
Bodva	Hidvégdó/Host'ovce	SKA0002	0,0	MDA – 20,3
Hornád	Hidasnémeti	SKH0004	0,0	MDA – 18,0
Roňava	Sátoraljáuuhély/ Slovenské Nové Mesto	SKB0023	2,2	MDA – 6,8
Slaná	Sajópuspoki	SKS0003	0,0	MDA – 7,7
Sokoliansky potok	Tornyosnémeti	SKH0023	0,0	MDA – 6,6
Tisa	Zemplénegárd	SKT0001	0,0	MDA – 6,7



Obr. 4. Západné toky – povodie rieky Dunaj



Obr. 5. Východné toky – povodie rieky Tisa

5. Záver

V období rokov 2013–2023 sa Oddelenie rádiochémie VÚVH v Bratislave podieľalo na monitorovaní a hodnotení rádiochemických ukazovateľov v hraničných tokoch Slovenska. Počas tohto obdobia sa v auguste 2023 na odberovom mieste Hron - Kamenica nad Hronom zaznamenala najvyššia nameraná hodnota objemovej aktivity trícia 97,3 Bq/l. Táto zvýšená hodnota bola pravdepodobne dôsledkom vypúšťania odpadovej vody z JE Mochovce.

Na základe výsledkov nameraných hodnôt môžeme konštatovať, že v sledovaných profiloch za dané obdobie neboli pozorované výrazné zmeny v hodnotách stanovovaného ukazovateľa trícia a nebol presiahnutý koncentračný limit daný platnou legislatívou 100,0 Bq/l. Dunaj v súčasnosti nie je z rádiologického hľadiska znečistená rieka a môžeme ju zaradiť podľa kritérií hodnotenia kvality povrchových vôd do I. triedy, viď. tab. 2.

Literatúra

- [1] Rieky na Slovensku, <https://reny.sk/img/slovensko/rieky/slovenske-rieky.jpg>
- [2] MELOVÁ, K., ŠIMOR, V., ĽUPTÁK, Ľ., BUCHA, B. Základná charakteristika povodia Dunaja, 2013, https://www.shmu.sk/File/Hydrologia/Publikacna_cinnost_/2013/2013_DenDunaja_Melova_kol_Zakladna_charakteristika_povodia_Dunaja.pdf
- [3] Povodia Európy, https://sk.wikipedia.org/wiki/Povodie#/media/S%C3%BAbor:Europ%C3%A4ische_Wasserscheiden.png
- [4] WALLOVÁ, G., KULICHOVÁ, Z., BELANOVÁ, A. Monitorovanie rádionuklidov v povrchových vodách, ISBN 978-80-89062-97-3, 2014, s. 177.
- [5] VRŠKOVÁ, M., BELANOVÁ, A., KULICHOVÁ, Z. Monitorovanie Dunaja a jeho prítokov, 2007.
- [6] WALLOVÁ, G., MARIACA, E., ZVACHOVÁ, S., PETRÁNOVÁ, I. Monitorovanie rádionuklidov v hraničných tokoch Slovenska, 2022.
- [7] Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 269/2010, Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd v znení nariadenia vlády SR č. 398/2012, Z. z., v znení neskorších predpisov: <https://www.slov-lex.sk/pravne-predpisy/SK/ZZ/2010/269/20130101.html>
- [8] STN 75 7220: 1999 – Kvalita vody. Kontrola kvality povrchových vôd.
- [9] Rámcový program monitorovania vôd Slovenska na obdobie rokov 2022–2027, <https://www.minzp.sk/files/sekcia-vod/ramcovy-program-monitorovania-vod-slovenska-obdobie-2022-2027.pdf>
- [10] STN EN ISO 5667-6: 2017 (75 7051 SK) – Kvalita vody. Odber vzoriek. Časť 6: Pokyny na odber vzoriek z riek a potokov.
- [11] STN EN ISO 9698: 2019 (75 7616 EN) – Kvalita vody. Trícium. Skúšobná metóda pomocou kvapalinového scintilačného merania.
- [12] STN 75 7600: 2012 – Kvalita vody. Stanovenie rádionuklidov. Všeobecné ustanovenia.

MONITORING OF TRITIUM LEVEL IN SLOVAKIA'S BORDER RIVERS

Keywords: monitoring, tritium, radioactivity, border, river, Danube, Tisa

Monitoring of tritium level in Slovakia's border rivers has been carried out at the VÚVH in Bratislava since the 1980s. In the years 2013–2021, it took place at VÚVH in Bratislava within the Cohesion Fund III. stage of monitoring and valuation of the state of waters. This stage includes ensuring water sampling, monitoring of surface water quality in border rivers, sample preparation and processing, analytical work and evaluation of monitoring results. This time, VÚVH in Bratislava is already running IV. stage of Slovakia's water monitoring program, which specifies the performance of water monitoring implemented in accordance with European and national legislation and international agreements. In cooperation with the neighboring countries of Austria and Hungary, the quality of the Danube water, which comes from Austria to our territory and leaves our territory to Hungary, is monitored. Border rivers are monitored, sampling is carried out simultaneously with the Austrian or Hungarian side, and the monitoring results are compared and unified once a year.

As part of the monitoring of the Danube river and the other Slovak border rivers, selected radiochemical indicators were determined of VÚVH. In our article, we focused on monitoring of tritium level in surface water samples in the border streams of Slovakia, namely the western rivers – Danube basin and the eastern river – Tisa basin.

SLEDOVÁNÍ ^{14}C V POVRCHOVÉ VODĚ V OKOLÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Eva Juranová, Barbora Sedlářová, Diana Marešová, Martina Kluganostová

VÚV TGM, v. v. i., Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6

e-mail: eva.juranova@vuv.cz

Klíčová slova: uhlík 14, povrchová voda, jaderná elektrárna

Abstrakt

Príspevek se zabývá výskytem radiouhlíku (^{14}C) v povrchových vodách v okolí českých jaderných elektráren Dukovany (EDU) a Temelín (ETE). ^{14}C je radioaktivní izotop uhlíku s poločasem přeměny 5730 let a je přirozeně součástí uhlíkového cyklu, což z něj činí mobilní a potenciálně rozšířený radioizotop. V důsledku lidské činnosti, zejména provozu jaderných zařízení, může dojít ke zvýšenému uvolňování ^{14}C do životního prostředí. Ve srovnání s výpustmi do vodotečí jsou obecně významnější výpusti do ovzduší. V příspěvku jsou prezentována data o ^{14}C v organické a anorganické formě v povrchových vodách, která byla získána v rámci výzkumného projektu MURAD (TK02010064), prováděného Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v. v. i. (VÚV TGM), spolu se Státním ústavem radiační ochrany, v. v. i. (SÚRO), a další dosud nepublikovaná data.

1. Úvod

Uhlík 14 (radiouhlík, ^{14}C) je radioaktivní izotop uhlíku s poločasem přeměny 5 730 let [1]. ^{14}C je součástí uhlíkového cyklu, je tedy v prostředí velmi mobilní.

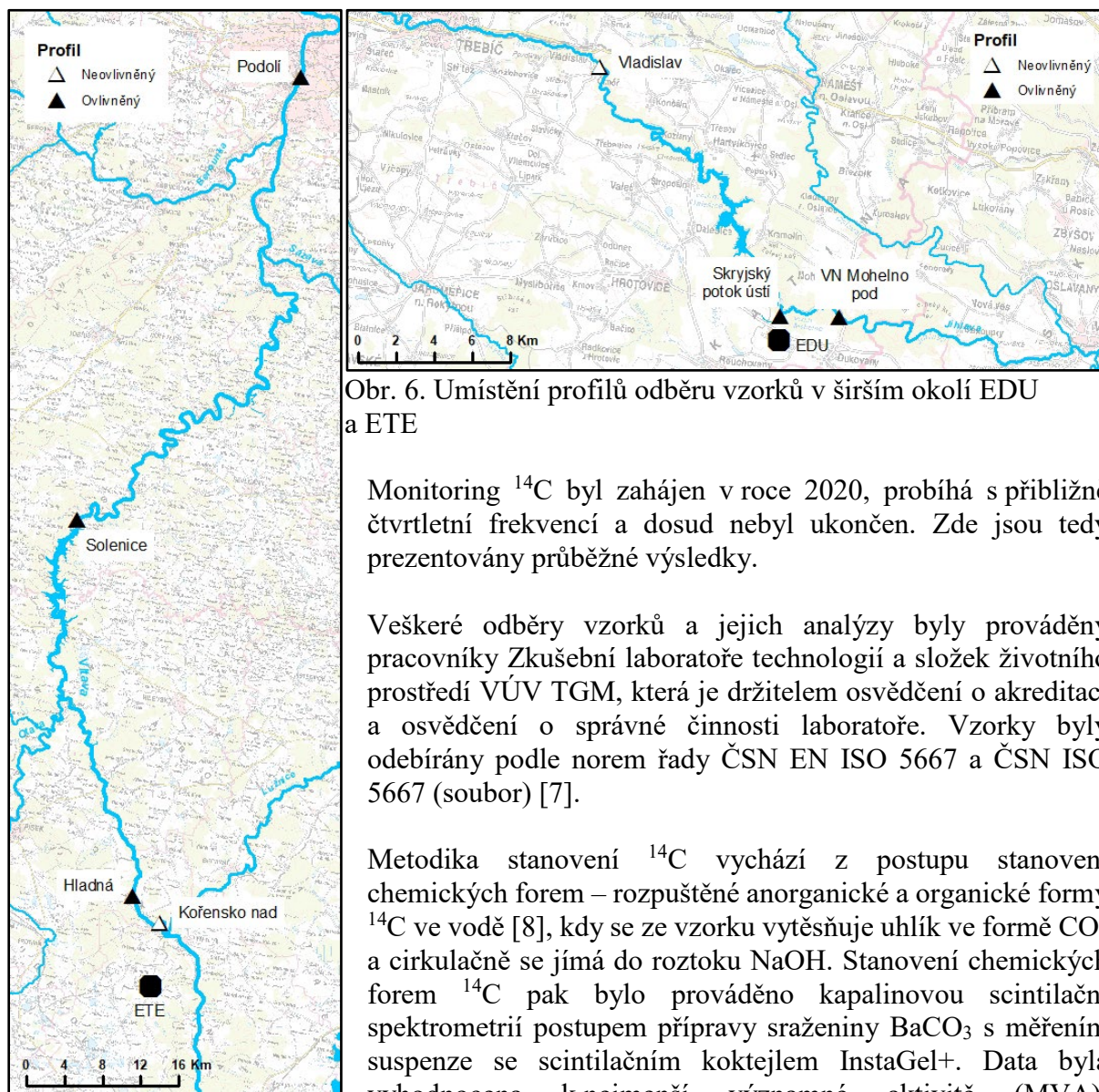
^{14}C vzniká buď v důsledku přirozených procesů, nebo může být generován uměle v důsledku lidské činnosti, např. při provozu jaderných zařízení, včetně dvou českých jaderných elektráren Dukovany (EDU) a Temelín (ETE). Z pohledu ^{14}C jsou obecně významnější výpusti do ovzduší než výpusti do vodotečí [2]. Podle monitoringu radiační situace prováděného EDU v roce 2020 vypustila elektrárna do ovzduší $6,53 \cdot 10^{11}$ Bq ^{14}C (94 % v organické formě, 6 % v anorganické formě) [4], z ETE bylo v roce 2022 vypuštěno do $4,97 \cdot 10^{11}$ Bq ^{14}C (94 % v organické formě, 6 % v anorganické formě) [3]. Obsah ^{14}C ve výpustech do vodotečí není elektrárnami monitorován, protože jeho množství vypouštěné touto cestou je považováno za zanedbatelné, což bylo potvrzeno i studií [2].

Tento příspěvek hodnotí výskyt ^{14}C v povrchových vodách v okolí EDU a ETE. Využívá data získaná v rámci výzkumného projektu „MURAD“ (TK02010064), řešeného VÚV TGM spolu se SÚRO, jež byla zveřejněna v databázi [5] a interaktivní mapě [6], a také další, dosud nezveřejněná data naměřená ve VÚV TGM. Ve výše uvedené databázi [5] a interaktivní mapě [6] lze kromě objemových aktivit ^{14}C nalézt také údaje o dalších umělých radionuklidech v povrchové vodě; hodnoty objemových aktivit získané v rámci projektu „MURAD“ jsou veřejně volně dostupné.

2. Metodika

Do sledování ^{14}C v okolí dvou jaderných elektráren, EDU a ETE, byla místa odběru vzorků vybrána s ohledem na umístění jaderných elektráren, v převážné většině na vodních tocích

ovlivněných výpustěmi z těchto zařízení nebo v lokalitách referenčních – neovlivněných. Umístění odběrových profilů je zobrazeno na mapkách na Obr. 6.



Obr. 6. Umístění profilů odběru vzorků v širším okolí EDU a ETE

Monitoring ^{14}C byl zahájen v roce 2020, probíhá s přibližně čtvrtletní frekvencí a dosud nebyl ukončen. Zde jsou tedy prezentovány průběžné výsledky.

Veškeré odběry vzorků a jejich analýzy byly prováděny pracovníky Zkušební laboratoře technologií a složek životního prostředí VÚV TGM, která je držitelem osvědčení o akreditaci a osvědčení o správné činnosti laboratoře. Vzorky byly odebírány podle norem řady ČSN EN ISO 5667 a ČSN ISO 5667 (soubor) [7].

Metodika stanovení ^{14}C vychází z postupu stanovení chemických forem – rozpuštěné anorganické a organické formy ^{14}C ve vodě [8], kdy se ze vzorku vytěšňuje uhlík ve formě CO_2 a cirkulačně se jímá do roztoku NaOH . Stanovení chemických forem ^{14}C pak bylo prováděno kapalinovou scintilační spektrometrií postupem přípravy sraženiny BaCO_3 s měřením suspenze se scintilačním koktejlem InstaGel+. Data byla vyhodnocena k nejmenší významné aktivitě (MVA), při vyhodnocení dat byly hodnoty naměřené pod MVA zahrnuty jako hodnota MVA.

3. Výsledky

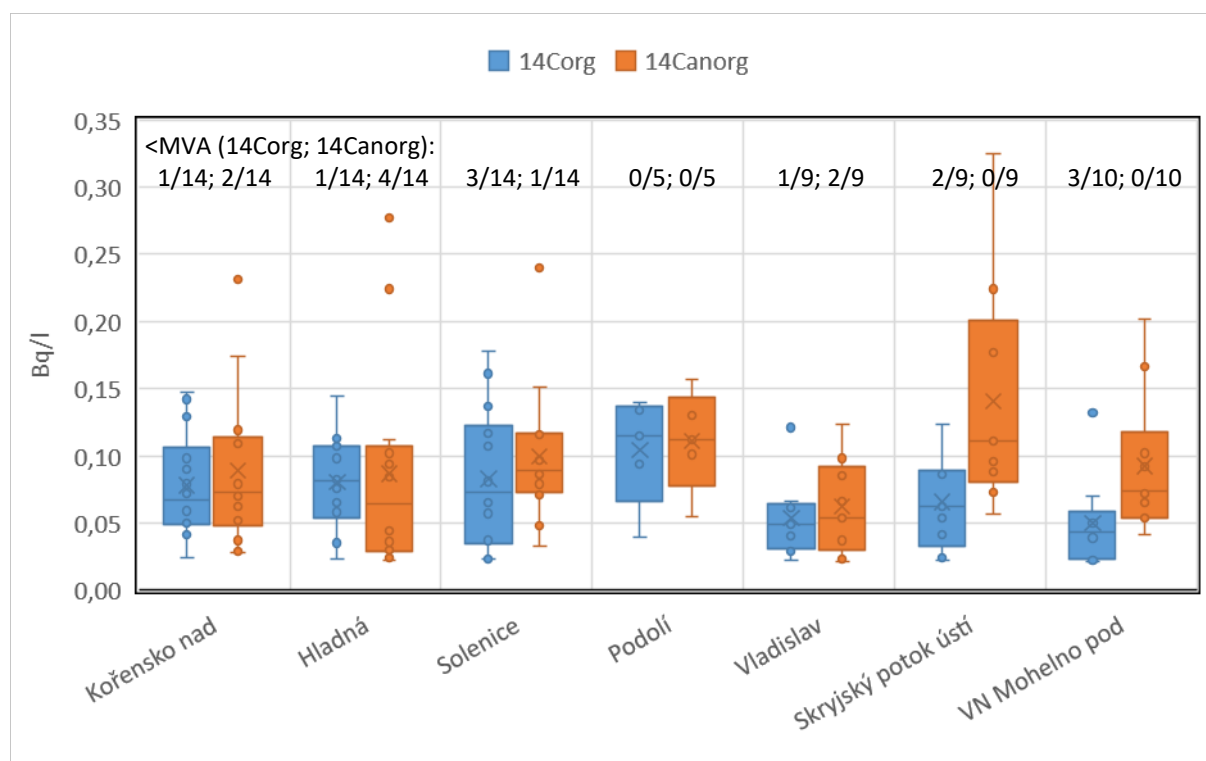
Objemové aktivity ^{14}C byly sledovány s rozlišením organické a anorganické formy ($^{14}\text{C}_{\text{org}}$ a $^{14}\text{C}_{\text{anorg}}$). Průměrné objemové aktivity za období sledování jsou znázorněny v obr. 2. Je vidět, že objemové aktivity $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ i $^{14}\text{C}_{\text{anorg}}$ se většinou pohybovaly v setinách Bq/l, což je v blízkosti MVA použité metody. V průměru byly zjištěné hodnoty následující (pro každý profil je uveden vždy $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ a $^{14}\text{C}_{\text{anorg}}$):

Kořensko nad: 0,078 Bq/l, 0,089 Bq/l; Hladná: 0,081 Bq/l, 0,087 Bq/l;

Solenice: 0,083 Bq/l, 0,099 Bq/l; Podolí: 0,104 Bq/l, 0,111 Bq/l;

Vladislav: 0,054 Bq/l, 0,062 Bq/l; Skryjský potok ústí: 0,066 Bq/l, 0,141 Bq/l;

VN Mohelno pod: 0,050 Bq/l, 0,092 Bq/l.

