

System pro kontinuální monitorování radioaktivní kontaminace povrchových vod

MICHAL FEJGL, MIROSLAV HÝŽA, JIŘÍ HŮLKA

Klíčová slova: spektrometrie gama – NaI(Tl) – monitorování radiační situace – havarijní monitorování – ¹³⁷Cs

SOUHRN

Článek popisuje monitorovací stanici vyvinutou pro potřeby monitorování radiační situace České republiky (ČR) a její potenciál pro účely připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost. Monitorovací stanice je určena k monitorování umělé aktivity gama v povrchových vodách, její vývoj a sestavení byly uskutečněny ve spolupráci společností Nuvia, a. s., a SÚRO, v. v. i. Konstrukce monitorovací stanice je založena na principu jednoduché a robustní ponorné sondy sdružené s řídicí jednotkou a se zdrojem energie fungujícími v automatickém a autonomním režimu. Tato konstrukce vede ke snížení zranitelnosti systému při umístění v terénu, jeho měřicí dovednosti jsou zároveň posíleny sofistikovaným vyhodnocovacím softwarem na bázi singulárního rozkladu spektra umožňujícím dosáhnout citlivosti postačující pro potřeby havarijního monitorování. Byla sestavena monitorovací minisít tvořená třemi monitorovacími stanicemi umístěnými v lokalitách v ČR klíčových z hlediska radioaktivní kontaminace vod. Vyvinutá monitorovací stanice je v článku porovnána s jinými stanicemi, které jsou pro daný účel používány, a to z hlediska jejich konstrukce a detekčních dovedností.

ÚVOD

Havárie jaderné elektrárny spojená s únikem inventáře jaderného reaktoru je vůbec nejzávažnější typ mimořádné události, k jejichž řešení byl systém připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost v ČR zaveden [1–3]. V případě mimořádné události spojené s únikem inventáře reaktoru lze předpokládat uvolnění dominantní části radionuklidů do atmosféry. Radioaktivní kontaminace se po úniku do atmosféry šíří ve formě radioaktivního mraku především navázaná na částice aerosolů a v molekulární formě. Míra depozice radioaktivní kontaminace z mraku je závislá na meteorologické situaci, především na teplotně-tlakových podmínkách, a na srážkové aktivitě. Obecně platí, že nejúčinnějším depozičním procesem je vymývání radioaktivního aerosolu z atmosféry dešťovými srážkami [4]. Zároveň však nelze vyloučit ani přímý únik části radionuklidů z inventáře reaktoru do vodotečí. Z hlediska krizového řízení je klíčovou fází nehodové expoziční situace (NES) její počáteční fáze, během které dochází k úniku radionuklidů z reaktoru, současně během ní dochází v největší míře k migraci kontaminace [2, 5].

Prostředkem určeným k pilotnímu vyhodnocení informací o migraci uvolněné radioaktivní kontaminace atmosférou a o jeho aktuální depozici na povrchu během počáteční fáze NES jsou matematické modely vycházející především ze zdrojového členu nastalé havárie (možné radionuklidové složení úniku a jeho velikost), z předpovědi počasí a z výsledků monitorování prováděného podle Národního programu monitorování, které jsou shromažďovány

v datovém středisku SÚJB [5]. Zohledněna je pouze vzdušná migrace radionuklidů, matematický model pro šíření radioaktivní kontaminace vodními toky po přímém úniku do vodotečí nebo po depozici z atmosféry zatím není k dispozici.

Přes vysoký stupeň sofistikovanosti matematických modelů jejich výstupy poskytují spíše rámcový přehled o deponované kontaminaci. Zkušenosti z reálných havárií v Černobylu a ve Fukušimě ukazují, že předpokladem spolehlivosti výsledků matematických modelů je jejich okamžitá verifikace pomocí rychle dostupných doplňkových měření, ideálně prováděných v on-line režimu. K tomu dnes slouží především výsledky sítě včasného zjištění (SVZ) a síť samplerů atmosférických aerosolů. Síť včasného zjištění je tvořena 180 kontinuálně měřícími monitory dávkového příkonu vybavených Geiger-Mullerovými detektory. Část je rozmístěna v husté síti v okolí jaderných elektráren, zbytek je rozmístěn víceméně rovnoměrně po celém území ČR [5].

Měření radioaktivního aerosolu v ovzduší je prováděno v rámci sítě odběrů vzorků životního prostředí a potravního řetězce [5]. V rámci lokálních monitorovacích sítí kolem jaderných elektráren je rozmístěno šest a sedm vzorkovacích stanic, dalších deset je součástí teritoriální sítě pokrývající území ČR [6]. Filtry jsou odebírány v intervalech předepsaných Vyhláškou o monitorování radiační situace [6] a je v nich stanovena aktivita gama pomocí polovodičové gama spektrometrie. Za normálního monitorování (technický termín pro monitorování za nehavarijní situace) je interval pro výměnu filtrů 1 týden, za havarijního monitorování (technický termín pro monitorovací režim za mimořádné situace) je interval výměny aerosolových filtrů zkrácen na 24 hodin pro teritoriální síť a na 6 hodin pro lokální síť [6]. Nově byly vyvinuty i systémy on-line monitorování aerosolů s detektorem NaI(Tl) nebo HPGe nad filtrem v sampleru [7], výsledky jejich měření však zatím nejsou začleněny do systému monitorování radiační situace v ČR. Některé evropské země také disponují systémem kontinuálního monitorování gama aktivity v říčních vodách, takový systém však v ČR chybí. Začlenění těchto systémů do revidovaného Národního programu monitorování by v budoucnu mohlo vést ke zlepšení systému připravenosti k odezvě.

MONITOROVÁNÍ POVRCHOVÝCH VOD

Povrchová voda z hlediska připravenosti k odezvě představuje předmět zvláštního významu, neboť 51,7 % pitných vod v ČR je pokryto z povrchových zdrojů [8], které jsou při havárii jaderného zařízení radioaktivním spadem zranitelné. Kontaminace vodních zdrojů představuje významnou bezpečnostní hrozbu státu [9].

Monitorování povrchových vod je v ČR prováděno podle požadavků vyhlášky o monitorování radiační situace [6]. Odlišné požadavky jsou stanoveny pro teritoriální síť (území ČR), lokální síť (areál nebo okolí jaderného zařízení

nebo pracoviště III., IV. kategorie) a pro hraniční síť (místo, kde voda opouští ČR). Vyhláška vymezuje analyzované radionuklidy, četnost a citlivost analýz pro předepsaný počet monitorovacích míst v rámci jednotlivých sítí. Konkrétní analytická metoda předepsána není, Národní program monitorování SÚJB [5] ale předepisuje toto monitorování provádět formou odběrů vzorků životního prostředí. V současné praxi je zavedeno monitorování aktivity gama v odebraných vzorcích vod, prováděné pomocí laboratorní polovodičové gama spektrometrie.

V rámci normálního monitorování jsou ve vzorcích povrchových vod stanovovány aktivity (^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs , celková objemová alfa a celková objemová beta), ovšem frekvence odběrů je všeobecně nízká (1–12x za rok). Za havarijní situace je portfolio analýz povrchových vod zredukováno na stanovení aktivity ^{137}Cs a ^3H za současného zkrácení intervalu odběru na 6 hodin až 1 týden, přibývá však požadavek na stanovení aktivity ^{131}I v hraničních sítích.

Havarijní monitorování umožňuje v případě havárie jaderné elektrárny stanovit aktuální míru zasažení povrchových vod jak prostřednictvím úniku kontaminace přímo do vodotečí (stanovením aktivity ^3H), tak prostřednictvím úniku do atmosféry a následnou depozicí kontaminace (stanovením aktivity ^{137}Cs). Omezením tohoto monitorování je velmi malý počet odběrových bodů a relativně dlouhé odběrové intervaly, dále pak problematické provádění odběrů a přepravy vzorků za probíhající havarijní situace.