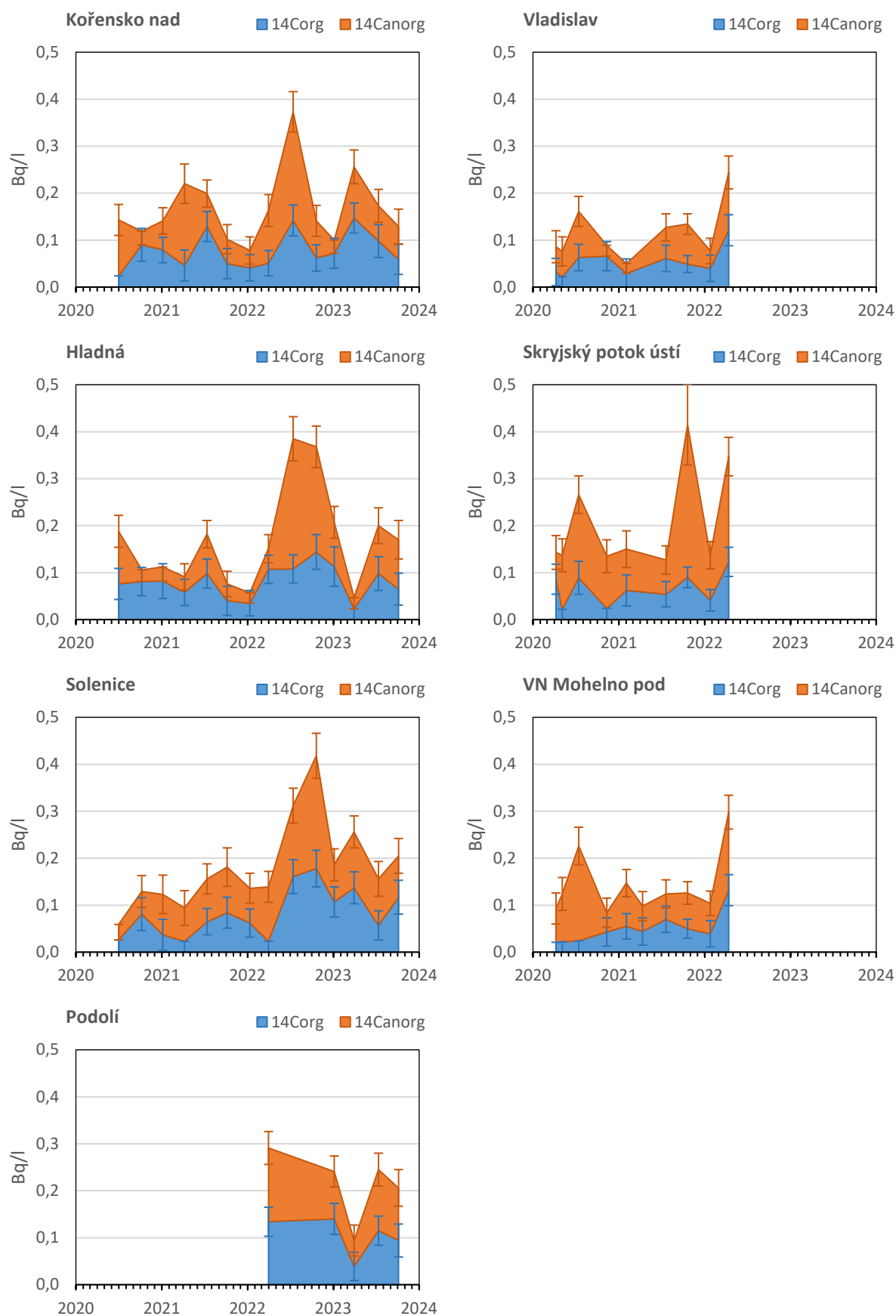


Obr. 2. Objemové aktivity ^{14}C naměřené ve sledovaných profilech, s rozlišením organické a anorganické formy. Jsou udány též počty hodnot nižší MVA z celkového počtu hodnot

Časový průběh naměřených hodnot jednotlivých forem ^{14}C je pro jednotlivé profily zobrazen na

Obr. 3. Porovnáním hodnot objemových aktivit jednotlivých forem ^{14}C ($^{14}\text{C}_{\text{org}}$ a $^{14}\text{C}_{\text{anorg}}$) naměřených v jednotlivých ovlivněných profilech s hodnotami naměřenými v příslušných profilech neovlivněných nebyly zjištěny žádné významné rozdíly, ovlivnění objemových aktivit ^{14}C výpustěmi z jaderných elektráren je tedy zanedbatelné. Naměřené hodnoty v ovlivněných profilech byly podobné těm referenčním, u nichž se předpokládá výskyt ^{14}C přírodního původu, případně přetrvávající kontaminace z atmosférických testů jaderných zbraní. Jedinou výjimkou je profil Skryjský potok ústí, kde byl identifikován statisticky významný rozdíl v objemové aktivitě $^{14}\text{C}_{\text{anorg}}$ oproti profilu Vladislav. Skryjský potok je velmi málo vodný tok, který odvádí odpadní vody z EDU do recipientu VN Mohelno na řece Jihlavě. Odpadní vody z EDU zde ještě nejsou příliš naředěny. I tak lze konstatovat, že zjišťované hodnoty jsou na velmi nízkých úrovních. V dalším profilu, VN Mohelno pod, který je používán pro hodnocení vlivu EDU na povrchové vody, již žádné navýšení ^{14}C zjištěno nebylo.

Pro celkový ^{14}C stanovený jako suma průměrných hodnot organické a anorganické formy ^{14}C byly stanoveny příspěvky k indikativní dávce. Pro oblast EDU v pořadí Jihlava Vladislav, VN Mohelno pod, Skryjský potok jsou to hodnoty $4,91 \times 10^{-5}$ mSv/rok, $6,03 \times 10^{-5}$ mSv/rok a $8,74 \times 10^{-5}$ mSv/rok. Pro oblast ETE v pořadí VN Kořensko nad, Hladná, Solenice a Podolí jsou to hodnoty $7,07 \times 10^{-5}$ mSv/rok, $7,11 \times 10^{-5}$ mSv/rok, $7,71 \times 10^{-5}$ mSv/rok a $9,10 \times 10^{-5}$ mSv/rok. Ve srovnání s referenční indikativní dávkou 0,1 mSv/rok pro obsah přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu je příspěvek ^{14}C nevýznamný. Referenční hodnota objemové aktivity ^{14}C pro dospělého jedince, která by způsobila celkovou indikativní dávku rovnou referenční úrovni 0,1 mSv/rok, by byla rovna 236 Bq/l.



Obr. 3. Časový průběh naměřených hodnot jednotlivých forem ^{14}C je pro jednotlivé sledované profily

Výše uvedené porovnání může být považováno za potvrzení faktu, že vliv vypouštění ^{14}C z našich jaderných elektráren na povrchové vody je zanedbatelný. Dochází k velmi silnému rozptýlu ^{14}C a množství ^{14}C vypouštěné do vod je nevýznamné, což potvrzuje zjištění studie [2]. Nicméně je třeba mít na paměti, že jednotlivé vyhodnocované soubory dat jsou omezené, protože se jedná o průběžné výsledky monitorování a pro spolehlivější hodnocení je třeba tyto datové soubory rozšířit. Z tohoto důvodu se jedná spíše o orientační hodnocení, které bude ještě upřesněno, jak jsou datové sady doplňovány nadále probíhajícím monitoringem.

4. Závěr

Sledování ^{14}C v povrchových vodách v okolí jaderných elektráren ukazuje, že vliv vypouštění ^{14}C na okolní toky je nevýznamný a většinou neodlišitelný od pozadí. Jedinou výjimkou je objemová aktivita anorganické formy ve Skryjském potoce, kde odpadní vody z EDU nejsou ještě příliš naředěny, i zde se ale jedná o velmi nízké hodnoty, které nepředstavují zdravotní rizika.

Poděkování

Príspevek byl připraven za finančního přispění institucionální podpory Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka a byly využity výsledky projektu TK02010064 Koncepce nového systému modelování šíření umělých radionuklidů v hydrosféře včetně asimilace dat pro potřeby státu při běžném provozu JEZ i jeho havárii s dopadem na okolí (MURAD), který byl financován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THÉTA.

Literatura

- [1] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). *Sources and effects of ionizing radiation, VOLUME I: SOURCES* [on-line]. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2000. Dostupné z: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf
- [2] FEJGL, M., SVĚTLÍK, I., KOTÍK, L., STRIEGLER, R., KURFIŘT, M., POSPÍCHAL, J., HORT, M. A long-term monitoring of ^{14}C in liquid discharges from NPPs in the Czech Republic. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* [on-line]. 2018, 318, 2 263–2 271. Dostupné z: doi: 10.1007/s10967-018-6146-0(0123456789(),-volV) (0123456789(),-volV)
- [3] KURFIŘT, M., KOTKOVÁ, L., JANOVSÝ, D., POUROVÁ, J., KAŇKOVSKÝ, J., PLAŇANSKÝ, J., NEVRKLA, Š. *Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2022*. Zpráva. ETE/90E001441/5/2022. B.m.: ČEZ, a. s., Jaderná elektrárna Temelín. 2023.
- [4] KURFIŘT, M. *Radiační situace v okolí JE Dukovany za rok 2020*. Zpráva. ETE/90E001441/5/2022. B.m.: ČEZ, a. s., Jaderná elektrárna Dukovany. 2021.
- [5] JURANOVÁ, E., STRNAD, F., SEDLÁŘOVÁ, B., MAREŠOVÁ, D., BERAN, A., POHLOVÁ, I. *Databáze objemových aktivit umělých radionuklidů v tocích* [on-line]. Praha: VÚV TGM, v. v. i. 2022. Dostupné z: <https://www.vuv.cz/koncepce-noveho-systemu->

modelovani-sireni-umelych-radionuklidu-v-hydrosfere/aplikovane-vysledky-x-koncepce-noveho-systemu-modelovani-sireni-umelych-radionuklidu-v-hydrosfere/databaze-objemovych-aktivit-umelych-radionuklidu-v-tocich/

[6] Mapa objemových aktivit umělých radionuklidů v tocích [on-line]. [map]. 2022. vyd. B.m.: VÚV TGM, v. v. i., nedatováno. Dostupné z: www.dibavod.cz/murad-mapa

[7] ČSN EN ISO 5667-6 (757051) Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 6: Návod pro odběr vzorků z řek a potoků. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ). 2017.

[8] SVĚTLÍK, I., TOMÁŠKOVÁ, L. *Zpracování vzorků vody pro stanovení chemických forem ^{14}C* . Výzkumná zpráva. č. 646/2018. B.m.: ODZ ÚJF AV ČR v. v. i. 2018.

^{14}C MONITORING IN SURFACE WATER IN THE VICINITY NUCLEAR POWER PLANTS

Keywords: carbon 14, surface water, nuclear power plant

The paper deals with the occurrence of radiocarbon (^{14}C) in surface waters in the vicinity of the Czech nuclear power plants Dukovany (EDU) and Temelín (ETE). ^{14}C is a radioactive isotope of carbon with a half-life of 5730 years and is naturally part of the carbon cycle, making it a mobile and potentially widespread radioisotope. As a result of human activity, especially the operation of nuclear facilities, an increased release of ^{14}C into the environment may occur. Compared to discharges into watercourses, discharges into the air are generally more significant. The contribution presents data on ^{14}C in organic and inorganic form in surface waters, which was obtained as part of the MURAD research project (TK02010064), carried out by the T. G. Masaryk Water Management Research Institute, p. r. i. together with the State Institute of Radiation Protection, p. r. i., and other previously unpublished data.

STANOVENÍ ^{236}U JAKOŽTO ANTROPOGENNÍHO RADIONUKLIDOVÉHO STOPOVAČE A JEHO PRVOTNÍ MĚŘENÍ V ENVIRONMENTÁLNÍCH VZORCÍCH Z ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Tomáš Prášek¹, Mojmír Němec¹, Barbora Sedlářová²

¹*Katedra jaderné chemie, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze*

²*Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka*

e-mail: tomas.prasek@fffi.cvut.cz

Klíčová slova: uran 236, uranová ruda, podzemní vody, AMS

Abstrakt

Izotop uranu ^{236}U je významným radionuklidovým stopovačem lidské jaderné činnosti, jakožto i přírodních procesů, který v poslední době získává na stále větším analytickém významu nejen v oblasti jaderně-bezpečnostních záruk, ale také ve sféře environmentálních analýz, zejména pak v oceánografii. Zastoupení tohoto radionuklidu na území České republiky (ČR) doposud nebylo zmapováno, předpokládá se dominantně ovlivnění globálním radioaktivním spadem, s původem zejména v atmosférických testech jaderných zbraní ze šedesátých a sedmdesátých let minulého století a rovněž v důsledku mimořádné události jaderné elektrárny v Černobylu z roku 1986. Ve spolupráci Katedry jaderné chemie FJFI ČVUT a VÚV TGM byla provedena vůbec první stanovení tohoto radionuklidu v environmentálních vzorcích z území ČR, jež kromě vzorků uranové rudy z oblasti Příbramska a referenčního materiálu připraveného ze smolince z oblasti Jáchymova před rokem 1900 zahrnovala především vzorky vody z vybraných vrtů z území ČR, zahrnutých v monitorovací síti VÚV TGM. V rámci stanovení byla využita infrastruktura nově vybudované laboratoře urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS, Accelerator Mass Spectrometry), jež umožňuje vysoce citlivé stanovení stopových izotopů řady prvků, včetně uranu a dalších aktinoidů.

STANOVENIE ^{129}I VO VZORKÁCH RIEČNEJ VODY

Edita Červenková, Miriam Mindová, Martin Daňo

*Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze, Katedra jaderné chemie, Břehová 7,
115 19 Praha 1,
e-mail: cerveedi@fffi.cvut.cz*

Klíčové slova: jód, urýchl'ovačová hmotnostná spektrometria, separácia, životné prostredie, kvapalinová extrakcia

Abstrakt

Jód-129 je jediným rádioaktívnym izotopom jódu s dlhou dobou polpremeny, a to 15,7 miliónov rokov. Jeho prítomnosť v životnom prostredí pramení hlavne v ľudskej činnosti, a to predovšetkým v dôsledku jeho uvoľňovania pri jadrových haváriách a pri prepracovávaní vyhoreného jadrového paliva. Práca sa zaoberá separáciou jódu z riečnych vzoriek pomocou kvapalinovej extrakcie a následným stanovením izotopových pomerov $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$. Vzhľadom na očakávané ultranízké množstvo ^{129}I vo vzorkách bol k meraniu využitý urýchl'ovačový hmotnostný spektrometer AMS MILEA (Multi-Isotope Low-Energy Accelerator Mass Spectrometry). Stanovené prírodné vzorky prinášajú nové informácie o množstve antropogénnych izotopov jódu vo vzorkách riečnej vody z rôznych častí sveta, a tým prispievajú k ich mapovaniu v životnom prostredí.

1. Úvod

V prírodných vzorkách sa ^{129}I nachádza v ultranízkych množstvách, čo komplikuje jeho stanovenie. Ďalšími faktormi, ktoré sťažujú jeho stanovenie, sú beta rozpad a nízka špecifická aktivita. Z týchto dôvodov je nutné jód efektívne oddeliť od vzorky a zmerať ho s čo najvyššou citlivosťou. Efektívna separácia jódu od vzorky je stále predmetom skúmania, čoho dôkazom je vývoj nových separačných techník a neustále vylepšovanie už zavedených metód. Úspech stanovenia ^{129}I závisí tiež od vhodne zvolenej detekčnej techniky. Pre stanovenie ultranízkej hladiny ^{129}I vo vzorkách sa využíva najcitlivejšia detekčná technika – urýchl'ovačová hmotnostná spektrometria, ktorá dosahuje najnižšie detekčné limity oproti ostatným technikám využívajúcim sa pre stanovenie ^{129}I .

2. Jód-129

Izotop jód s hmotnostným číslom 129, ^{129}I , je rádioaktívny izotop jódu s dlhou dobou polpremeny ($T_{1/2} = 15,7$ mil. rokov). Prirodzene tento izotop vzniká najmä spontánnym štiepením ^{238}U a interakciami kozmického žiarenia s xenónom vo vyšších vrstvách atmosféry [1, 2]. Od roku 1945 sa uvoľňuje veľké množstvo ^{129}I antropogénnymi aktivitami, medzi ktoré patrí testovanie jadrových zbraní, jadrové havárie a prepracovávanie vyhoreného paliva [3].

Odhad množstva uvoľneného ^{129}I z testovania jadrových zbraní je približne od 43 do 150 kg, v dôsledku havárie v Černobyle od 2 do 6 kg a v dôsledku nehody vo Fukushima 1,2 kg. Dlhodobými prispievateľmi ^{129}I sú prepracovateľské závody v La Hague a v Sellafielde, ktoré do roku 2005 vypustili 251 kg ^{129}I do atmosféry a takmer 5 000 kg do Írskeho mora a Lamanšského prielivu [4, 5].

Vďaka neustálej produkcii ^{129}I v životnom prostredí a veľkej afinite jódu s organickým materiálom je ^{129}I ideálnym indikátorom pre environmentálne procesy a stanovenie geologického veku datovaného do približne 80 miliónov rokov [6].

3. Separácia jódu

Jód bol zo vzoriek separovaný pomocou najčastejšie využívanej metódy – kvapalinovej extrakcie s rozpúšťadlom. Výhodou tejto metódy je celková výťažnosť nad 80 %, avšak nie je vhodná na analýzu veľkého objemu vzoriek. Dôvodom je, že je zdlhavá a nešetrná k životnému prostrediu, pretože chloroform a tetrachlórmetán vytvárajú toxický organický odpad [7].

Postup separácie:

Každá vzorka bola najprv prefiltrovaná. Potom bolo do každej vzorky pridané $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$, tak aby konečná koncentrácia činidla bola 30 mg/l. Následne boli vzorky zahrievané na teplotu 60°C po dobu 17–23 hodín za stáleho miešania.

Ďalej sa vzorky spracovávali postupne po častiach, pričom každá časť bola približne o objeme 0,5–0,6 l, kvôli obmedzeniam veľkosti deliaceho lievika. Po vychladnutí bola časť vzorky prevedená do deliaceho lievika a k nej boli pridané 0,5 M $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$. Nasledovalo pridanie 3M HNO_3 pre upravenie pH na hodnotu v rozmedzí 1–2. Nasledovalo pridanie chloroformu, pretrepanie vzorky, a ak sa nevytvorila tretia fáza, postupne bol do vzorky pridaný 1 M NaNO_2 . Po opätovnom pretrepaní bola organická fáza odpustená do kadičky a k vodnej fáze bol znovu pridaný chloroform v rovnakom množstve a extrakcia bola takto zopakovaná ešte dvakrát.

Organické fázy boli spojené a prevedené spolu s prídavkom ultračistej vody do oddeľovacieho lievika. Potom bol pridaný 0,5 M $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ a vzorka bola znovu pretrepaná. Vodná fáza bola oddelená a použitá k ďalšiemu spracovaniu. K vodnej fáze bol pridaný chloroform, 3 M HNO_3 a 1 M NaNO_2 . pH bolo znovu skontrolované a bola prevedená extrakcia ako na začiatku. Organické fázy boli spojené a k nim bolo pridané malé množstvo ultračistej vody a 0,5 M $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$.

Ak bola vzorka rozdelená na viac častí, všetky vodné fázy jednej vzorky boli prevedené do jednej centrifugačnej tuby. Následne bola pridaná 1 M AgNO_3 a 3 M HNO_3 . Vzniknutá zrazenina bola centrifugovaná a premytá 3 M HNO_3 a ultračistou vodou. Zrazenina bola vysušená, rozdrvená na prach v achátovej miske a zmiešaná s jej päťnásobným množstvom nióbového prášku. Nakoniec boli všetky vzorky vtlačené do medených katód pomocou pneumatického lisu (Pneumatic Sample Press, IonPlus, AG), pripevnené k satelitu a vložené do magazínu, pre meranie pomocou AMS MILEA. Množstvo vtláčanej vzorky do katód je okolo 1–2 mg, čo je veľkou výhodou tejto metódy.