Zmíněná omezení by mohla vyřešit zavedení kontinuálního monitorování gama aktivity v říčních vodách. To by přineslo již v průběhu počáteční fáze NES doplnění informací o celkovém množství radioaktivní kontaminace deponované ze spadu, které by mělo význam i pro verifikaci matematických modelů. Vývoj aktivity umělých radionuklidů v povrchových a zejména říčních vodách v čase charakterizuje průměrnou radioaktivní kontaminaci povodí a umožňuje spolehlivější identifikaci místa a míry depozice radioaktivní kontaminace z ovzduší.

Systém kontinuálního monitorování kontaminace povrchových vod by měl současně přinést i pro ochranu zdrojů pitné vody.

MONITOROVACÍ SYSTÉM SAGMA A SÍŤ SCOMO V KONTEXTU HAVARIJNÍHO MONITOROVÁNÍ

V tomto článku je popsán nově konstruovaný monitorovací systém určený ke kontinuálnímu monitorování gama aktivity v povrchových vodách pro účely posílení připravenosti k odezvě na radiační mimořádnou událost ČR. Citlivost systému je nastavena tak, aby systém splňoval legislativní požadavky pro havarijní monitorování aktivity gama v povrchových vodách. Aby systém mohl být za havarijní situace přínosný, musí být jeho provoz ochráněn před následky havárie jaderné

elektrárny, mezi které patří především výpadek obecných dodávek elektrické energie a všeobecná panika vedoucí k chybám lidské obsluhy přístrojů. Tomu byla při konstrukci přístroje věnována zvláštní pozornost.

Vývoj systému je náplní projektu Bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra číslo VI20172020083. Prvním dílčím cílem je vyvinout stanici na monitorování umělé gama aktivity v povrchových vodách, a to stanici autonomní (nezávislou na dodávkách elektrické energie a na lokálních dodavatelích datových přenosů), automatickou (fungující bez lidské obsluhy) a odolnou vůči poruchám i za extrémních klimatických a hydrologických poměrů a schopnou při běžných provozních podmínkách splnit požadavky vyhlášky č. 360/2016 Sb. vzhledem k detekčním limitům ^{137}Cs , který je všeobecně považován za optimální marker radioaktivní kontaminace při jaderné havárii. Druhým dílčím cílem projektu je pak z několika monitorovacích stanic tohoto typu sestavit monitorovací minisíť pokrývající místa ČR, která jsou z hlediska zasažení radioaktivním spadem klíčová. Projekt je realizován ve spolupráci Státního ústavu radiační ochrany a Nuvia, a. s. Pro přehlednost je monitorovací stanice dále v textu pojmenovávána akronymem vycházejícím z jejího názvu v anglickém jazyce SAGMA (Station for Artificial Gamma Activity Measurement), monitorovací minisíť podle stejného principu akronymem SCOMO (System for Continuous Gamma Activity Monitoring).

Výběru konstrukční varianty pro SAGMA předcházelo porovnání kontinuálních monitorů aktivity gama dostupných v literárních zdrojích s legislativními požadavky a se zavedeným systémem monitorování radiační situace v ČR.

Literatura popisuje mnoho kontinuálních měřičů gama aktivity určených pro měření v mořské vodě. Prakticky všechny popsané varianty měří ve 4π geometrii – detektor je zanořen do konstantní hloubky obvykle čtyř a více metrů do hluboké mořské vody a masa vody tak slouží současně jako analyzovaný vzorek i jako stínění. Zařízení potřebná k zásobování přístroje elektrickou energií a k vyhodnocení odezvy detektoru jsou umístěna na voru plujícím na vodní hladině. Podle požadované citlivosti přístrojů jsou voleny různé varianty detektorů, typem detektoru je zase podmíněna volba elektrického napájení [10–13].

Problematika kontinuálního měření gama aktivity v povrchových vodách je v literárních zdrojích popsána poměrně málo. Kontinuální měřiče gama aktivity byly uvedeny do provozu v řekách několika zemí západní Evropy po roce 1986 v souvislosti s černobylskou jadernou havárií. Tyto přístroje jsou ve většině případů založeny na principu gama spektrometrického proměňování vzorků vody ve stíněné nádobě, do které je vzorek vody přečerpán [14–17]. Použitím stínění je zvýšena citlivost, ovšem složitá konstrukce vede k tomu, že tyto přístroje prakticky není možné provozovat v autonomním a automatickém režimu. Navíc většina těchto přístrojů nepracuje v kontinuálním, ale v semikontinuálním režimu (další vzorek je čerpán k analýze až po odměření předchozího). Casanovas a kol. [18] popisuje systém instalovaný k monitorování jaderné elektrárny Ascó ve Španělsku měřící v kontinuálním režimu založeném na principu plovoucího integračního časového okna.

Tabulka 1. Požadavky vyhlášky č. 360/2016 Sb. na detekční meze pro stanovení umělé gama aktivity v povrchových vodách
Table 1. Requirements of Decree No. 360/2016 Coll. detection limits for the determination of artificial gamma activity in surface water

Nuklid	Síť	Monitorování	Typ vzorku vody	Frekvence	Požadavek na MDA
^{137}Cs	teritoriální, lokální	normální	povrchové, pitné	3 měsíce	0,1 Bq.L ⁻¹
^{137}Cs	lokální	normální	kapalné výpustě	3 měsíce	0,1 Bq.L ⁻¹
^{137}Cs	lokální	normální	podzemní	12 měsíců	0,1 Bq.L ⁻¹
^{137}Cs	lokální	havarijní	povrchové, pitné	6 hodin	5 Bq.L ⁻¹
^{137}Cs	hraniční	havarijní	povrchové, pitné	1 týden	10 Bq.L ⁻¹
^{131}I	hraniční	havarijní	povrchové, pitné	1 týden	10 Bq.L ⁻¹

Steinmann [19] popisuje kontinuální monitorovací stanici říčních vod SARA Water System využívající ponornou sondu ve 4π geometrii instalovanou na dvou řekách ve Švýcarsku. Provozování tohoto systému v říčním prostředí přináší oproti mořskému prostředí několik komplikací. Pro mořské prostředí je sice charakteristická vysoká pozadová aktivita ^{40}K , tento příspěvek je ale pro každou lokalitu prakticky konstantní. Příspěvek terestriální složky pozadí je v mořském prostředí téměř potlačen díky mocné vrstvě stínící vody mezi detektorem a dnem, stejně jako příspěvek kosmického záření díky mocné vrstvě vody mezi detektorem a mořskou hladinou. Ten je navíc vlivem stabilní hloubky prakticky konstantní. Při měření aktivity gama ponorným detektorem v říčním prostředí příspěvek od terestriální i kosmogenní složky pozadí značně kolísá, a tím snižuje citlivost detektoru. V říčním prostředí je navíc pozadí ovlivněno dalším rušivým faktorem, a to je aktivita radonu a jeho přeměnových produktů. Ty jsou při deštích strhávány z ovzduší a splachovány z břehů a za určitých okolností mohou vést až ke zdvojnásobení celkové četnosti impulsů. Některé dceřiné produkty ^{222}Rn , například ^{218}Bi způsobují spektrální interference s ^{137}Cs , v obdobích po silných deštích je tedy citlivost detekčního systému využívajícího ponorný detektor silně snížena [19, 20]. S touto komplikací se potýkají i průtočné stíněné přístroje určené ke stanovení gama aktivity říčních vod [18].