4. Analytické stanovenie $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ pomocou AMS

Jód-129 je možné stanoviť viacerými analytickými technikami, avšak pre ultrastopovú detekciu ^{129}I sa v dnešnej dobe používa najmä urýchľovačová hmotnostná spektrometria, ktorá je najcitlivejšou metódou v oblasti jednotiek ppb (parts per billion) a jedinou metódou, ktorá dokáže stanoviť izotopický pomer $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ vo vzorkách predjadrového veku [6].

Princípom fungovania AMS je bombardovanie vzorky Cs^+ iónmi z céziového iónového zdroja. Tieto ióny narážajú na vzorku a postupne ju odprašujú (angl. sputtering). Vzniknutý negatívny zväzok prechádza cez iónovú optiku do nízkoenergetického elektrostatičného analyzátora

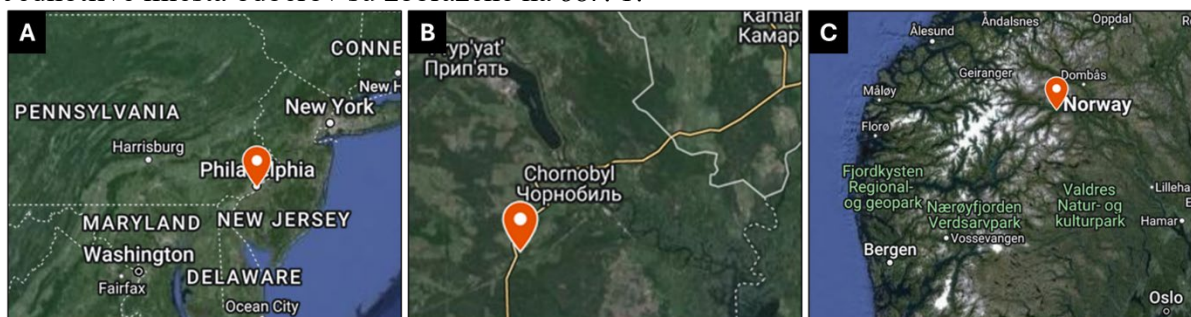
(LE-ESA). LE-ESA pripraví zväzok na achromatický transport do nízkoenergetického magnetu (LEM) a separuje nabité častice podľa pomeru kinetickej energie a náboja. V LEM sa ióny vo zväzku rozdelia podľa pomeru svojich hmotností k náboju.

Fokusovaný zväzok vstupuje do tandemového urýchľovača, ktorý je rozdelený na dve polovice tzv. terminálom. V prvej časti sa ióny urýchľujú – sú priťahované vzhľadom na náboj až zinteragujú v strede urýchľovača s tzv. stripprom (plynné He). V niektorých typoch AMS sa používa ako stripper tenká fólia namiesto plynu. V strippri sa prebieha rozbíjanie molekulárnych iónov a súčasne sa negatívny zväzok zbavuje elektrónov a mení tak polaritu na kladnú. Tým dochádza k odstráneniu potenciálne interferujúcich polyatomických molekúl. Kladný zväzok iónov je potom odpudzovaný a postupuje do tzv. vysokoenergetickej časti systému.

Optimalizovaný iónový zväzok pokračuje do vysokoenergetického magnetu 1 (HEM1). Ako pri LEM aj tu nastáva separácia iónov na základe hmotnosti, resp. hybnosti. Pozitívne nabitý tzv. „vzácný izotop“ (tu $^{129}\text{I}^{2+}$) pokračuje až na koniec celého systému, zatiaľ čo ióny stabilného izotopu $^{127}\text{I}^{2+}$ sú vďaka pulznému systému odklonené a merané mimoosovou Faradayovou klietkou. Zväzok obsahujúci $^{129}\text{I}^{2+}$ pokračuje do vysokoenergetického elektrostatického analyzátoru (HE-ESA) cez druhý vysokoenergetický magnet (HEM2). Zväzok obsahujúci $^{129}\text{I}^{2+}$ zakončuje svoju trasu v plynovej ionizačnej komore s Frishovou sieťkou (GIC). Výsledná informácia z ionizačnej komory poskytuje počty impulzov $^{129}\text{I}^{2+}$ a spektrum iónov vo zväzku [6, 8, 9].

5. Typy vzoriek

Jód bol stanovovaný v prírodných sladkovodných vzorkách z USA, Nórska a Ukrajiny. Jednotlivé miesta odberov sú zobrazené na obr. 1.



Obr. 1. A – Miesto odberu: vzorky z rieky Schuylkill, Philadelphia, štát Pensylvánia, USA (39.9432014N, 75.1998825W); B – Miesto odberu: vzorky z černobyľskej oblasti z rieky Uzh, Ukrajina (51.2068980N, 30.1404540E); C – Miesto odberu: vzorky z rieky Bovra, Nórsko (61.83908N, 8.56735E)

Konkrétne v USA bola odobratá vzorka 19. februára 2023 o objeme 0,6 l z rieky Schuylkill vo Philadelphii v Pensylvánii. Zaujímavosťou je, že v povodí rieky ležia veľké ložiská antracitu, v dôsledku jeho ťažby patrila k najznečistenejším riekam USA. Avšak po druhej svetovej vojne bol spustený projekt na jej vyčistenie, vďaka ktorému sa rieka stala zdrojom pitnej vody pre viac ako 1,5 milióna ľudí [10]. Vzorka z Ukrajiny bola odobratá 5. apríla 2023 v černobyľskej oblasti o objeme 1,5 l. V Nórsku bola odobratá vzorka vody z ľadovcovej rieky Bovra dňa 9. septembra 2023 o objeme 1,5 l. Táto rieka je prirodzeným obydľím lososov.

Do všetkých vzoriek bolo pridaných 12,6 g Na₂SO₃ na 1l vzorky, čím došlo k „zakonzervovaniu“ jódu (udržanie jódu v redukovanej forme), pretože vzorky neboli spracovávané hneď po odobratí.

6. Výsledky

Z nameraných hodnôt, prístrojom AMS MILEA, pre každú vzorku boli vypočítané izotopové pomery $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ (tab. 1).

Tab. 1. Vypočítané hodnoty izotopových pomerov pre jednotlivé vzorky merané prístrojom AMS MILEA (Korigovaný pomer 2 – priemer hodnôt pomerov $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$, bez prvého merania a bez započítania nulových hodnôt, ak sa takáto situácia vyskytla. Korigovaný pomer 1 – priemer hodnôt pomerov $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ so započítaním prvého merania vzoriek a bez nulových hodnôt, ak sa takáto situácia vyskytla)

Vzorka	Nekorigovaný pomer $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$	Korigovaný pomer 1 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$	Korigovaný pomer 2 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$
Rieka Uzh z Černobyľu (UA)	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$
Rieka Schuylkill (USA)	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$
Rieka Bovra (NO)	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$2,1 \cdot 10^{-11}$

Meranie funguje tak, že magazín sa celý meria niekoľkokrát za sebou. Keď skončí meranie poslednej pozície v magazíne, do iónového zdroja sa vloží znovu prvá vzorka. To má však za následok to, že v iónovom zdroji stále zostávajú stopy z predchádzajúcej vzorky, ktoré putujú do koncového detektora a skresľujú výsledok. Preto sa tu (neplatí to vo všeobecnosti) prvé meranie vzorky zanedbá.

7. Diskusia

Pri pohľade na tab. 1 vidno, že najvyššia hodnota izotopového pomeru bola dosiahnutá pre vzorku sladkej vody z Černobyľu. Táto hodnota je veľmi nízka pri porovnaní so získanými pomermi z pevných vzoriek z epicentra černobyľskej havárie. Tieto vzorky dosahovali izotopové pomery $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ $(2-3) \cdot 10^{-6}$ [11]. Dôvodom tak veľkého rozdielu môže byť, že vzorka pochádza zo širšieho okolia černobyľskej havárie a jedná sa o povrchovú vodu riečneho toku, kdežto vzorky analyzované Shawom a kol. (2019) [11] boli pevnej povahy, odobraté z 20cm hĺbky v epicentre havárie. Pri porovnaní izotopového pomeru vzorky z Černobyľu s ostatnými analyzovanými vzorkami dosahuje, ako už bolo zmienené, najvyšší izotopový pomer, ale nevykazuje výrazne vyššiu kontamináciu antropogénnym jódom.

Korigovaný izotopový pomer vzorky z ľadovcovej rieky Bovra v Nórsku dosiahol hodnotu $2,1 \cdot 10^{-11}$, čo je vyššia hodnota ako vzorky riečnej vody z USA. Táto zvýšená hodnota môže byť spôsobená hlavne príspevkom z testu jadrových zbraní v 60. rokoch minulého storočia a jadrovej havárie Černobyľ a Fukushima. Ku kontaminácii môžu prispievať aj závody na spracovanie ožiareného paliva – Sellafield a La Hague.

V predjadrovej ére dosahovali izotopové pomery $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ vo vzorkách morí a oceánoch rádovo 10^{-12} . V súčasnosti sa tento pomer zvýšil takmer o dva rády a pohybuje sa okolo 10^{-11} – 10^{-10} .

Při porovnání izotopových poměrů vzoriek vzhledem k předjadrovej éře a k současnosti je vo vzorkách viditeľná kontaminácia antropogénnymi aktivitami.

8. Záver

Zo vzoriek riečnej povahy z USA, Ukrajiny a Nórska bol pomocou kvapalinovej extrakcie s chloroformom odseparovaný jód, ktorého analytické stanovenie bolo prevedené dnes najcitlivejšou detekčnou technikou – AMS. Prírodné vzorky prinášajú nové informácie o $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ vo vzorkách riečnej vody z rôznych častí sveta, a tým môžu prispieť k mapovaniu jódu v životnom prostredí.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená grantom Studentské grantové súťaže ČVUT č. SGS24/148/OHK4/3T/14.

Literatúra

- [1] FABRYKA-MARTIN, J., BENTLEY, H., ELMORE, D., AIREY, P. L. 1985. Natural iodine-129 as an environmental tracer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Roč. 49, č. 2, s. 337–347. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90027-4)
- [2] HOU, X., HANSEN, V., ALDAHAN, A., POSSNERT, G., LIND, O. Ch. et al. 2009. A review on speciation of iodine-129 in the environmental and biological samples. *Analytica Chimica Acta*. Roč. 632, č. 2, s. 181–196. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.11.013>
- [3] ENGLUND, E., ALDAHAN, A., HOU, X. L., PETERSEN, R., POSSNERT, G. 2010. Speciation of iodine (^{127}I and ^{129}I) in lake sediments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. Roč. 268, č. 7–8, s. 1 102–1 105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.109>
- [4] DARAOU, A., MICHEL, R., GORNY, M., JAKOB, D., SACHSE, R. et al. 2012. Iodine-129, Iodine-127 and Caesium-137 in the environment: soils from Germany and Chile. *Journal of Environmental Radioactivity*. Roč. 112, s. 8–22. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.02.011>
- [5] HOU, X., POVINEC, P. P., ZHANG, L., SHI, K., BIDDULPH, D. et al. 2013. Iodine-129 in Seawater Offshore Fukushima: Distribution, Inorganic Speciation, Sources, and Budget. *Environmental Science & Technology*. 2013-04-02, roč. 47, č. 7, s. 3 091–3 098. ISSN 0013-936X. <https://doi.org/10.1021/es304460k>
- [6] LIU, Q., HOU, X., ZHOU, W., FU, Y. 2015. Accelerator Mass Spectrometry Analysis of Ultra-Low-Level ^{129}I in Carrier-Free AgI-AgCl Sputter Targets. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*. 2015-05-01, roč. 26, č. 5, s. 725–733. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13361-015-1086-1>
- [7] ZHANG, M., HOU, X., 2021. Rapid analysis of ^{129}I in natural water samples using accelerator mass spectrometry. *Atomic Spectroscopy*. 2021-05-01, roč. 42, č. 3. Dostupné z: <https://doi.org/10.46770/AS.2021.071>
- [8] KAIZER, J. 2015. *Rádionuklidy v životnom prostredí a vývoj metód ich stanovenia urýchľovačovou hmotnostnou spektrometriou*. Dizertačná práca, vedúci prof. RNDr. Pavel P. Povinec, DrSc. Bratislava: Univerzita Komenského v Bratislave.

- [9] IONPLUS AG, 2020. *MILEA manual*.
- [10] *Pennsylvania Organization for Watersheds and Rivers*. pariveroftheyear.org [on-line].
- [11] SHAW, G., BAILEY, E., CROUT, N., FIELD, L., FREEMAN, S. et al. 2019. Analysis of ^{129}I and ^{127}I in soils of the Chernobyl Exclusion Zone, 29 years after the deposition of ^{129}I . *Science of The Total Environment*. Roč. 692, s. 966–974. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.319>

DETERMINATION OF ^{129}I IN RIVER WATER SAMPLES

Keywords: iodine, accelerator mass spectrometry, separation, environment, liquid-liquid extraction

Iodine-129 is the only radioactive isotope of iodine with a long half-life of 15.7 million years. Its presence in the environment primarily stems from human activities, mainly due to its release during nuclear accidents and the reprocessing of spent nuclear fuel. The study deals with the separation of iodine from river samples using liquid-liquid extraction and subsequent determination of the isotopic ratios $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$. Due to the expected ultra-low quantity of ^{129}I in the samples, the Multi-Isotope Low-Energy Accelerator Mass Spectrometer (AMS MILEA) was utilized for measurement. The determined natural samples provide new information on the amount of anthropogenic iodine isotopes in river water samples from various parts of the world, contributing to their mapping in the environment.

STANOVENIE IZOTOPOV JÓDU V MORIACH V OKOLÍ DÁNSKA

**Miriam Mindová¹, Mojmír Němec¹, Martin Daňo¹, Christof Vockenhuber²,
Xiaolin Hou³**

¹ Katedra jaderné chemie, FJFI ČVUT v Praze

²Laboratory of Ion Beam Physics, ETH Zürich, Zurich, Switzerland

³Department of Environmental and Resource Engineering, DTU, Roskilde, Denmark
e-mail:miriam.mindova@fffi.cvut.cz

Klíčová slova: jód 129, jód 127, Severné more, Baltské more, oceánografický stopovač, ICP-MS, AMS

Abstrakt

Prepracovanie ožiareného jadrového paliva má nielen kladné ale aj záporné prínosy. Negatívnym dopadom je únik rádionuklidov do životného prostredia. Jedným z takýchto rádionuklidov je aj ^{129}I s veľmi dlhou dobou polpremeny (15,7 miliónov rokov). Tento jód sa zakoncentrováva najmä v morskom prostredí a prenosom pomocou morských prúdov kontaminuje moria a oceány. K zvýšenej koncentrácii ^{129}I , nielen vo vodnom prostredí, ale aj na súši, prispeli v určitej miere taktiež testy jadrových zbraní a jadrové nehody. V tejto práci sú skúmané vzorky odobrané z morí v okolí Dánska, zo Severného a Baltského mora. Bola skúmaná zmena koncentrácie rádioaktívneho, ^{129}I , a taktiež stabilného, ^{127}I , jódu v týchto miestach. Boli pozorované meniace sa trendy v závislosti na hĺbke, z ktorej boli vzorky odobraté, ale taktiež v závislosti na čase. Toto je ukážka, že ^{129}I je možné využiť ako oceánografický stopovač na monitorovanie výmeny vodnej hmoty. Na stanovenie jódu vo vzorkách boli použité hmotnostne spektrometrické metódy, a to ICP-MS v kombinácii s AMS.

MOŽNOSTI VYUŽITÍ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ PŘI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY DEGRADACE GENŮ ANTIBIOTICKÉ REZISTENCE VE VODÁCH

Jakub Sochor^{1,2}

¹Katedra jaderné chemie, FJFI ČVUT v Praze, Břehová 78/7, 115 19 Praha 1

²Ústav technologie vody a prostředí, FTOP VŠCHT v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6
e-mail: jakub.sochor@fffi.cvut.cz

Klíčová slova: geny antibiotické rezistence, ARG, antibiotic resistance genes, polishing stupeň

Abstrakt

Problematika obecně se zvyšující úrovně antibiotické rezistence v současné společnosti a možnosti jejího řešení je jednou z prudce narůstajících témat ve vědeckém světě. Pozornost již není primárně zaměřena na odstraňování molekul jednotlivých antibiotik z čistírenských kalů používaných v zemědělství a vod vypouštěných do životního prostředí, ale i na degradaci samotných genů antibiotické rezistence (anglicky antibiotic resistance genes, zkratka ARGs). Klasické metody jako ozonizace nebo termální působení na tyto technologické složky jsou relativně široce diskutovány, zkoumány a realizovány, avšak možnost využití ionizujícího záření v této technologii je pouze v zárodku v zhruba posledních 15 letech. A to i přes skutečnost, že většina z mála v současné době dostupných studií uvádí srovnatelnou ekonomickou náročnost – nižší stupeň degradace je pak kompenzována působením ionizujícího záření (IZ) na další složky ve vodě, čímž může zároveň působit jako polishing stupeň v technologii úpravy vody. Tento příspěvek si dává za cíl popsat aktuální stav poznání problematiky využití IZ pro degradaci genů antibiotické rezistence a shrnout možnosti pro výzkum v českých poměrech.

1. Úvod

Rozšířené a mnohdy nesprávné používání antibiotik v medicíně vyspělých i rozvojových zemí postupně způsobuje navyšování počtu bakterií imunních vůči určitým typům antibiotik, což komplikuje zdravotnické procesy a léčení; jde o jeden z nejzávažnějších problémů současné medicíny. Ročně tak v EU umírá 33 tisíc osob v důsledku infekcí způsobených rezistentními organismy [1]. V současné době jsou proto vyvíjeny nejen metody na odstraňování samotných antibiotik z odpadních vod nebo kalů, ale i na degradaci genů antibiotické rezistence, které tuto pro lidstvo nevýhodnou vlastnost předávají dále. Metody chemické nebo termální degradace jsou již široce zkoumány a optimalizovány pro technologické provedení; metody využití ionizujícího záření (IZ) však stojí víceméně nepovšimnuty v pozadí.

Spojení vodárenství, resp. čistírenství a jaderné chemie, či radiační chemie není tak nemožné, jak by se mohlo na první pohled zdát. První studie o využití radionuklidů ve vodním hospodářství se datují již do padesátých let minulého století, v osmdesátých a devadesátých letech se pak zkoumala možnost jejich využití jako alternativa klasického chlorového hygienického zabezpečení (hlavně z důvodu menšího množství DBP). Bylo prokázáno snížení BSK, CHSK a TOC po aplikaci IZ [2]. Spíše perličkou je pak československý výzkum z 80. let, který se zabýval možností využití kobaltu-60 pro regeneraci biologicky zanesených vrtů surové vody a pro snížení množství kyanidových aniontů; tato metoda byla údajně široce

využívána v NDR na více než 600 vrtech za použití již nedostatečně aktivních terapeutických zářičů ze zdravotnických zařízení [3].

Problematika využití radionuklidů či obecně ionizujícího záření je omezována především negativním pohledem většinové laické veřejnosti na tyto technologie, což je zapříčiněno všeobecně známými haváriemi JE Černobyl a Fukušima. Možná i proto se objevují názory, že slovo *jaderná* v metodě „jaderná magnetická rezonance“ se nahrazuje méně provokativním slovem nukleární. Je však nutné se na tyto metody podívat z úhlu pohledu odborné veřejnosti; zda opravdu IZ může být progresivní metodou pro degradaci ARG ve vodách (resp. vodných roztocích, kterým se věnuje tento příspěvek), či nikoli.

2. Antibiotická rezistence a ARG

Antibiotika (ATB) samotná lze rozdělovat do skupin dle mechanismu účinku na v těle nežádoucí buňky – inhibice syntézy buněčných stěn, depolarizace buněčných membrán, inhibice proteosyntéz, inhibice syntéz nukleových kyselin a inhibice metabolických cyklů a procesů. Buňka mající rezistenci vůči ATB pak může proti tomuto bojovat snížením propustnosti buněčné stěny pro antibiotikum (snížením množství pórů), modifikací vazebného místa, inaktivací molekuly ATB (degradací nebo naopak adicí chemické skupiny) či aktivního vypuzování ATB z buňky [1, 4]. Tyto mechanismy jsou následně zakódovány do genetické informace buňky a rezistence tak může být předávána dalším generacím.

Z výše uvedeného vyplývá, že tyto mechanismy jsou specifické pro jednotlivé skupiny ATB. Existují však také tzv. multirezistentní organismy, což jsou mikroorganismy vykazující rezistenci vůči alespoň třem skupinám ATB zároveň. Léčba takových onemocnění je extrémně náročná a vyskytují se především v často dezinfikovaných nemocničních prostorách, jako jsou JIP nebo operační sály [1].

Je nutné taktéž rozlišovat pojmy rezistence a perzistence – v případě perzistence je buňka inertní vůči antibiotiku, avšak neobsahuje ARG (cca 1 % všech buněk dané kolonie bez návaznosti na jiné organismy); dceřiné buňky již tuto vlastnost nemají. V případě rezistence pak již buňka ARG obsahuje a tato vlastnost se tím přenáší i na další generace. Tato vlastnost může být buňkami získána přirozeně (buď je aktivní součástí přirozenou součástí, nebo je již přítomný gen aktivován stykem s antibiotiky), nebo uměle (mutace) [4]. Dalším výrazným rizikem je skutečnost, že ARG bývají zastoupeny v tzv. *mobile genetic elements* (MGEs), tedy v plasmidech, integronech apod., jež mohou migrovat mezi jednotlivými buňkami (tzv. *horizontální genový transfer*, HGT).

3. Působení ionizujícího záření na geny

Jako ionizující záření je považováno každé záření, které je schopno produkovat v ozářené látce excitované i ionizované stavy (tedy páry kladných iontů s elektrony) – těmito mechanismy a zákonitostmi se zabývá vědní obor radiační chemie. Mezi takové záření počítáme všechny druhy záření emitované přirozenými i umělými radionuklidy, urychlované nabitě částice (e^- , p^+ , d^+ , heliony...), neutrony a elektromagnetické záření s energií vyšší než cca 50 eV na kvantum (odpovídající vlnové délce menší než 25 nm) [5]. Klasické ve vodním hospodářství využívané UV záření tedy nespadá do kategorie ionizujícího záření.

Z hlediska mechanismu působení IZ na látku rozlišuje dvě kategorie účinků – přímé a nepřímé. Obě mají za následek poškození (v tomto případě mikrobiální) genetické informace, případně jiných komponent zásadně potřebných pro život buněk [6].

Přímý účinek vyvolává štěpení vazeb (především vodíkových můstků, ale i dalších vazeb vedoucích k fragmentaci a zkracování řetězců [7]) mezi atomy v molekulách nukleových kyselin, čímž dojde k jejich (mnohdy nevratnému) poškození. Vzhledem k poměrům množství

rozpuštědla a rozpuštěných látek ve vodných roztocích jsou však přímé účinky prakticky zanedbatelné [5].

Nepřímý mechanismus spočívá v excitaci vody, která je většinou součástí buněčných komponent, a vzniku velké škály volných radikálů jakožto produktů, např. $\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$, solvatované elektrony e_{aq}^- , $\text{HO}_2\cdot$, $\text{O}\cdot$, H_{aq}^+ ; které jsou z většiny nestabilní (stabilními produkty jsou pouze H_2 , O_2 a H_2O_2) [5]. Tyto radikály následně způsobují nepřímé poškození buněk skrze oxidační a redukční procesy vedoucí k metabolické disturbanci, fragmentaci DNA, případně až deaktivaci ARG [6]. Solvatované elektrony výrazně napadají thyminové báze, hydroxylové anionty obecně celé DNA [7].

4. Aktuální stav poznání této problematiky

Problematika využití ionizujícího záření pro degradaci genů antibiotické rezistence se začala objevovat ve vědeckém výzkumu teprve okolo roku 2014 (i když jsou v současné době metody degradace rozpracovány pro klasické pokročilé oxidační metody, jako je např. ozonizace, fotokatalýza, působení ultrafialového záření nebo chlorace). Za deset let výzkumu vzniklo na celém světě pouze několik studií, přičemž všechny byly realizovány v Číně (kaly obsahující ARG jsou tam totiž klasifikovány jako nebezpečný odpad); pro Evropu se tedy dosud jedná o neznámou možnost potenciálního řešení problematiky antibiotické rezistence, byť zatím pouze v laboratorním měřítku. Využití IZ se totiž v historii omezovalo obecně na degradaci toxických org. sloučenin (pesticidy, herbicidy nebo PCB) nebo na dezinfekci vody či čistírenských kalů formou inaktivace patogenních bakterií (např. *Salmonella*) a virů; nikoli ARG [8, 9].

Již nyní je jasné, že degradace antibiotik samotných (včetně využití IZ v podobě gama záření či elektronového svazku [6]) je závislá na mnoha parametrech – např. na absorbované dávce, počáteční koncentraci, hodnotě pH, iontové síle roztoku, ale i na mnoha dalších; zatímco u ARG je výzkum v takových začátcích, že tyto vlivy nejsou dosud zjištěny a popsány. Můžeme se opírat pouze o zjištěné vlivy na bakterie a geny samotné, kde záleží na druhu, absorbované dávce, procentu vody v organismu, pH a další. Zatím jediným prokazatelným parametrem ovlivňujícím degradaci je pH, kde při neutrálních hodnotách je degradace vyšší než v případě kyselých / alkalických podmínek [6].

Je předpoklad, že díky využití IZ nebude docházet k opětovnému nárůstu i bez použití chloračních prostředků, což je jedna z hlavních výhod využití tohoto procesu. Nevýhodou je že vznikající radikály a záření nereagují primárně s ARG, ale i se všemi ostatními ve vodě přítomnými specii. Pro zvýšení účinnosti se tak počítá s použitím paralelní chemické oxidace např. pomocí peroxidu nebo peroxymonosulfátu (PMS) [6, 10].

Pro experimenty s ionizujícím zářením je využíván ve většině případů kobaltový zdroj (^{60}Co , $T_{1/2} = 1925$ d, $E = 1173$ a 1332 keV), případně elektronový svazek. Praktické použití jiných zdrojů IZ nebylo nalezeno, v teoretické rovině je zmiňováno ještě cesium-137. Důležitým parametrem pro technické provedení je polotloušťka záření pro vodní sloupec; ta je pro ^{60}Co 28 cm, ^{137}Cs 23 cm a pro elektronový svazek 3 mm na každý MeV [9, 11].

Drtivá většina studií čínských výzkumných skupin byla publikována v době od roku 2019, kdy první vlaštvou byla práce [8]. V rámci té bylo konstatováno, že oblast použití IZ pro degradaci ARG je opravdu půdou neoranou, přičemž teoretické předpoklady slibují výsledky využitelné v technologické praxi. Experimenty byly realizovány ozařováním kobaltovým zářičem (20 kCi, dávkový příkon 14,5 kGy/h) s analytickou koncovkou v podobě HPLC a RT-qPCR, přičemž zájmovými geny byly *ereA*, *ereB*, *ermA*, *ermB*, *ermD*, *mefA*, *mefE* a *mphB*. Rozsah odstranění byl 0,05–0,14 log pro dávku 10 kGy a 1,0–1,3 log pro dávku 30 kGy (tedy cca 93 %); paralelní experimenty ukázaly, že bakterie jsou více náchylné na IZ než ARG. Také byl zkoumán vliv pH, kdy bylo zjištěno, že při neutrálním pH dochází k vyšším hodnotám degradace než pro kyselá/alkalická prostředí (mezi pH 5 a 13 cca o půl řádu). Na druhou stranu

jistý synergický efekt je viditelný po přidavku peroxidu vodíku, kdy se pro *ereA*, *ermB*, *mefA* a *mpfB* zvýší degradace až na 1,4–2,2 log.

Jedna ze studií z roku 2020 [12] se věnovala inaktivaci ARG pro cephalosporin C (ATB ze skupiny β -laktamů), který se podílí zhruba na pětina všech prodaných ATB na celém světě. Zdrojem byl kobaltový zdroj o aktivitě 20 kCi; vzorky byly vsádkově vystaveny dávkovému příkonu 0,22 kGy / min s celkovou dávkou 25 až 150 kGy (celková doba tedy mezi cca 2 a 11 h). Analytickou koncovkou bylo HPLC spolu s ddPCR. Účinek na geny byl získán analýzou proteinu *tolC*, který byl degradován ze 74 % pro dávku 100 kGy. Ve stejný rok proběhla paralelní studie [13] se srovnatelnými parametry, kde původní koncentrace *tolC* byla 3 000 j./mL.

O rok později byl podobným týmem realizován výzkum [10] na sedmi různých skupinách ARG s ozařováním ^{60}Co (18 kCi) a analytickou koncovkou v podobě HT-PCR. V rámci této studie bylo zjištěno, že gama záření v dávce 25 kGy bylo účinné pro degradaci všech skupin, avšak s rozdílnou úspěšností: *ermB* (91 %, obtížně odstranitelný biologickými metodami), *ermT*, *ermF*, *maA*, *mel*, *sul2* a *bla_{OXA}* (všechny 80–89 %) a nejméně pro *floR* a *mefA* (cca 63 %) a *tetM* (pouhých 21 %; po přidavku H_2O_2 se účinnost téměř zdvojnásobila). Autoři tak pro zvýšení účinnosti navrhuji společnou oxidaci s PMS v koncentraci 10 mM.

Kromě peroxidu vodíku jako synergického oxidačního činidla byla také zkoumána možnost použití peroxymonosulfátu, např. již zmíněná studie [10] nebo ve studii [14] z roku 2019, který sám působí jako oxidační a dezinfekční činidlo. Zdrojem IZ byl opět totožný kobaltový zdroj jako v předchozích experimentech o aktivitě 20 kCi s analytickou koncovkou RT-qPCR. V rámci experimentů byly vybrány geny *ereA*, *ermA*, *ermB*, *mefA* a *mpfB*, přičemž účinnost byla zaznamenána v hodnotách 48–74 % (pro dávku 25 kGy) a 80–92 % (pro 50 kGy). Největší účinnosti byly zaznamenány pro *mefA* a *mefB*, naopak nejnižší pro *ermA*. Po přidavku 100 mM PMS se účinnost zvýšila až na 2,55 log, což v daném výzkumu znamená větší účinnost odstranění ARG než antibiotik samotných.

Na ARG související s erythromycinem A (*ermB* a *ermF*) se zaměřila další čínská studie [15] z roku 2019 opět používající kobaltový zdroj o aktivitě 10 kCi, dávkovém příkonu 240 Gy/min a analytickou koncovkou v podobě qPCR. Pro dávku 5 kGy byla zjištěna účinnost degradace 87 % pro *ermB* a 96 % pro *ermF*.

Kobaltový zdroj o aktivitě 20 kCi a dávkovém příkonu 11,8 kGy/h byl využit i pro další výzkum [16] realizovaný v roce 2021 za účelem zjištění vlivu IZ na geny *matA*, *mel*, *ermT*, *ermB*, *ermF*, *mefA*, *tetM*, *tetS*, *sulII*, *floR* a *bla_{OXA}* s HT-qPCR jakožto analytickou koncovkou. Pro dávku 10 kGy se hodnoty odstranění velice lišily, a to od 11 do 93 %. Zvýšením na 25 kGy se hodnoty zvýšily na rozpětí 0,8–2,0 log a s dalším zdvojnásobením na 1,5–2,7 log.

K velice podobným hodnotám odstranění okolo 90 % došla i nejnovější studie [7] čínských výzkumníků z letošního února, která opět používala kobaltový zdroj o aktivitě 37 kCi s dávkovým příkonem 3,2 kGy/h. Pro geny *tetO*, *tetA*, *bla_{TEM-1}*, *sulI*, *sulII* a *tetW* byly pro dávku 25,6 kGy zaznamenány hodnoty odstranění 1,02–2,08 log a pro 76,8 kGy 1,62–3,66 log, přičemž v několika případech u vyšší dávky byla hodnota pod LOQ. Byl také zkoumán vliv přidavku (150 mM) ethylenglykolu a (100 mM) tercbutylalkoholu (oboje jako zdroj hydroxylových aniontů), kdy byla zjištěna větší účinnost u *sulI* a *bla_{TEM-1}* o jednotky procent, ostatní geny nepodléhaly změnám (a je tedy předpoklad, že v jejich případě nehrají OH radikály větší roli při degradaci). Zároveň při změně pH nedošlo k výraznějším změnám, což může ukazovat na to, že v případě degradace ARG hrají významnou roli přímé účinky IZ, nikoli nepřímé (se zastoupením až 95 % pro přímé).

Samozřejmě hodnota účinnosti není jediným parametrem vhodnosti či nevhodnosti technologie; velice důležité je i ekonomické hledisko. Srovnání technologií [6] uvádí, že provozní náklady pro využití IZ jsou srovnatelné a mnohdy nižší než pro ostatní metody

(především pro termalizaci). Je však nutné vzít v potaz úvodní náklady spojené se stavebním zabezpečením radiační ochrany a obecně zabezpečení radionuklidového zdroje.

5. Závěr

Použití ionizujícího záření pro degradaci genů antibiotické rezistence je v současné vědě skutečně novým a dosud neprozkoumaným tématem, a to i přes slibné počáteční výsledky. Hodnoty odstranění za pomoci IZ jsou za určitých podmínek srovnatelné s podobnými metodami (filtrace, koagulace, reaktory, mikrovlnné termální metody, chlorace, UV záření...), i když z hlediska technické aplikace je použití těchto metod diametrálně odlišné (už jen kvůli nutnosti radiační ochrany; výhodou je však zařazení metody do oblasti zelené chemie a možnost paralelního využití jako *polishing stupně* v technologii úpravy vody). Na druhou stranu i tyto technicky jednodušší metody mají své nevýhody – v případě použití chloru je riziko vzniků vedlejších produktů dezinfekce, v případě UV záření je v některých případech popsáno obnovení funkce ARG [7].

Je zároveň důležité uvést, že všechny výše uvedené experimenty byly realizovány v laboratorních podmínkách a uměle připravených vodách s vysokými koncentracemi genů (až v miligramech na litr); je tak otázkou, jak se získané výsledky budou měnit s postupným snižováním koncentrací i o několik řádů [10].

Alternativní možností je také použití rentgenového záření; to však nebylo v literatuře pro degradaci genů antibiotické rezistence zatím publikováno. Je zde tedy další možné téma pro českou vědu, která bude v rámci celého světa unikátní a jedinečná.

Literatura

- [1] JANATA, J., NAJMANOVÁ, L., BALÍKOVÁ-NOVOTNÁ, G. *Antibiotická krize: AVex 1/2020*. 2020. Dostupné: <https://www.avcr.cz/export/sites/avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/files/2020-01-ATB-krize.pdf>
- [2] BASFAR, A. A., ABDEL REHIM, F. Disinfection of wastewater from a Riyadh Wastewater Treatment Plant with ionizing radiation. On-line. *Radiation Physics and Chemistry*. 2002, roč. 65, č. 4–5, s. 527–532. ISSN 0969806X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(02\)00346-8](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00346-8)
- [3] VACEK, K., PASTUSZEK, F., SEDLÁČEK, M. Radiation processing applications in the Czechoslovak water treatment technologies. On-line. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*. 1986, roč. 28, č. 5–6, s. 573–580. ISSN 13590197. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/1359-0197\(86\)90193-1](https://doi.org/10.1016/1359-0197(86)90193-1)
- [4] REYGAERT, W. An overview of the antimicrobial resistance mechanisms of bacteria. On-line. *AIMS Microbiology*. 2018, roč. 4, č. 3, s. 482–501. ISSN 2471-1888. Dostupné z: <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.3.482>
- [5] MOTL, A. *Úvod do radiační chemie*. Vyd. 2. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2929-8.
- [6] WANG, J., CHEN, X. Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. On-line. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2022, roč. 52, č. 4, s. 571–630. ISSN 1064-3389. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835124>
- [7] ZHANG, M.-Q., ZHANG, X.-Y., ZHANG, H.-Ch., QIU, H.-B., LI, Z.-H. et al. Gamma-ray irradiation as an effective method for mitigating antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in aquatic environments. On-line. *Journal of Hazardous Materials*. 2024, roč. 468. ISSN 03043894. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133791>

- [8] SHEN, Y., CHU, L., ZHUAN, R., XIANG, X., SUN, H. et al. Degradation of antibiotics and antibiotic resistance genes in fermentation residues by ionizing radiation: A new insight into a sustainable management of antibiotic fermentative residuals. On-line. *Journal of Environmental Management*. 2019, roč. 232, s. 171–178. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.050>
- [9] WANG, J., WANG, J. Application of radiation technology to sewage sludge processing: A review. On-line. *Journal of Hazardous Materials*. 2007, roč. 143, č. 1–2, s. 2–7. ISSN 03043894. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.027>
- [10] CHU, L., WANG, J., CHEN, Ch., HE, S., WOJNÁROVITS, L. et al. Advanced treatment of antibiotic wastewater by ionizing radiation combined with peroxymonosulfate/H₂O₂ oxidation. On-line. *Journal of Cleaner Production*. 2021, roč. 321. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128921>
- [11] LESSEL, T. *Disinfection of sewage sludge by gamma radiation, electron beams and alternative methods*. 1997. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/009/29009774.pdf?r=1
- [12] CHU, L., CHEN, D., WANG, J., YANG, Z., YANG, Q. et al. Degradation of antibiotics and inactivation of antibiotic resistance genes (ARGs) in Cephalosporin C fermentation residues using ionizing radiation, ozonation and thermal treatment. On-line. *Journal of Hazardous Materials*. 2020, roč. 382. ISSN 03043894. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121058>
- [13] CHEN, D., CHU, L., DING, M. Comparison of the efficiency of gamma irradiation and pyrolysis on the reduction of antibiotic and cephalosporin resistance gene from cephalosporin fermentation residues. On-line. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020, roč. 176. ISSN 0969806X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109059>
- [14] CHU, L., CHEN, D., WANG, J., YANG, Z., SHEN, Y. Degradation of antibiotics and antibiotic resistance genes in erythromycin fermentation residues using radiation coupled with peroxymonosulfate oxidation. On-line. *Waste Management*. 2019, roč. 96, s. 190–197. ISSN 0956053X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.031>
- [15] SHEN, Y., ZHUAN, R., CHU, L., XIANG, X., SUN, H. et al. Inactivation of antibiotic resistance genes in antibiotic fermentation residues by ionizing radiation: Exploring the development of recycling economy in antibiotic pharmaceutical factory. On-line. *Waste Management*. 2019, roč. 84, s. 141–146. ISSN 0956053X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.039>
- [16] CHU, L., WANG, J., HE, S., CHEN, Ch., WOJNÁROVITS, L. et al. Treatment of pharmaceutical wastewater by ionizing radiation: Removal of antibiotics, antimicrobial resistance genes and antimicrobial activity. On-line. *Journal of Hazardous Materials*. 2021, roč. 415. ISSN 03043894. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125724>

POSSIBILITIES OF USING IONIZING RADIATION TO SOLVE THE PROBLEM OF ANTIBIOTIC RESISTANCE GENES DEGRADATION IN WATER

Keywords: antibiotic resistance genes, ARG, polishing mechanisms

The issue of the generally increasing level of antibiotic resistance in today society and the possibility of its solution is one of the rapidly growing topics in the scientific world. The focus is no longer primarily on the removal of individual antibiotic molecules itself from agricultural sludge and water discharged into the environment, but also on the degradation of antibiotic resistance genes (ARGs) themselves. Classical methods such as ozonation or thermal treatment of these process components have been relatively widely discussed, researched, and

implemented, but the possibility of using ionising radiation in this technology has only been in its infancy for the last 15 years or so. This is even though most of the few currently available studies report comparable economic performance – the lower degradation rate is then compensated by the effect of IR on other constituents in the water, which can thus also act as a polishing stage of the technology. This paper aims to describe the current state of knowledge on the use of IR for degradation of antibiotic resistance genes and to summarize the possibilities for research in the Czech context.