Vzhledem k tomu, že vyvíjený monitorovací systém SCOMO je určen především pro havarijní monitorování, je potřeba, aby detekční dovednosti SAGMA splňovaly požadavky vyhlášky č. 360/2016 Sb. na havarijní monitorování, ty jsou definovány pro ^{131}I a ^{137}Cs a jejich přehled je uveden v *tabulce 1* společně s požadavky na detekční meze pro normální monitorování [6].

Nejpřísnější legislativní požadavek na meze detekce pro stanovení ^{137}Cs [6] v povrchových vodách v rámci havarijního monitorování je $5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ (viz *tabulku 1*). Zohledníme-li následky historicky jediné havárie jaderné elektrárny s únikem inventáře reaktoru v Evropě, tedy havárii jaderné elektrárny v Černobyli, po níž byly v povrchových vodách západní Evropy aktivity ^{137}Cs až $1 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, lze konstatovat, že požadavek vyhlášky je stanoven racionálně a že havarijní monitorování s předepsanou citlivostí by v případě havárie podobného rozsahu umožnilo monitorovat distribuci kontaminace ve vzdálenosti až prvních několika tisíců kilometrů.

VÝVOJ STANICE NA KONTINUÁLNÍ MONITOROVÁNÍ AKTIVITY GAMA VE VODÁCH A VYBUDOVÁNÍ MONITOROVACÍ MINISÍTĚ

Při výběru konstrukční koncepce SAGMA a při zohlednění požadavků na detekční citlivost, autonomnost a na automatický provoz, bylo přistoupeno ke konstrukci monitorovací stanice na bázi ponorné sondy. Jedině tato konstrukční varianta umožňuje provozovat přístroj v režimu autonomního energetického napájení pomocí solárního panelu a dlouhodobý bezobslužný provoz zařízení. Další výhodou této varianty jsou mimořádně nízké náklady na výrobu monitorovací stanice. Nevýhodou této konstrukce je nutnost vyrovnat se s výkyvy pozadí, které měření nestíněnou ponornou sondou přináší.

Výběr detektoru byl uskutečněn na základě porovnání detekčních dovedností dvojpalcového $\text{NaI}(\text{TI})$, 1,5palcového LaBr_3 a třípalcového $\text{NaI}(\text{TI})$. Tyto varianty byly uvažovány pro svoji cenovou dostupnost a nízkou energetickou náročnost. Použití polovodičových detektorů nebylo uvažováno právě pro vysokou energetickou náročnost související s nutností detektor dochlazovat. V laboratorních podmínkách sudu o objemu 1 m^3 ve tvaru krychle naplněném roztokem ^{137}Cs s definovanou aktivitou byly provedeny orientační energetická a účinnostní kalibrace porovnávaných detektorů.

Jako nejvýhodnější varianta detektoru byl vyhodnocen třípalcový $\text{NaI}(\text{TI})$ s nejvyšší účinností detekce. Nejlepší energetické rozlišení prokázal 1,5palcový LaBr_3 , ale vzhledem k tomu, že není dostupný v rozměrech nad 1,5 palce, byl



Obr. 1. Vlevo: SAGMA instalovaný v areálu vodní elektrárny Na Réně v Ivančicích, řeka Morava; vpravo: ponorná sonda sestávající z detektoru (vpravo nahoře) a fotonásobiče (vpravo dole)