STANOVENÍ AKTIVIT ^{210}Pb A ^{210}Po EXTRAČNÍ CHROMATOGRAFIÍ ZA ÚČELEM ZVÝŠENÍ CHEMICKÉHO VÝTĚŽKU OLOVA VE VODĚ A PEVNÝCH MATERIÁLECH

Ivan Hupka

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i., Bartoškova 28, 140 00 Praha

e-mail: ivan.hupka@suro.cz

Klíčová slova: extrakční chromatografie, olovo 210, polonium 210

Abstrakt

Chemický výtěžek olova je při postupu stanovení aktivity ^{210}Pb ve vodě a pevných materiálech velmi závislý na vlastnostech matrice vzorku a kolísá v rozsahu až jednoho řádu. Cílem výzkumu je aktualizovat a optimalizovat interní postup „Stanovení ^{210}Pb a ^{210}Po extrakční chromatografií“ tak, aby výkyvy výtěžků byly eliminovány. Na základě informací získaných z on-line workshopu se zaměřením na radiochemické techniky a postupy stanovení ^{210}Pb a ^{210}Po (ALMERA Training Workshop (virtual) on Advanced Topics in Radiochemistry Techniques: Lead-210 and Polonium-210) byly provedeny experimenty s pozměněnými koncentracemi elučních činidel a druhů srážecích činidel. Zároveň byl sledován vliv provedených změn na hodnotu radiochemického výtěžku polonia, tzn. stopovače ^{209}Po , tak, aby navržené změny vzhledem k chemickým vlastnostem polonia jeho výtěžek významně nesnížily.

V příspěvku budou uvedena porovnání výtěžků olova a polonia v závislosti na použitém druhu srážecích činidel a fyzikálně-chemickém procesu úpravy vzorku. Navíc bude jako vsuvka prezentován modelový výpočet korekčního faktoru pro stanovení aktivity ^{210}Po při známé aktivitě ^{210}Pb k referenčnímu datu.

DOPORUČENÍ STÁTNÍHO ÚŘADU PRO JADERNOU BEZPEČNOST „MĚŘENÍ A HODNOCENÍ OBSAHU PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ V MATERIÁLECH MOŽNÝM ZVÝŠENÝM OBSAHEM PŘÍRODNÍCH RADIONUKLIDŮ“ – PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI A PODNĚTY K JEHO REVIZI

Tomáš Bouda

*ALS Czech Republic, s.r.o., Na Harfě 336/9, 190 00 Praha 9,
Laboratoř Česká Lípa, Bendlova 1687/7, 470 01 Česká Lípa,
e-mail: Tomas.Bouda@ALSglobal.com*

Klíčová slova: Doporučení SÚJB, přírodní radionuklidy, měření a hodnocení, materiály NORM, pevný radioaktivní materiál NORM, odpadní voda NORM

Abstrakt

V České republice se měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v materiálech s možným zvýšeným obsahem přírodních radionuklidů (NORM) provádí od roku 2018 dle Doporučení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) „Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 95 odst. 1 písm. b) atomového zákona“. Během šesti let praktického používání tohoto doporučení jsme získali zkušenosti, na jejichž základě v tomto článku navrhujeme úpravu či zpřesnění některých kritérií, jak pro měření, tak pro hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v materiálech NORM (odpadní vody NORM, jakož i pevné radioaktivní látky PRA L NORM).

1. Úvod

V roce 2017 vešel v platnost *atomový zákon* (dále jen AZ) **č. 263/2016 Sb.** [1], jenž rozšířil činnosti, ke kterým je třeba povolení SÚJB i na odpady (odpadní vody OV a pevné „radioaktivní látky“ PRA L), jež jsou uvolňovány z pracovišť s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření (např. úpravny pitné vody obsahující zvýšené objemové aktivity některých radionuklidů a zejména různé výrobní procesy, které zpracovávají suroviny se zvýšeným obsahem přirozených radionuklidů, jež se koncentrují v odpadech z této výroby). AZ se zabývá nejenom podmínkami práce na těchto pracovištích, ale definuje i požadavky na provádění měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v látkách uvolňovaných z těchto pracovišť. Podrobněji je tato problematika zpracována v prováděcí **vyhlášce č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje (vyhláška)** [2] a v poměrně rozsáhlém **Doporučení SÚJB „Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 95 odst. 1 písm. b) AZ“ (Doporučení NORM)** [3]. Na tyto odpady se vztahují tedy nejenom běžné požadavky zákona o odpadech [4], ale i tyto speciální požadavky definované v AZ a v prováděcí vyhlášce.

Radionuklidy přirozeného původu označené anglickou zkratkou NORM z *Naturally Occurring Radioactive Materials* [5] jsou materiály, v nichž díky lidské činnosti došlo ke zvýšení

koncentrace přírodních radionuklidů [3], které se jinak vyskytují všude kolem nás. Materiály NORM jsou zpravidla průmyslové odpady nebo vedlejší produkty obohacené radioaktivními prvky, nacházejícími se v životním prostředí, jako je uran, thorium a draslík a jejich rozpadové produkty, jako jsou např. izotopy radia, olova a polonia, včetně dalších izotopů uranu a thoria. Uvedenou právní úpravou [1, 2] jsou stanoveny, jako součást pracovišť NORM, podmínky pro uvolňování radioaktivní látky z těchto pracovišť a podmínky radiační ochrany obyvatel při tomto uvolňování. Provozovatelé těchto pracovišť jsou kromě jiného povinni zajistit uvolňování materiálu NORM z těchto pracovišť jen v souladu se stanovenými podmínkami. Na základě výsledků měření obsahu přírodních radionuklidů v uvolňované radioaktivní látce a jejich porovnání se stanovenými **uvolňovacími úrovněmi (UÚ)**, musejí provozovatelé pracovišť zvolit vhodný způsob nakládání s radioaktivní látkou uvolňovanou z pracoviště. Radioaktivní látku lze z pracoviště uvolňovat za dodržení stanovených podmínek bez povolení SÚJB nebo s povolením SÚJB dle § 9 odst. 2 písm. e) AZ [1].

Legislativními, „odpadářskými“, jakož i analytickými aspekty metod analýzy uvolňovaných materiálů NORM jsme se zabývali již dříve v přednáškách na konferencích Analytika odpadů či Radiologické metody v hydrosféře [6–9].

Postupy k provádění systematického měření a hodnocení obsahu radionuklidů v radioaktivních látkách obsažené v pevných materiálech (dále též PRA_L) a zásady postupu při překročení uvolňovacích úrovní jsou detailně popsány v Doporučení NORM „Část 1 – Uvolňování pevných materiálů“ [3].

Za měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v PRA_L uvolňovaných z pracoviště NORM se považuje **gamaspektrometrické stanovení hmotnostních aktivit dlouhodobých přirozených radionuklidů** (s poločasem radioaktivní přeměny delším než 100 dnů) uranové a thoriové přeměnové řady a ^{40}K . Neberou se do úvahy radionuklidy aktiniové rozpadové řady (výchozí člen této řady, ^{235}U , má hmotnostní aktivitu rovnou jen 4,6 % aktivity ^{238}U , který je výchozím členem uranové či U-Ra přeměnové řady). V *tab. 1* je uveden přehled radionuklidů uranové i thoriové přeměnové řady a ^{40}K , přičemž je zvýrazněno 10 radionuklidů, pro něž jsou stanoveny UÚ.

UÚ PRA_L, včetně jejich ukládání na skládky odpadu, opakovaného použití, recyklace a spalování, z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření, jsou stanoveny v § 105 odst. 1 a 2 vyhlášky [2].

UÚ se nepovažují za překročené, pokud průměrná hmotnostní aktivita žádného radionuklidu uranové a thoriové přeměnové řady a ^{40}K není větší než stanovená hodnota UÚ. Průměrné hodnoty se vztahují na množství uvolňovaných materiálů, v nichž lze hmotnostní nebo objemovou aktivitu každého NORM radionuklidu považovat za homogenní.

UÚ pro uvolňování PRA_L uvedené v § 112 odst. 1 písm. a) až c) vyhlášky jsou **1 000 Bq/kg** pro radionuklidy uranové a thoriové řady a **10 000 Bq/kg** pro ^{40}K (což odpovídá hmotnostní koncentraci draslíku 31,6 %) a **vztahují se na pevný materiál v tom stavu, v jakém je uvolňován (tj včetně vlhkosti)**.

Měření a hodnocení obsahu radionuklidů v PRA_L uvolňované z pracoviště musí být provedeno poprvé při zahájení provozu pracoviště a poté při každé změně, která by mohla ovlivnit obsah radionuklidů v PRA_L, nejméně však jednou za rok (§ 98 odst. 2 vyhlášky).

Za zajištění měření a za dodržení požadavku, že obsah radionuklidů v uvolňované PRA_L splňuje požadavky AZ a vyhlášky, odpovídá provozovatel pracoviště.

V případě uvolňování PRA_L se jedná zpravidla o diskontinuální uvolňování. Měří se vzorky odebrané před tím, než PRA_L opustí pracoviště. V případě kontinuálního uvolňování se vzorky odebírají v průběhu uvolňování. S ohledem na požadovaný gamaspektrometrický postup stanovení aktivity radionuklidů a na požadavek dosažení dostatečně nízké nejistoty stanovení je nutno počítat s dobou na provedení analýzy 5–6 týdnů od předání vzorku laboratoři.

V tomto příspěvku shrnuji již dříve uvedené připomínky k Doporučení NORM, jakož i další, ke kterým jsme dospěli během 6leté praktické zkušenosti s aplikací Doporučení NORM na analyzované a hodnocené materiály NORM.

Tab. 1. Přehled radionuklidů uranové a thoriové přeměnové řady a ^{40}K , s uvedeným typem a poločasem radioaktivní přeměny (zvýrazněny NORM radionuklidy s $T_{1/2} > 100$ dní)

Uranová přeměnová řada			Thoriová přeměnová řada		
Radionuklid	Poločas $T_{1/2}$	přeměna	Radionuklid	Poločas $T_{1/2}$	přeměna
^{238}U	$4,468 \cdot 10^9$ r	α	^{232}Th	$1,402 \cdot 10^{10}$ r	α
^{234}Th	24,10 d	β	^{228}Ra	5,75 r	β
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1,159 min	β	^{228}Ac	6,15 h	β
^{234}U	245 500 r	α	^{228}Th	1,9126 r	α
^{230}Th	75 380 r	α	^{224}Ra	3,631 d	α
^{226}Ra	1 600 r	α	^{220}Rn	55,8 s	α
^{222}Rn	3,8232 d	α	^{216}Po	0,148 s	α
^{218}Po	3,071 min	α	^{212}Pb	10,64 h	β
^{214}Pb	26,916 min	β	^{212}Bi	60,54 min	α (35,93 %); β
^{214}Bi	19,8 min	β	^{212}Po	300 ns	α
^{214}Po	162,3 μs	α	^{208}Tl	3,058 min	β
^{210}Pb	22,23 r	β	^{208}Pb	stabilní	-
^{210}Bi	5,011 d	β	Radioaktivní izotop draslíku		
^{210}Po	138,3763 d	α	^{40}K	$1,250 \cdot 10^{10}$ r	β (89,25 %); EC
^{206}Pb	stabilní	-	$^{40}\text{Ca} / ^{40}\text{Ar}$	stabilní, vzniká přeměnou β / EC	

2. Zahrnovat stanovení ^{40}K k měřeným a hodnoceným radionuklidům NORM, či ne?

Mezi NORM radionuklidy patří i izotop draslíku ^{40}K , který netvoří rozpadovou řadu. Zastoupení ^{40}K v přírodním draslíku je konstantní, 1 % K odpovídá aktivitě ^{40}K 316.6 Bq/kg [7]. V tab. 2 jsou pro informaci uvedeny radiologické parametry některých látek obsahujících draslík, a tudíž i ^{40}K (chemikálie, hnojiva a pro porovnání NORM PRaL s obsahem ^{40}K na uvolňovací úrovni 10 000 Bq/kg]. Příkon dávkového ekvivalentu $\dot{D}$ je spočten dle [11], tj. pro případ, že by látka tvořila vrstvu vysokou cca 1 m, $\dot{D}$ se měřil 1 m nad povrchem vrstvy ve formě válce o poloměru cca 10 m. Efektivní dávka $E_{\text{zevní}}$ odpovídá dle Doporučení [3] hypotetickému případu, že by daný jedinec strávil v bezprostřední blízkosti tohoto „NORM materiálu 2 000 pracovních hodin“. Již dříve [11] jsem nadnesl otázku, zda se musí ^{40}K zařazovat mezi NORM radionuklidy a zda je nutné jeho uvolňování vůbec regulovat. V tab. 2 jsou uvedeny chemikálie či hnojiva, jež nejsou vůbec NORM materiály dle § 87 AZ [1], jsou to výrobky, kterých se uvolňování pravděpodobně netýká. Snad jen podle písmena p) § 87 AZ [1] „nakládání s materiálem, u kterého bylo prokázáno, že obsah přírodního radionuklidu v něm přesahuje uvolňovací úroveň nebo zvyšuje příkon prostorového dávkového ekvivalentu o více než 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ “, by se tato pracoviště mohla zařadit mezi NORM pracoviště (výroba a nakládání s draselnými hnojivy a chemikáliemi). Není však jisté, zda se tak ve skutečnosti děje. Zatím se na nás žádný zemědělský podnik či výrobce draselných solí neobrátil.

Tab. 2. Radiologické parametry různých látek obsahujících draslík

Identifikace látky obsahující draslík	K [%]	^{40}K [Bq/kg]	$\dot{D}$ [$\mu\text{Gy/h}$] dle [11]	$E_{\text{zevní}}$ za 2000 h [mSv]	I index hm. aktivity
Klarkovy obsah K v zemské kůře [10]	2,6	820	0,035	0,07	0,3
Hnojivo KAINIT 10 % K_2O	8,3	2628	0,111	0,22	0,9
KAlSi_3O_8 - živec, orthoklas	14,0	4447	0,188	0,38	1,5
NORM PrRaL na úrovni UÚ	31,6	10000	0,422	0,84	3,3
Hnojivo KORN-KALI 40 % K_2O	33,2	10512	0,444	0,89	3,5
Sůl KNO_3	38,7	12242	0,517	1,03	4,1
Síran draselný 49 % K_2O	40,7	12877	0,543	1,09	4,3
Sůl K_2SO_4	44,9	14205	0,599	1,20	4,7
Hnojivo Draselná sůl 60 % K_2O	49,8	15767	0,665	1,33	5,3
Sůl KCl	52,4	16602	0,700	1,40	5,5
Sůl K_3PO_4	55,3	17492	0,738	1,48	5,8
Sůl KNO_2	56,6	17910	0,756	1,51	6,0
Sůl KCN	60,0	19007	0,802	1,60	6,3
Sůl KF	67,3	21304	0,899	1,80	7,1
Oxid draselný K_2O	83,0	26279	1,109	2,22	8,8
Kovový draslík K	100,0	31656	1,336	2,67	10,6

3. Přehled alternativních metod ke stanovení NORM radionuklidů v pevných materiálech NORM

V případě uvolňování odpadních vod OV je dle Doporučení NORM [3] možno používat i jiné normalizované metody než ty, které jsou citovány v Doporučení NORM, a pokud se jedná o nenormalizované metody nebo modifikované normalizované metody, mohou se po validaci a schválení SÚJB též používat. V případě uvolňování PRaL je striktně předepsáno: „Stanovení radionuklidů se provádí metodou spektrometrie záření gama s vysokým rozlišením; k měření je nutno použít polovodičové HPGe detektory s energetickým měřicím rozsahem 46–2 620 keV“ [3]. Použití jiných metod než gamaspektrometrie s vysokým rozlišením z tohoto hlediska nepřichází do úvahy, což je jednoznačně ke škodě věci, neboť objemové aktivity radionuklidů ^{234}U , ^{230}Th , ^{210}Po a ^{232}Th , které „nelze měřit gamaspektrometricky, se konzervativně odhadují z aktivit gamaspektrometricky přímo stanovitelných radionuklidů dopočtem na základě v přírodě se vyskytujících poměrů jejich aktivit“ [3]. Hmotnostní aktivity radionuklidů ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th lze však s vysokou citlivostí měřit metodou ICP/SFMS [12, 13], hmotnostní aktivitu ^{230}Th jde dokonce měřit i gamaspektrometricky [9], hmotnostní aktivity ^{238}U a ^{232}Th lze měřit i metodou ICP/MS, či dokonce ICP/OES, hmotnostní aktivitu ^{40}K lze zjistit dopočtem ze stanovené hmotnostní koncentrace K (metodou AAS/F či ICP/OES) a konečně existují i metody stanovení ^{210}Po na základě detekce jeho záření alfa po separaci ^{210}Po z matrice vzorku.

V některých případech lze použitím alternativních analytických metod změnit způsob uvolňování PRaL, neboť konzervativní odhady hmotnostních aktivit ^{234}U , ^{230}Th , ^{210}Po a ^{232}Th v PRaL, uvedené v Doporučení NORM [3], jsou dle provedených rozborů a analýz [8–9] často mnohem vyšší než jejich skutečné hmotnostní aktivity (týká se to zejména ^{230}Th a ^{232}Th), mohou však být výjimečně i podhodnocené.

Stanovení radionuklidů ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th metodou ICP/MS

V současné době se stanovení radionuklidů ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th ve vodách provádí elegantně metodou ICP/MS s vysokým rozlišením, např. ICP/SFMS. Detekční limity na úrovni 0,001–0,004 Bq/l jsou více než dostatečné (v případě ^{238}U a ^{232}Th jsou detekční limity dokonce mnohem nižší). Analýzami tisíců vzorků vod [14–17] jsme jednoznačně prokázali, že ve vodách je ^{234}U aktivně v nadbytku vůči mateřskému ^{238}U , a to tím více, čím je nižší celková koncentrace uranu ve vodě. Pokud se však provádí odstraňování uranu z podzemních vod, je koncentrace uranu ve vodě spíše vyšší a poměr aktivit $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ je obvykle v intervalu $\langle 1,3; 1,7 \rangle$. Konzervativně se dle Doporučení NORM [3] hmotnostní aktivita ^{234}U dopočítává jako dvojnásobek hmotnostní aktivity ^{238}U . Přímým stanovením ^{234}U lze tedy spíše očekávat, že uvolňovaná PRaL z úpraven podzemních vod může v některých případech v parametru ^{234}U lépe vyhovět UÚ než při konzervativním odhadu, nebo ji může naopak zpřesnit, pokud výchozí koncentrace uranu v podzemní vodě je nízká. Navíc je složení podzemních vod v daném místě obvykle víceméně konstantní, a tak poněkud dražší stanovení skutečného obsahu ^{234}U v uvolňované PRaL bude stačit provést jen na počátku provádění systematických rozborů a poté ověřovat cca každých pět let.

Objemové aktivity izotopů Th jsou v podzemní vodě vzhledem k chemickým vlastnostem Th většinou velmi nízké (^{232}Th na úrovni pod 1 mBq/l, ^{230}Th pod 4 mBq/l [14]), takže nelze očekávat ani jejich výrazné nakoncentrování v uvolňovaných PRaL z úpraven podzemní vody na vodu pitnou. Konzervativní odhady hmotnostní aktivity ^{230}Th jako dvojnásobku hmotnostní aktivity ^{238}U a konzervativní odhad hmotnostní aktivity ^{232}Th jako součtu hmotnostních aktivit ^{228}Th a ^{228}Ra [3] budou z tohoto hlediska opět značně nadhodnocené (^{228}Ra bývá v podzemních vodách mnohem více než ^{228}Th a ^{232}Th ; objemové aktivity ^{238}U a ^{234}U jsou o několik řádů vyšší než objemová aktivita ^{232}Th).

I v případě PRaL uvolňovaných z jiných technologických procesů, než je úprava podzemních vod na vodu pitnou, bude platit výše uvedené. Aktivitní poměr $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ se bude blížit k 1 jak v případě, že se většina uranu v procesu zpracování výchozí suroviny vylouží, nebo naopak, pokud uran zůstane v uvolňované PRaL (vyšší hodnota poměru $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ je typická pro podzemní vody, kdy se preferenčně louží ^{234}U oproti ^{238}U [14–17]). Ve většině přírodních horninových a rudných materiálů je hmotnostní aktivita ^{228}Th prakticky rovna hmotnostní aktivitě ^{228}Ra , resp. ^{232}Th . Dopočítávat tedy hmotnostní aktivitu ^{232}Th jako sumu ^{228}Th a ^{228}Ra je značně nadhodnocené a může v případě materiálů primárně obsahujících Th změnit radiologické zařazení PRaL. Pouze v případě některých technologických procesů, kde do kapalně fáze přechází přednostně Ra oproti Th, může být hmotnostní aktivita ^{228}Th v pevné fázi vyšší než hmotnostní aktivita ^{228}Ra [9] a konzervativní odhad hmotnostní aktivity ^{232}Th může být výjimečně dokonce podhodnocen.

Hmotnostní aktivity ^{238}U a ^{232}Th lze měřit i na běžném ICP/MS, či dokonce ICP/OES spektrometru, který vlastní většina moderních laboratoří, jež provádějí stanovení kovů v životním prostředí. Tím se vyhneme dopočtu hmotnostní aktivity ^{238}U z hmotnostní aktivity ^{235}U , neboť stanovení hmotnostní aktivity ^{238}U z hmotnostní aktivity ^{234}Th či $^{234\text{m}}\text{Pa}$ nelze většinou použít v případě vzorků podrobených chemickému zpracování. Jednoznačná výhoda to je v případě ^{232}Th , jak je uvedeno výše, kde jiná možnost není.

Lze tedy doporučit provádět přímé měření hmotnostních aktivit ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th než je konzervativně dopočítávat z hmotnostních aktivit jiných radionuklidů, které mohou mít výrazně odlišnou hmotnostní aktivitu. Současně s tím se stanoví i přesná hmotnostní aktivita ^{238}U .

Stanovení radionuklidu ^{230}Th gamaspektrometricky

Ke stanovení radionuklidů ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{228}Ra , ^{228}Th a ^{40}K v PRA L lze metodu gamaspektrometrie s vysokým rozlišením HRGRS jednoznačně doporučit. Protože se ke stanovení ^{210}Pb musí používat HPGe detektor s tenkým vstupním okénkem (Be či C), lze doporučit současně vyhodnocovat ze spektra analyzovaného vzorku i hmotnostní aktivitu ^{230}Th [9] (energie fotonu 67,67 keV, výtěžek $0,377 \pm 0,021 \%$ [9]). Detekční limit stanovení ^{230}Th se v závislosti na aktivitě ostatních radionuklidů pohybuje v rozmezí 50–200 Bq/kg, což je vzhledem k hodnotě UÚ 1 000 Bq/kg akceptovatelné a určitě lepší než dopočítávat hmotnostní aktivitu ^{230}Th jako dvojnásobek hmotnostní aktivity ^{238}U [3], jak bylo ukázáno výše.

Pokud se spojí gamaspektrometrické stanovení ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{228}Ra , ^{228}Th a ^{40}K se stanovením ^{238}U a ^{232}Th metodou ICP/MS, kterou lze provozovat v každé moderní laboratoři (pro toto stanovení doporučujeme rozklad vzorků tavením se směsí LiBO_2 a $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), zbude z dlouhodobých radionuklidů NORM ke stanovení dopočtem jen ^{234}U a ^{210}Po , což je určitě akceptovatelnější, než stanovovat dopočtem i ^{230}Th a ^{232}Th , pro které jsou konzervativní dopočty většinou velmi nadhodnocené nebo nesprávné. Tím se zlepší zařazování odpadních PRA L z výrob, kde je ve výchozí surovině obsaženo Th (např. fosforečná hnojiva či výroba titanové běloby).

Jiné alternativní metody stanovení radionuklidů NORM

V případě stanovení ^{40}K přichází do úvahy dopočet jeho hmotnostní aktivity ze stanovení draslíku metodami AAS/F či ICP/OES. Protože je však nutno ke stanovení ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{228}Ra a ^{228}Th stejně použít gamaspektrometrii HRGRS, nepřináší tato stanovení ^{40}K žádnou výhodu a ke stanovení K je třeba navíc provést rozklad vzorků. Podrobněji se problematikou hodnocení obsahu ^{40}K v materiálech NORM zabýváme v kapitole 2.

Stanovení ^{226}Ra je možno po rozkladu vzorku provést třeba emanometricky, nicméně podobně jako v případě ^{40}K toto stanovení nepřináší žádnou další výhodu oproti gamaspektrometrii HRGRS, jež se stejně musí pro některé radionuklidy NORM použít.

Posledním radionuklidem, který se stanovuje dopočtem, je ^{210}Po , jehož hmotnostní aktivita se konzervativně odhaduje jako hmotnostní aktivita jeho mateřského nuklidu, ^{210}Pb [3]. Metody přímého stanovení ^{210}Po , zejména v pevných vzorcích, založené na měření jeho záření alfa, jsou velmi pracné a drahé a jejich případné alternativní použití by přicházelo do úvahy v případech, kdy se hmotnostní aktivita ^{210}Pb blíží k hodnotě UÚ 1 000 Bq/kg nebo když je podezření, že v uvolňovaném materiálu může být radioaktivní rovnováha ^{210}Pb a ^{210}Po významně porušena ve prospěch ^{210}Po (např. v popílcích bývá vysoká aktivita ^{210}Pb , a lze tedy očekávat i vysokou aktivitu ^{210}Po). Nicméně vzhledem k poločas radioaktivní přeměny ^{210}Po 138 dnů je možno současný konzervativní odhad jeho aktivity považovat za oprávněný a přiměřený. Většinou se NORM materiály uvolňují po několika měsících a po 4,5 měsících by případně dvojnásobná aktivita ^{210}Po vůči ^{210}Pb poklesla na stejnou hodnotu.

4. Upřesnění doplňujících rozborů při analýze odpadních vod NORM

Za měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v odpadní vodě (OV) uvolňované z pracoviště NORM se považuje provedení základního rozboru a při překročení UÚ provedení doplňujícího rozboru. Základním rozbohem se rozumí měření objemových aktivit prováděné v rozsahu podle tab. 3. UÚ se vztahují na objemové aktivity ve veškerých látkách obsažených ve vypouštěných odpadních vodách. Průměrné hodnoty celkové objemové aktivity alfa (COAA) a celkové objemové aktivity beta (COAB) se vztahují na množství uvolňované odpadní vody, v němž lze objemovou aktivitu považovat za homogenní.

UÚ nezohledňují chemickou toxicitu uranu, která je regulována vodoprávními orgány a orgány veřejného zdraví.

Tab. 3. Uvolňovací úrovně přírodních radionuklidů v odpadních vodách [3]

Ukazatel obsahu radionuklidů v OV	Vypouštění do povrchových vod	Vypouštění do kanalizace pro veřejnou potřebu
Průměrná COAA	0,5 Bq/l	50 Bq/l
Průměrná COAB po odečtení příspěvku ^{40}K	1,0 Bq/l	100 Bq/l

Uvedené UÚ jsou relativně vysoké, zejména v případě vypouštění do veřejné kanalizace. V případě stanovení COAA není vhodná metoda měření odparku s luminoforem ZnS(Ag) dle ČSN 75 7611 Část 4 [18], běžně používaná při analýze pitných vod. Vzhledem k vyššímu obsahu nerozpuštěných látek je nutné zvolit metodu měření odparku proporcionálním detektorem dle ČSN 75 7611 Část 5 [18] nebo srážecí metoda dle ČSN 75 7610 [19], která je nezbytná též v případě vyšší solnosti vzorků.

Při překročení některé z UÚ se za účelem stanovení efektivní dávky jedince z obyvatelstva provádí doplňující rozbor radionuklidů dle tab. 4 [3].

Tab. 4 byla převzata z Doporučení NORM [3] (tam je uvedena jako tab. 7) a do tabulky byly doplněny pro porovnání některé hodnoty z Doporučení SÚJB pro pitnou vodu [20] (tam je uvedena jako tab. č. 4; hodnoty označeny zkratkou PV), pokud byly hodnoty vzájemně v rozporu.

Hodnota příspěvku ^{226}Ra k COAA $1,5 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$ se požívala v případě PV před rokem 2009 [21], od té doby se používá hodnota $1,7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$ [22]. Hodnota příspěvku ^{226}Ra k COAB $0,35 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$ se však nepoužívala ani před rokem 2009 [21], jde zřejmě o tiskovou chybu. Doporučuji v případě ^{226}Ra používat hodnoty pro PV [20].

Do tab. 4 jsem doplnil údaje pro ^{224}Ra , které jsou převzaty z doporučení [20]. Autoři Doporučení NORM [3] zřejmě vypustili z tab. 2 ^{224}Ra vzhledem k jeho poločas radioaktivní přeměny 3,63 dne a předpokladu, že je zahrnuto v analýze mateřského ^{228}Th ; příspěvek ^{228}Th k COAA zvýšili na $5,0 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$, příspěvek k COAB však ponechali $0 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$, jako když se uvažuje samotné ^{228}Th . Příspěvek k COAB by měl být na základě této úvahy $2,2 \text{ s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$. Ve skutečnosti to je však tak, že v přírodních vodách je aktivita ^{228}Th zanedbatelná vzhledem k chemické povaze Th, podobně jako aktivity ^{232}Th či ^{230}Th , naopak v některých horninových formacích bývá v podzemní vodě poměrně vysoká objemová aktivita ^{224}Ra (jednotky Bq/l); toto jsme prokázali v naší laboratoři na několika vzorcích podzemní vody. **Z tohoto hlediska je určitě vhodnější hodnotit příspěvky ^{228}Th a ^{224}Ra v uvolňované OV samostatně, tak jako tomu je v případě PV.**

V případě uvolňování OV z úpraven podzemní vody na vodu pitnou, kde se provádí odstraňování U, lze v případě doplňujícího rozboru jednoznačně doporučit místo stanovování U, stanovení izotopů uranu ^{238}U a ^{234}U jako v případě PV samotných, což je běžné v ostatních evropských zemích. Souvisí to se známým faktem, že ve většině podzemních vod je objemová aktivita ^{234}U ve značném nadbytku vůči objemové aktivitě ^{238}U [14–17].

Odpadní vody NORM nejsou samozřejmě jen z úpraven podzemních vod s vyšší hodnotou COAA na vodu pitnou, ale i z různých technologických procesů zpracování surovin obsahujících U a Th. Hodnocení výsledků rozborů takovýchto vod vyžaduje odbornou erudici, zkušenost a odpovídající instrumentální vybavení (kromě běžných radiologických přístrojů též analyzátory záření gama s vysokým rozlišením /HRGRS/ a pro stanovení dlouhodobějších izotopů U a Th též analyzátory ICP/SFMS).

Tab. 4. Radionuklidy měřené v rámci doplňujícího rozboru odpadních vod uvolňovaných z pracovišť NORM

Radionuklid	Poločas $T_{1/2}$ [den]	Příspěvek k COAA	Příspěvek k COAB	Konverzní faktor
		[s ⁻¹ ·Bq ⁻¹]	[s ⁻¹ ·Bq ⁻¹]	h_{ing} [Sv·Bq ⁻¹]
²¹⁰ Pb	8,12.10 ³	0	1,0	6,9.10 ⁻⁷
²¹⁰ Po	1,38.10 ²	1,0	0	1,2.10 ⁻⁶
²²⁶ Ra	5,84.10 ⁵	1,5 (PV 1,7)	0,35 (PV 0,5)	2,8.10 ⁻⁷
²²⁸ Ra	2,10.10 ³	0	1,0	6,9.10 ⁻⁷
²²⁸ Th	6,99.10 ²	5,0 (PV 1,0)	0 (PV 0)	7,2.10 ⁻⁸
²²⁴ Ra *	3,63	PV 4,1	PV 2,2	PV 6,5.10 ⁻⁸
²³⁰ Th	2,75.10 ⁷	1,0	0	2,1.10 ⁻⁷
²³² Th	5,12.10 ¹²	1,0	0	2,3.10 ⁻⁷
²³⁴ U	8,97.10 ⁷	1,0	0	4,9.10 ⁻⁸
²³⁸ U	1,63.10 ¹²	1,0	2.k _{U,β}	4,5.10 ⁻⁸
Přírodní uran	-	25 s ⁻¹ ·mg ⁻¹	25.k _{U,β} s ⁻¹ ·mg ⁻¹	1,2.10 ⁻⁶ Sv·mg ⁻¹

Poznámky: Pro stanovení hodnoty parametru $k_{U,\beta}$, který popisuje závislost příspěvku radionuklidu ²³⁸U nebo uranu k COAB na době t (dny) mezi odběrem vzorku a měřením COAB, se doporučuje použít vztah: $k_{U,\beta} = 1 - \exp(-0,0288 \cdot t)$.

* - ²²⁴Ra není uvedeno v Doporučení NORM [3]

PV – Hodnoty uvedené v Doporučení SÚJB pro pitné vody [20]

5. Čistírny odpadních vod jako pracoviště NORM, pokud jsou z jiných pracovišť NORM, zejména úpraven podzemních vod na vodu pitnou, přiváděny odpadní vody NORM s vyššími hodnotami UÚ

Ve své praxi jsme se několikrát setkali s tím, že pracoviště NORM z úpraven podzemní vody na vodu pitnou uvolňuje odpadní vody ve formě řídkých kalů do čistíren odpadních vod (ČOV), ať už kanalizací, nebo svozem, v některých případech se tyto „OV“ uvolňují i do trativodů. Někdy jsou tyto OV zadávány na rozbor jako „PRA L NORM“. Jako PRA L NORM obvykle vyhovují hodnotám UÚ, které jsou 1 000 Bq/kg, jako OV však většinou nevyhovují UÚ pro COAA 50 Bq/l. Jako PRA L NORM by neměly být tyto odpady uvolňovány do ČOV. Co s tím? **Řešení je i podle stávajícího Doporučení NORM [3] možné. Je uvedeno v kap. 13.2 Doporučení NORM [3] Uvolňování OV do kanalizace pro veřejnou potřebu:**

Uvolňovací úrovně pro vypouštění odpadních vod do kanalizace pro veřejnou potřebu jsou stokrát vyšší než do povrchových vod. Jejich hodnoty vycházejí z toho, že radionuklidy budou zadrženy a naředěny v čistírně odpadních vod (ČOV).

Jestliže průměrné hodnoty celkových objemových aktivit c_a a c_β nejsou s výhradou nejistoty vyšší než hodnoty uvolňovacích úrovní, lze odpadní vody vypouštět bez omezení.