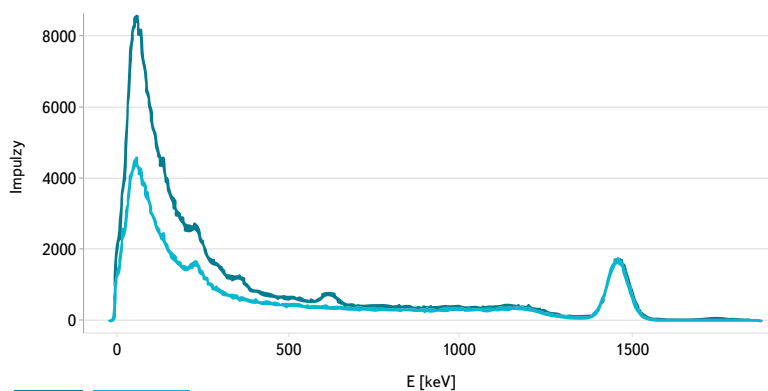
Fig. 1. Left: SAGMA installed in the area of hydro power plant Na Réně in Ivančice, the Morava River; right: immersion probe consisting of detector (up) and photomultiplier (down)

z výběru vyřazen. Nelze však vyloučit, že budoucnost přinese lepší zvládnutí technologie pěstování LaBr_3 krystalů a s ní i jejich široké uplatnění na poli nízkonákladové gama spektrometrie.

Vlastní konstrukce zařízení SAGMA sestává z ponorné sondy a z vnější řídicí jednotky vybavené zdrojem elektrického napájení a systémem přenosu dat. Ponorná část je tvořena $\text{NaI}(\text{TI})$ detektorem válcového tvaru o průměru 3 palce a délce 3 palce zapouzdřeným ve vodotěsném plastovém tubusu spolu s fotonásobičem (SBG.D3 od NuviaTech Instruments), který je připojen k multikanálovému analyzátoru s nastavitelným zesílením v rozsahu 256 až 2048 kanálů (NuNA MCB3 od NuviaTech Instruments).

Popsaný gamaspektrometrický systém je schopen detekovat energie fotonů v rozsahu 50 až 1900 keV, do kterého spadá většina gama emitujících radionuklidů. Energetické rozlišení na energii ^{137}C 661 keV je 7,5 %. Celková hmotnost systému je asi 10 kilogramů.

Přenos dat z multikanálového analyzátoru do řídicí jednotky je uskutečňován pomocí připojení typu Ethernet. Řídicí jednotka sestává z počítače vybaveného komerčním SW Gamwin 2019 na zpracování gamaspektrometrického signálu a z komunikačního modulu, který umožňuje odesílání dat přes GPRS nebo přes satelitní telefon. Napájení solárním panelem, případně kombinací solárního panelu a větrné turbíny je sdruženo s lithiovou baterií o kapacitě 900 Ah schopnou zajistit provoz SAGMA po dobu 14 dnů. Systém SAGMA instalovaný v terénních podmínkách a použitá ponorná sonda jsou zobrazeny na *obr. 1*.



Srážky Bez srážek

Obr. 2. Navýšení přírodního pozadí vlivem příspěvku radonu a jeho přeměnových produktů spláchnutých do vodního toku deštěm ve srovnání se spektrem mimo dešťové období

Fig. 2. Increase of natural background due to the contribution of radon and its conversion products flushed into the watercourse by rain compared to the spectrum outside the rain season

Vzhledem k tomu, že vlivem změn teploty dochází k posunům energetické kalibrace, SW Gamwin provádí periodickou stabilizaci spektra založenou na měření všudypřítomného ^{40}K s energií 1461 keV.