Je-li prokazatelně zjištěno překročení UÚ, provede se výpočet hodnot celkových objemových aktivit c_a a c_β v odpadní vodě na vstupu do ČOV. Pokud některá z hodnot překročí hodnotu UÚ pro uvolňování odpadních vod do vod povrchových, stává se ČOV pracovištěm podle § 87 písm. p) vyhlášky [2] „nakládání s materiálem, u kterého bylo prokázáno, že obsah přírodního

radionuklidu v něm přesahuje uvolňovací úroveň nebo zvyšuje příkon prostorového dávkového ekvivalentu o více než $0,5 \mu\text{Sv/h}$. *Jestliže jsou ve vodě vypouštěné z ČOV překročeny uvolňovací úrovně COAA a COAB pro uvolňování do povrchových vod, postupuje se způsobem popsaným v kapitole 12.1.*

6. Akreditace zkušební laboratoře vs. program zajištění radioační ochrany

Aby jakákoli zkušební laboratoř (ZL) získala od SÚJB povolení k měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření, musí mimo jiné předložit tzv. **Program zajištění radiační ochrany (PZRO)**, který v mnohém dubluje existující **Příručku kvality ZL** včetně celého systému zajišťování a kontroly kvality práce ZL, pokud je ZL samozřejmě ke své činnosti akreditována ČIA, o. p. s. **Tyto rozборы však mohou provádět i neakreditované subjekty, nebo subjekty, které nemají všechny prováděné analýzy akreditovány, neboť akreditace ZL není z hlediska PZRO požadována.** V řadě činností řízených státem je akreditace ZL postačující, resp. je přímo vyžadována (rozborů pitných vod, odpadních vod, odpadů atd.). Nelze popřít, že radiologické rozborů mají svá specifika a že určitě musí mít ZL pracovníky se Zvláštní odbornou způsobilostí (ZOZ) k provádění této činnosti, či že ZL musí od SÚJB získat příslušné povolení. **Místo PZRO by mělo být dostačující vyjádření ZL podpořené všemi potřebnými doklady ke všem požadavkům SÚJB v Žádosti subjektu o toto povolení. Lze si představit i jakousi zkrácenou verzi PZRO.** SÚJB určitě nemá dostatek kvalifikovaných odborníků ke kontrole činnosti ZL. K tomu je tady státní orgán **Český institut pro akreditaci, o. p. s.**

V důsledku této dvojakosti působí na trhu laboratoře, jež sice mají Povolení SÚJB k provádění těchto radiologických rozborů, ale v některých činnostech by nevyhověly požadavkům ČIA, o. p. s., na akreditaci.

Dalšími příklady jsou např. požadavky Doporučení NORM [3] na Protokol o zkoušce (kapitoly 7.6 a 12.3 Doporučení NORM). Akreditovaná ZL nemůže vydat Protokol o zkoušce, aniž by byl podepsán v souladu s Příručkou kvality PK. Nemusí na protokole uvádět identifikaci osob, jež měření provedly, protože zkoušky mohou provádět jenom osoby, které mají k provádění zkoušek kvalifikační předpoklady a které byly k provádění dané zkoušky prokazatelně zaškoleny. Podobně ZL nemusí na Protokole o zkoušce uvádět seznam použitých přístrojů a pomůcek, čísla ověřovacích listů a dobu platnosti ověření, protože musí dodržovat ustanovení PK a související dokumentace, tj. nemůže se stát, že by ke zkouškám použila přístroj s prošlou či neplatnou kalibrací či ověřením. Pokud by se tak i stalo, dané ZL hrozí odebrání akreditace, čímž by skončila i její činnost na trhu včetně všech důsledků.

Určité skloubení požadavků SÚJB s akreditačními požadavky ČIA, o. p. s., může tedy přinést jen výhody, které zkvalitní celý proces radiologických zkoušek a ušetří zkušebními laboratořím nadbytečnou a často dublující práci.

7. Závěr

Naše laboratoř má akreditaci ČIA již od roku 1993. Hodnocení radiologických rozborů dle požadavků atomového zákona a příslušných Doporučení SÚJB provádí od roku 2005. Ročně uskutečníme desítky tisíc radiologických rozborů. Během šesti let praktického používání Doporučení SÚJB NORM [3] „*Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 95 odst. 1 písm. b) atomového zákona*“ jsme došli k názoru, že některá ustanovení Doporučení NORM bude vhodné při příští revizi aktualizovat s ohledem na současnou situaci.

Jde zejména o tyto oblasti:

- 1) Radionuklid ^{40}K je bezpochyby NORM radionuklid, jeho zahrnutí do souboru deseti nejvýznamnějších NORM radionuklidů, pro které jsou stanoveny uvolňovací úrovně UÚ, je však minimálně sporné. Draslík je totiž poměrně rozšířený prvek v zemské kůře, průměrná hmotnostní aktivita jeho přírodního izotopu ^{40}K je cca 800 Bq/kg. Sám draslík je biogenní prvek, jeho koncentrace v lidském těle je víceméně konstantní, v případě pitných vod není jeho aktivita započítávána do indikativní dávky ID. Navíc jeho UÚ je velmi vysoká, 10 000 Bq/kg, čemuž odpovídá hmotnostní koncentrace draslíku 31,6 %. V běžných uvolňovaných NORM materiálech není UÚ překračována, jenom v některých chemikáliích a hnojivech je této hodnoty dosaženo. **Jedná se ale o výrobky a nemyslím si, že sklady a výroba draselných chemikálií či hnojiv jsou posuzovány jako NORM pracoviště**, i když by se tam podle písm. p) § 87 AZ [1] zařadit mohly. Potom by nebylo třeba se hodnocením obsahu ^{40}K v uvolňovaných NORM materiálech zabývat. I v případě odpadních vod NORM se do hodnocení celkové beta aktivity nezapočítává příspěvek od ^{40}K .
- 2) Zásadnější připomínka se týká nemožnosti použít k analýzám pevných NORM materiálů alternativní metody k jediné doporučené metodě gamaspektrometrie s vysokým rozlišením HRGRS. Gamaspektrometricky přitom není možno přímo stanovit ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th a ^{210}Po (^{230}Th s vyšším detekčním limitem cca 50–200 Bq/kg, což ale Doporučení NORM též zatím neumožňuje). V Doporučení NORM se jejich hmotnostní aktivita stanovuje konzervativním odhadem, který je, jak bylo ukázáno v článku, někdy velmi nepřesný. Dlouhodobé izotopy U a Th je možno sofistikovaně stanovit s vysokou citlivostí a správností metodou ICP/SFMS nebo některé z nich pouze metodou ICP/MS. **Příští revize Doporučení NORM by pro případ pevných NORM materiálů měla umožnit použití validovaných alternativních metod tak, jak to nyní umožňuje pro odpadní vody NORM.**
- 3) V článku je pro případ OV navrženo upřesnění korekcí příspěvků významných přírodních radionuklidů k celkové objemové aktivitě alfa a beta.
- 4) Konečně poslední doporučení se týká Programu zajištění radiační ochrany PZRO, jenž v případě akreditovaných laboratorí určitým způsobem dubluje jejich Příručku kvality PK. Stávající situace je rozebrána a je navrženo skloubení požadavků SÚJB s akreditačními požadavky ČIA, o. p. s., které může přinést oboustranné výhody, jež zkvalitní celý proces radiologických zkoušek.

Literatura

- [1] ZÁKON č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů, Sbírka zákonů č. 263/2016, Částka 102, s. 3 938–4 066. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263-2016.pdf>
- [2] Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, Sbírka zákonů č. 422/2016, Částka 172, s. 6 618–6 904.
- [3] DOPORUČENÍ SÚJB „Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v radioaktivní látce uvolňované z pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření podle § 95 odst. 1 písm. b) atomového zákona“, DR-RO-5.3(Rev. 0.0), č. j. SÚJB/OS/20299/2017, SÚJB Praha, listopad 2017, 129 s. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/DR-RO-5-3-Rev-0-0-Doporučení-uvolnovani-ML2.pdf>
- [4] ZÁKON č. 185/2001 Sb., Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů; dostupné z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/%24file/Z%20185_2001.pdf

- [5] WIKIPEDIA, definice zkratky NORM. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Naturally_occurring_radioactive_material
- [6] BOUDA, T. *Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v odpadech uvolňovaných z pracovišť s možností výskytu jejich zvýšeného obsahu* (Measurement and evaluation of the content of natural radionuclides /NORM/ in waste released from workplaces with the possibility of their increased content). Sborník konference ANALYTIKA ODPADŮ V (Proceedings of the Conference WASTE ANALYTICS V), Litomyšl 2018, s. 85–97.
- [7] BOUDA, T. *Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v odpadech uvolňovaných z pracovišť s možností jejich zvýšeného obsahu – praktické zkušenosti a doporučení* (Measurement and evaluation of natural radionuclide content /NORM/ in wastes released from workplaces with the possibility of their increased content – practical experience and recommendations). Sborník z konference Radiologické metody v hydrosféře 19 (Proceedings from the Conference Radiological methods in hydrosphere 19), ISBN 978-80-88238-14-0. Třebíč 2019, s. 35–41.
- [8] BOUDA, T., VOŠAHLÍKOVÁ, I. *Specifika odpadů se zvýšeným obsahem přírodních radionuklidů vznikajících na tzv. pracovištích NORM* (Specifics of wastes with increased content of natural radionuclides generated at the so-called NORM workplaces). Sborník konference ANALYTIKA ODPADŮ VII (Proceedings of the Conference WASTE ANALYTICS VII), Litomyšl 2021, s. 76–91.
- [9] BOUDA, T. *Měření a hodnocení obsahu izotopů thoria ^{232}Th a ^{230}Th v odpadních materiálech NORM z úpravy podzemní vody na vodu pitnou* (Measurement and assessment of thorium ^{232}Th and ^{230}Th isotope contents in NORM waste materials from groundwater treatment for drinking water). Sborník z konference Radiologické metody v hydrosféře 23 (Proceedings from the Conference Radiological methods in hydrosphere 23). ISBN 978-80-88238-27-0. Kutná Hora 2023, s. 41–49.
- [10] A. M. HELMESTINE. *Chemical Composition of the Earth's Crust – Major Elements in Earth's Crust*, 2019. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/chemical-composition-of-earths-crust-elements-607576>
- [11] IAEA-TECHDOC-1363, International Atomic Energy Agency (July 2003). Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, Table 2.6, p. 18, IAEA, Vienna. Dostupné z:
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf
- [12] BOUDA, T. *Porovnání radiologických a hmotnostně spektrometrických metod stanovení radionuklidů*. V. konference „Radiologické metody v hydrosféře 11“, Třeboň, květen 2011.
- [13] VLČEK, J., BOUDA, T. *K možnostem stanovení obsahu přírodních radionuklidů v pevných odpadech uvolňovaných z úpraven podzemní vody*. V. konference „Radiologické metody v hydrosféře 11“, Třeboň, květen 2011.
- [14] BOUDA, T. *Objemové aktivity radionuklidů ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th a ^{232}Th a izotopické poměry $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách* (Activity concentrations of ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{230}Th and ^{232}Th and isotopic ratios of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in waters). Sborník z konference Radiologické metody v hydrosféře XV (Proceedings from the Conference Radiological methods in hydrosphere XV). ISBN 978-80-86832-84-5. Uherské Hradiště 2015, s. 74–82.
- [15] BOUDA, T. *Porovnání stanovení uranu se stanovením izotopů uranu ^{238}U a ^{234}U ve vodách s ohledem na novou evropskou a českou radiologickou legislativu pitných vod* (Comparison of uranium determination with the determination of isotopes of uranium ^{238}U and ^{234}U in waters with respect to the new European and Czech Radiological Legislation on Drinking Water). Sborník z konference Radiologické metody v hydrosféře 17 (Proceedings

from the Conference Radiological methods in hydrosphere 17). ISBN 978-80-88238-00-3. Litomyšl 2017, s. 36–47.

- [16] BOUDA, T. *Evaluation of the dependence of the activity concentrations ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in waters on the ^{238}U activity concentration / Vyhodnocení závislosti poměru aktivitních koncentrací izotopů uranu $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách na aktivitní koncentraci ^{238}U* . Proceedings abstract XIX. Radiochemical conference „RadChem 2022 Report of contributions“. České Budějovice, 15–20 May 2022/Sborník abstrakt XIX. Radiochemické konference „RadChem 2022 Report of contributions“, Mariánské Lázně, 15.–20. květen 2022, s. 215–216.
- [17] BOUDA, T. *Vyhodnocení závislosti poměru aktivitních koncentrací izotopů uranu $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ve vodách na aktivitní koncentraci ^{238}U* (Evaluation of the dependence of the activity concentrations ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ in waters on the ^{238}U activity concentration). Sborník z XXVI. konference „Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství“/Proceedings from XXVI. Conference "Radionuclides and ionizing radiation in water management". ISBN 978-80-802-02982-3. České Budějovice, 7.–8. červen 2022. s. 39–53.
- [18] ČSN 75 7611 (2020). Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity alfa [Část 4: Měření směsi odparku vzorku vody se scintilátorem ZnS(Ag); Část 5: Měření zbytku po žíhání okénkovým proporcionálním nebo scintilačním detektorem].
- [19] ČSN 75 7610 (2008). Jakost vod – Stanovení celkové objemové aktivity alfa srážecí metodou.
- [20] SÚJB (2017). DOPORUČENÍ SÚJB „*Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů v pitné vodě pro veřejnou potřebu a v balené vodě*“, DR-RO-5.1(Rev. 0.0) č. j. SÚJB/OS/19078/2017, Praha 2017, 40 s.
- [21] SÚJB (1998). DOPORUČENÍ SÚJB „*Metodiky měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavbách, na stavebních pozemcích a ve stavebních materiálech a vodě*“, SÚJB, Ústav jaderných informací Zbraslav, a. s., září 1998, 40 s.
- [22] DOPORUČENÍ SÚJB (2009). *Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve vodě dodávané k veřejnému zásobování pitnou vodou*, SÚJB Praha, RADIAČNÍ OCHRANA, březen 2009, 39 s.

RECOMMENDATION OF STATE OFFICE FOR NUCLEAR SAFETY "MEASUREMENT AND ASSESSMENT OF THE CONTENT OF NATURAL RADIONUCLIDES IN NORM MATERIALS" – PRACTICAL EXPERIENCES AND SUGGESTIONS FOR ITS REVISION

Keywords: Recommendations of the State Office for Nuclear Safety, natural radionuclides, measurement and assessment, NORM materials, solid radioactive material NORM, wastewater NORM

In the Czech Republic, the measurement and assessment of the content of natural radionuclides in NORM materials has been carried out since 2018 according to the State Office for Nuclear Safety Recommendation "Measurement and assessment of the content of natural radionuclides in radioactive material released from the workplace with the possibility of increased exposure from a natural source of radiation according to § 95 paragraph 1 letter b) of the atomic law". During 6 years of practical use of this Recommendation, we have gained a lot of experience, on the basis of which we propose in this article to modify or refine some criteria, both for measurement and for assessment of the content of natural radionuclides in NORM materials

(NORM waste water, as well as NORM solid radioactive substances). We are not concerned with minor inaccuracies and typographical errors in the current Recommendation, which will surely be corrected in the next revision of the Recommendation.

STANOVENÍ UKAZATELŮ KVALITY VOD Z HLEDISKA METROLOGIE

Tomáš Soukup

*Český metrologický institut – OI Praha, Radiová 1a, 102 00 Praha 10
e-mail: tsoukup@cmi.cz*

Klíčová slova: metrologie, fyzikální veličiny

Abstrakt

České technické normy pro stanovení kvality vod definují ukazatele „Celková objemová aktivita alfa (resp. beta)“. Jejich stanovení a vyhodnocení je velmi užitečné pro rychlou kvantifikaci obsahu radioaktivních látek ve vodě. Z hlediska metrologie ale vyvstávají problémy při uplatnění jednotky Becquerel a také jejich uplatnění v legální metrologii.

1. Úvod

Požadavky radiační ochrany vyžadují velmi různé postupy měření radiační situace, a to podle konkrétního účelu. Monitorování velmi významných zdrojů je důkladné, vybavení nákladné a postupy často zdlouhavé. Ochrana související s přírodními zdroji bývá méně sofistikovaná a zdroje stačí odhadnout jednoduchým měřením. Zato záběh v počtu stanovení musí být vysoký. Jelikož tyto požadavky na stanovení přírodních zdrojů se objevily již před výstavbou jaderných zdrojů, příslušné postupy byly vyvinuty v padesátých letech a s malými změnami jsou používány dosud. Drobný historický přehled obsahuje přednáška J. Vlčka [5], dnes již pozapomenutá. Rád bych poukázal na několik terminologických nepřesností, které tyto postupy přinášejí.

2. Veličiny a jednotky

Fyzikální veličina „aktivita“ ([4], položka 10–27) je definována jako „střední změna počtu jader v konkrétním energetickém stavu vlivem spontánních jaderných přechodů během časového intervalu“. Tento údaj není možné přímo změřit (není to jediná fyzikální veličina). Při určení změny počtu jader vycházíme z důsledků těchto změn. Předpokladem je znalost fyzikálních dějů a dobré modelování důsledků radioaktivních přeměn. Prvním krokem je předpoklad znalosti přítomných atomových jader a jejich přeměnových módů. V druhém kroku modelujeme průchod částic hmotou měřeného vzorku, který si upravujeme tak, aby byla nejistota tohoto kroku velmi malá. V třetím kroku hodnotíme detekci částic zaznamenaných detektorem. Nejistota interpretace může být značná hlavně pro nabitě částice.

Použití jednotky Becquerel (Bq) předpokládá znalost původního jádra i jeho energetického stavu (viz definice). V praxi často neznáme skutečné nuklidové složení vzorku. V tom případě použití jednotky Bq může být matoucí. Pokud přesto jednotku Bq použijeme, měli bychom mít tuto nepřesnost na paměti.

Použití jednotky Bq nelze zcela zavrhnout i při použití na jinou veličinu. Pro jednodušší aplikaci bývalo zvykem používat jednotky ekvivalentní aktivita „X“, kde X bylo nejčastěji ^{137}Cs nebo ^{90}Sr . Při jejím použití je nutné na to zvlášť upozornit a je také důležitá definice toho, co je

„ekvivalentní“. Používaná bývá definice „je to aktivita X, která na daném měřidle vyvolá stejnou odezvu jako měřený vzorek“. Výsledek proto může být přístrojově závislý.

Modelování v druhém a třetím kroku s výhodou provádíme relativním měřením: kalibrací na vzorku nejlépe identického složení a v přesně definované geometrii. Pokud je takový kalibrační vzorek navázán na etalon aktivity, můžeme (se známou nejistotou) stanovit veličinu „aktivita“ v daném vzorku (a odvozeně také objemová – hmotnostní aktivita). Výpočet aktivity je pak stanoven prostou trojčlenkou.

3. Ukazatelé

Ukazatel je kvantitativní odraz skutečnosti. Neplatí striktní požadavek z definice veličiny, nýbrž požadavek obrazu skutečnosti a účelnost – potřebnost pro rozhodování.

Potřeba rychlého stanovení stupně radioaktivní kontaminace v životním prostředí, zejména ve vodě, byla urychlena po vstupu do jaderné éry. Nutnost četných stanovení bez speciálního vybavení vyústila v metody, jež využívají stávající vybavení laboratoří. Podle J. Vlčka [5] se postupy sumárních hodnot standardizují již od padesátých let minulého století, přičemž změny v postupech nejsou příliš významné.

Striktní požadavek stanovení změny počtu atomových jader je nahrazen měřením přímo pozorovatelných jevů. Požadována je reprodukovatelnost a porovnatelnost s postupy jiných laboratoří. Základem není etalon dle definice jednotek SI, nýbrž standard zcela obecně přístupný. Meze pro radiační ochranu jsou v legislativě uváděny ve veličinách a jednotkách SI, ale pro referenční a rozhodovací kritéria vyhovují ukazatelé. Z praktického hlediska jde o velmi dobře použitelný postup kontroly stupně radiační ochrany, alespoň pro první rozhodování.

4. Celková objemová aktivita beta (c_β)

Podle [3] jde o „ukazatel radionuklidů s přeměnou beta“. Poznámka k tomuto heslu říká: „Zjištěná hodnota postihuje zejména radionuklidy vysílající záření beta, a to různou měrou, některé nepostihuje vůbec. Slouží zejména jako podklad k rozhodování o potřebě stanovení objemových aktivit jednotlivých radionuklidů ve vodě.“

Problémové příklady:

1. Po kalibraci vzorkem, obsahujícím pouze ^{40}K , stanovíme c_β . Údaj c_β je přibližně o 11 % vyšší než objemová aktivita ^{40}K . Je to dáno koeficientem 14,82 v rovnici (3) normy [2], konkrétně započtením výtěžku β z radioaktivní přeměny tohoto nuklidu. Podle definice je výsledek v jednotkách Bq chybný.

2. Jiný vzorek obsahuje ^{90}Sr v rovnováze s ^{90}Y . Výsledkem stanovení c_β je přibližný součet obou aktivit. Dopad stanovení není z hlediska radiační ochrany příliš závažný, rozdíl je zde hlavně terminologický (aktivita Bq kterého nuklidu?). Protože energie β částic je značně rozdílná, účinnost detekce se může značně lišit od prvotní kalibrace. Odezva bude závislá na druhu detektoru (tj. nejednoznačná).

3. Třetí vzorek obsahuje radionuklid ^{54}Mn . Je hojný ve výpustích jaderných zařízení, podléhá přeměně β^+ (elektronový záchyt), je vyzářeno záření γ s energií 835 keV. Ukazatel c_β nezjistí žádnou aktivitu – pro popis umělých nuklidů je neprůkazný.

5. Celková objemová aktivita alfa (c_α)

Podle [3] jde o „ukazatel radionuklidů s přeměnou alfa“. Poznámka k tomuto heslu říká: „Vyjadřuje se např. součtem objemových aktivit radioizotopů uranu ^{234}U , ^{235}U a ^{238}U v přirozeném zastoupení nebo objemovou aktivitou izotopu ^{241}Am , který poskytuje stejnou odezvu jako měřený vzorek.“ Druhá pak: „Zjištěná hodnota postihuje radionuklidy vysílající

záření alfa, a to různou měrou; některé nepostihuje vůbec. Slouží zejména jako podklad k rozhodování o potřebě stanovení objemových aktivit jednotlivých radionuklidů ve vodě.“ Platí tu stejná teminologická dvojznačnost jako u c_{β} . Pro kalibraci dle normy se používá přírodní směs uranu. Ovšem izotopové složení přírodního uranu se liší podle jeho zdroje: ve vodě koncentrace ^{234}U převyšuje ^{238}U i šestinásobně (zde se projevují vlivy chemických vlastností členů přeměnové řady). Hodnocení vzorků s umělými nuklidy je tady i méně reprezentativní. Při použití ukazatele c_{α} pro vzorky z jaderných zařízení s transurany se zvyšuje nejistota v kalibraci hlavně při postupu metodou B. Neznalost skutečné energie emitovaných α částic znehodnocuje kalibraci provedenou etalonem se známým rozložením jejich energie. Norma stanovuje dva různé, ale ve výsledku ekvivalentní postupy. V odstavci 4 „Měření směsi odparku vody se scintilátorem $\text{ZnS}(\text{Ag})$ “ (dříve metoda A), v odstavci 5 „Měření zbytku po žíhání okénkovým proporcionálním nebo scintilačním detektorem“ (dříve metoda B). Metoda B používá tlustší vrstvu materiálu před detekcí: částice s nižší energií proto s vysokou pravděpodobností nevstoupí vůbec do detektoru. Shoda izotopového složení kalibračního a měřeného vzorku je tudíž velmi důležitá. Tloušťka materiálu pro metodu A je fyzicky menší, protože detektor je součástí měřeného vzorku. O to větší význam má pak změna izotopového složení v nízkoenergetické části spektra. Přítomnost radonu ^{222}Rn (dcera ^{226}Ra) a ^{220}Rn (produkt přeměny ^{228}Ra resp. ^{228}Th) může působit značnou závislost odezvy na čase od přípravy vzorku podle tloušťky zrn, a tedy schopnosti emanace.

6. Závěr

Oba ukazatelé jsou velmi dobrým a rychlým identifikátorem kontaminace vod radioaktivními látkami. Při použití pro vodu s přírodními radionuklidy i jejich zvýšené hodnoty nemohou vést ke zmatení hodnotitele (další nuklidová analýza dle platné vyhlášky radiační ochrany). Pokud jsou používány při hodnocení průmyslových odpadů, a hlavně pokud by došlo k havarijní situaci s radionuklidovými zdroji (nebo dokonce k válečným událostem), nemusejí být tyto ukazatelé dostatečně průkazné při radiační ochraně.

Pokaždé je však dobré zachovat určitý nadhled při použití jednotky Bq na výsledky stanovení těchto sumárních ukazatelů a mít na vědomí všechny souvislosti jejího použití.

Literatura

- [1] Česká technická norma – Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity alfa (ČSN 75 7611 – leden 2021).
- [2] Česká technická norma – Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity beta (ČSN 75 7612 – leden 2020).
- [3] Česká technická norma – Kvalita vod – Stanovení radionuklidů – Obecná ustanovení (ČSN 75 7600 – červen 2013).
- [4] Česká technická norma – Veličiny a jednotky – Část 10: Atomová a jaderná fyzika (ČSN EN ISO 80000-10 – prosinec 2020).
- [5] Vlček, J. *Vztah celkové objemové aktivity alfa a objemových aktivit jednotlivých přírodních radionuklidů ve vodě*. Radiologické metody v hydrosféře, Seč 2003.

DETERMINATION OF WATER QUALITY INDICATORS FROM THE POINT OF VIEW OF METROLOGY

Keywords: metrology, physical quantities

Czech technical standards for determining water quality define the indicators "Total volume activity alpha (or beta)". Their determination and evaluation is very useful for rapid quantification of the content of radioactive substances in water. From the point of view of metrology, however, problems arise when applying the Becquerel unit and also their application in legal metrology.

NORMY PRO STANOVENÍ RADIOAKTIVNÍCH LÁTEK VE VODÁCH A SOUVISEJÍCÍ NORMY

Lenka Fremrová¹, Barbora Sedlářová²

¹Sweco a.s., Tábořská 31, 140 16 Praha 4, e-mail: lenka.fremrova@sweco.cz

²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce,
Podbabská 30, 160 62 Praha 6
e-mail: lenka_fremrova@sweco.cz

Klíčová slova: norma, analýza vody, radioaktivní látka, odběr vzorků

Abstrakt

Příspěvek obsahuje informace o normách pro stanovení radioaktivních látek ve vodách a o souvisejících normách pro odběr vzorků.

Pro stanovení radioaktivních látek ve vzorcích vody se používají normy, které jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1. Normy pro stanovení radioaktivních látek ve vzorcích vody

Označení normy (třídící znak)	Název normy	Měsíc a rok vydání	Měsíc a rok vydání změ- ny normy	Poz- námka
ČSN EN ISO 17294-2 (75 7388)	Kvalita vod – Použití hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS) – Část 2: Stanovení vybraných prvků včetně izotopů uranu	03.2017		
ČSN EN ISO 14911 (75 7392)	Jakost vod – Stanovení rozpuštěných kationtů Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} a Ba^{2+} chromatografií iontů – Metoda pro vody a odpadní vody	07.2000		
ČSN 75 7600	Kvalita vod – Stanovení radionuklidů – Obecná ustanovení	06.2013		
ČSN EN ISO 22017 (75 7605)	Kvalita vod – Návod pro rychlá měření radioaktivity při radiační mimořádné situaci	05.2021		
ČSN EN ISO 11704 (75 7608)	Kvalita vod – Měření celkové objemové aktivity alfa a celkové objemové aktivity beta – Kapalinová scintilační měřicí metoda	08.2019		V
ČSN EN ISO 10704 (75 7609)	Kvalita vod – Měření celkové objemové aktivity alfa a celkové objemové aktivity beta – Metoda přímé depozice tenké vrstvy	10.2019		V
ČSN 75 7610	Jakost vod – Stanovení celkové objemové aktivity alfa srážecí metodou	04.2008		
ČSN 75 7611	Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity alfa	01.2021		
ČSN 75 7612	Kvalita vod – Stanovení celkové objemové aktivity beta	01.2020		

ČSN 75 7613	Kvalita vod – Rychlá metoda stanovení celkové objemové aktivity beta	09.2014		
ČSN 75 7614	Jakost vod – Stanovení uranu	08.1998	05.2005	
ČSN 75 7615	Kvalita vod – Rychlá metoda stanovení celkové objemové aktivity alfa	02.2017		
ČSN EN ISO 9697 (75 7616)	Kvalita vod – Měření celkové objemové aktivity beta – Metoda tlusté vrstvy	12.2019		V
ČSN EN ISO 9696 (75 7617)	Kvalita vod – Měření celkové objemové aktivity alfa – Metoda tlusté vrstvy	06.2018		V
ČSN EN ISO 13164-1 (75 7618)	Kvalita vod – Radon-222 – Část 1: Obecné zásady	08.2020		V
ČSN EN ISO 13164-2 (75 7618)	Kvalita vod – Radon-222 – Část 2: Metoda spektrometrie záření gama	08.2020		V
ČSN EN ISO 13164-3 (75 7618)	Kvalita vod – Radon-222 – Část 3: Emanometrická metoda	08.2020		V
ČSN EN ISO 13164-4 (75 7618)	Kvalita vod – Radon-222 – Část 4: Dvoufázová kapalinová scintilační metoda	08.2020		V
ČSN EN ISO 13165-1 (75 7619)	Kvalita vod – Radium-226 – Část 1: Kapalinová scintilační metoda	08.2020		V
ČSN EN ISO 13165-2 (75 7619)	Kvalita vod – Radium-226 – Část 2: Emanometrická metoda	04.2023		V
ČSN EN ISO 13165-3 (75 7619)	Kvalita vod – Radium-226 – Část 3: Zkušební metoda používající spolusrážení a spektrometrii záření gama	08.2020		V
ČSN EN ISO 22908 (75 7621)	Kvalita vod – Radium 226 a radium 228 – Kapalinová scintilační měřicí metoda	08.2020		V
ČSN 75 7622	Kvalita vod – Stanovení radia 226	02.2018		
ČSN 75 7623	Kvalita vod – Stanovení radia 226 emanometricky bez koncentrování	01.2024		
ČSN 75 7624	Kvalita vod – Stanovení radonu 222	02.2019		
ČSN 75 7625	Jakost vod – Stanovení radonu 222 kapalinovou scintilační měřicí metodou	03.2010		
ČSN 75 7626	Kvalita vod – Stanovení polonia 210	01.2022		
ČSN 75 7627	Kvalita vod – Stanovení olova 210	10.2015		
ČSN 75 7628	Kvalita vod – Stanovení radia 228 srážecí metodou	04.2023		
ČSN EN ISO 10703 (75 7630)	Kvalita vod – Radionuklidy emitující záření gama – Metoda spektrometrie záření gama s vysokým rozlišením	02.2022		
ČSN EN ISO 22515 (75 7634)	Kvalita vod – Železo 55 – Kapalinová scintilační měřicí metoda	12.2021		V
ČSN EN ISO 9698 (75 7635)	Kvalita vod – Tritium – Kapalinová scintilační měřicí metoda	12.2019		
ČSN EN ISO 13162 (75 7636)	Kvalita vod – Uhlík 14 – Kapalinová scintilační měřicí metoda	12.2021		V

ČSN EN ISO 13160 (75 7637)	Kvalita vod – Stroncium 90 a stroncium 89 – Kapalinová scintilační metoda nebo metoda proporcionálního počítání	02.2022		V
ČSN EN ISO 13161 (75 7638)	Kvalita vod – Polonium 210 – Zkušební metoda spektrometrií záření alfa	03.2021		V
ČSN EN ISO 13163 (75 7639)	Kvalita vod – Olovo 210 – Kapalinová scintilační měřicí metoda	09.2022		V
ČSN EN ISO 22125-1 (75 7640)	Kvalita vod – Technecium 99 – Část 1: Kapalinová scintilační měřicí metoda	06.2020		V
ČSN EN ISO 22125-2 (75 7640)	Kvalita vod – Technecium 99 – Část 2: Metoda hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS)	06.2020		V
V – norma zavedená do soustavy ČSN vyhlášením ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví				

Pro stanovení radioaktivních látek ve vzorcích vody se používají převážně tzv. „čisté“ ČSN, tj. normy zpracované v České republice. V praxi se používají také mezinárodní normy ISO, které byly převzaty jako evropské normy a potom byly zavedeny do soustavy ČSN překladem (ČSN EN ISO 17294-2, ČSN EN ISO 14911, ČSN EN ISO 10703, ČSN EN ISO 9698 a ČSN EN ISO 22017). Podle normy ČSN EN ISO 14911 je možno stanovit draslík 40. V přehledu jsou uvedeny také normy, které byly zavedeny do soustavy ČSN vyhlášením ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (jsou označeny V). Tyto normy jsou k dispozici pouze v anglickém originálu.

V roce 2023 zpracovali členové technické komise č. 104 *Kvalita vod*, subkomise *Radiologické metody* revizi normy **ČSN 75 7623 Kvalita vod – Stanovení radia 226 emanometricky bez koncentrování**. ČSN 75 7623 platí pro stanovení objemové aktivity radia 226 (^{226}Ra) ve vodách scintilačně emanometrickou metodou bez koncentrování ^{226}Ra srážením. Metoda je určena ke stanovení objemové aktivity ^{226}Ra ve vzorcích s velmi nízkou koncentrací nerozpuštěných látek, např. ve vzorcích podzemních a pitných vod. Tuto normu je potřeba používat ve spojení s ČSN 75 7600:2013 Kvalita vod – Stanovení radionuklidů – Obecná ustanovení. Při revizi normy ČSN 75 7623 byly provedeny tyto změny:

- aktualizace odkazů na citované normy;
- vypuštění informativní přílohy A Hodnoty korekčních faktorů;
- aktualizace statistických charakteristik;
- celková úprava a zpřesnění textu normy.

Byla revidována norma **EN ISO 17294-2:2016**, která byla zavedena překladem jako **ČSN EN ISO 17294-2:2017 Kvalita vod – Použití hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS) – Část 2: Stanovení vybraných prvků včetně izotopů uranu**. Při revizi normy EN ISO 17294-2 byly provedeny tyto změny:

- bylo objasněno přidání modifikátoru;
- do předmětu normy byl přidán titan.

Norma **EN ISO 17294-2:2024** bude zavedena do soustavy ČSN překladem.

Je nezbytné dodržovat příslušné postupy odběrů vzorků, které jsou určeny pro stanovení radioaktivních látek. Pro tento účel jsou k dispozici normy uvedené v *tab. 2*.

Tab. 2. Normy pro odběr vzorků vod

Označení normy (třídicí znak)	Název normy	Měsíc a rok vydání
ČSN EN ISO 5667-1 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 1: Návod pro návrh programu vzorkování a pro způsoby odběru vzorků	12.2023
ČSN EN ISO 5667-3 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 3: Konzervace vzorků vod a manipulace s nimi	01.2019
ČSN ISO 5667-4 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 4: Návod pro odběr vzorků z jezer a vodních nádrží	06.2018
ČSN ISO 5667-5 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 5: Návod pro odběr vzorků pitné vody z úpraven vody a z vodovodních sítí	05.2008
ČSN EN ISO 5667-6 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 6: Návod pro odběr vzorků z řek a potoků	03.2017; Změna A11 - 11.2020
ČSN ISO 5667-7 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 7: Pokyny pro odběr vzorků vody a páry v kotelnách	02.1996
ČSN ISO 5667-8 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 8: Pokyny pro odběr vzorků srážek	01.1996
ČSN ISO 5667-10 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 10: Návod pro odběr vzorků odpadních vod	07.2021
ČSN ISO 5667-11 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 11: Návod pro odběr vzorků podzemních vod	07.2012
ČSN ISO 5667-12 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 12: Návod pro odběr vzorků dnových sedimentů z řek, jezer a z oblastí ústí řek	08.2018
ČSN EN ISO 5667-13 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 13: Návod pro odběr vzorků kalů	11.2011
ČSN EN ISO 5667-14 (75 7051)	Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 14: Návod pro prokazování a řízení kvality odběru vzorků vod a manipulace s nimi	03.2017
ČSN EN ISO 5667-15 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 15: Pokyny pro konzervaci a manipulaci se vzorky kalu a sedimentu	03.2010
ČSN ISO 5667-17 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 17: Návod pro odběr vzorků nerozpuštěných látek z velkých objemů vzorku	02.2010
ČSN ISO 5667-21 (75 7051)	Jakost vod – Odběr vzorků – Část 21: Návod pro odběr vzorků pitné vody dodávané cisternami nebo jinými způsoby než vodovodní sítí	08.2011
ČSN EN ISO 19458 (75 7801)	Jakost vod – Odběr vzorků pro mikrobiologickou analýzu	04.2007

Byla revidována norma **EN ISO 5667-3:2018**, která byla zavedena překladem jako **ČSN EN ISO 5667-3:2019 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 3: Konzervace vzorků vod a manipulace s nimi**. Do tabulky **A.5 Způsoby konzervace vzorků – Radiochemické analyty a aktivity** byl při revizi vložen nový sloupec obsahující odkazy na příslušné normy a byly doplněny způsoby konzervace vzorků uvedené v normách vydaných od roku 2018. Norma **EN ISO 5667-3:2024** bude zavedena do soustavy ČSN překladem.

Dostupnost norem

Na stránkách Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) (www.unmz.cz) je dostupný Věstník Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Ve věstníku jsou zveřejňovány informace o vydaných i připravovaných normách. Na stránkách České agentury pro standardizaci (ČAS) (www.agentura-cas.cz) jsou uvedeny informace o prodeji norem.

STANDARDS FOR DETERMINATION OF RADIOACTIVE SUBSTANCES IN WATER AND RELATED STANDARDS

Keywords: standard, water analysis, radioactive substance, sampling

The paper contains information about standards for determination of radioactive substances in water and about related standards for sampling.

Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství

Termín konání: 21.–22. května 2024

Sborník konference, kolektiv autorů

Termín vydání: květen 2024

Vydal: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha 2024

1. vydání

ISBN 978-80-88484-08-0

ISBN 978-80-88484-08-0