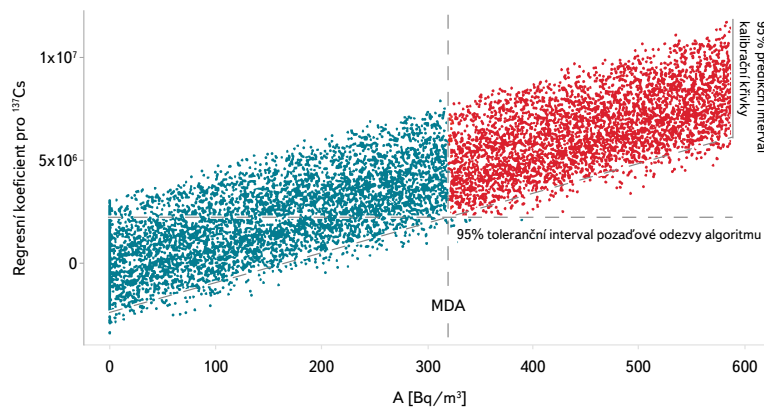
Precizní energetická a účinnostní kalibrace byla provedena pomocí etalonových roztoků ^{241}Am , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs a ^{60}Co o aktivitě přibližně $10\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ v plastovém sudu tvaru krychle o rozměrech $1 \times 1 \times 1\text{ m}$. Etalonové roztoky byly stabilizovány proti nehomogenitě a proti sorpci na stěnu přidavkem stabilních nosičů a minerálních kyselin.

Vlastní kalibrace detektoru byla provedena proměřováním kalibračních roztoků po dobu 48 hodin v sekvenčním detekčním režimu s použitím 10minutové sekvence. Prostřednictvím sekvenčního měření bylo ověřeno, že aktivita kalibračních roztoků se během kalibrace nemění, tedy že kalibrační roztok je homogenní.

Přepoččet účinnostní kalibrace z geometrie barelu o rozměrech $1 \times 1 \times 1\text{ m}$ na nekonečnou 4π geometrii byl proveden simulací v prostředí Monte Carlo. Hodnota korekčního koeficientu pro vysoké energie gama (^{60}Co) je 85 %. To znamená, že v nekonečné 4π geometrii v říční vodě pochází 85 % detekovaných fotonů z prostoru virtuální krychle o rozměrech $1 \times 1 \times 1\text{ m}$, v jejímž středu je detektor.

K prověření detekčních dovedností SAGMA ve vodních tocích bylo provedeno dlouhodobé měření říční vody v tárovacím kanále Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v. v. i., (VÚV TGM) v Praze pomocí ponorné části SAGMA. Prakticky šlo o měření odezvy sondy na pozadové koncentrace radionuklidů v říční vodě. Testování bylo prováděno v poloterénních podmínkách, protože neprobíhalo ve standardním řečišti s proměnlivou úrovní vodní hladiny a s bahnitým dnem, ale v kanále s betonovým dnem a s úrovní hladiny regulovanou přepadem. Nicméně složení vody v kanále kolísá stejně jako v řece Vltavě. Hloubka vody v tárovacím kanále je stabilizována na 1,8 m, ponorná část sondy byla do vody zanořena tak, aby se střed detektoru nacházel 0,8 m ode dna a 1 m od vodní hladiny. Sběr pozadí byl uskutečněn v období od dubna 2017 do června 2019, kdy byly zkompletovány první tři exempláře SAGMA a mohlo být přistoupeno k zahájení testování systému v terénních (autentických říčních) podmínkách.

Vyhodnocení datasetu získaného dlouhodobým měřením v tárovacím kanále bylo jedním z klíčových kroků celého procesu vývoje SAGMA. Spektra byla získána kontinuálním měřením v desetiminutovém integračním okně. Při tomto měřicím režimu SW kontinuálně vyhodnocuje spektrum tvořené pulsy detekovatelnými za posledních 10 minut. Vyhodnocením spektra je tedy



Obr. 3. Metoda stanovení NDA při použití algoritmu NASVD; k výpočtu byla použita množina 5×10^4 spekter s matematicky simulovaným přidavkem ^{137}Cs o aktivitě mezi 0 a $600\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$; průsečík přímek značících 95% toleranční interval pozadové odezvy a 95% odezvy na spektra s přidanou aktivitou indikuje NVA

Fig. 3. Method of determination of NDA using an algorithm NASVD; a set of 5×10^4 spectrum with mathematically simulated addition of ^{137}Cs with activity between 0 and $600\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ was used for the calculation; intersection of lines indicating 95% background response interval and 95% response to spectrum with added activity indicated by NVA

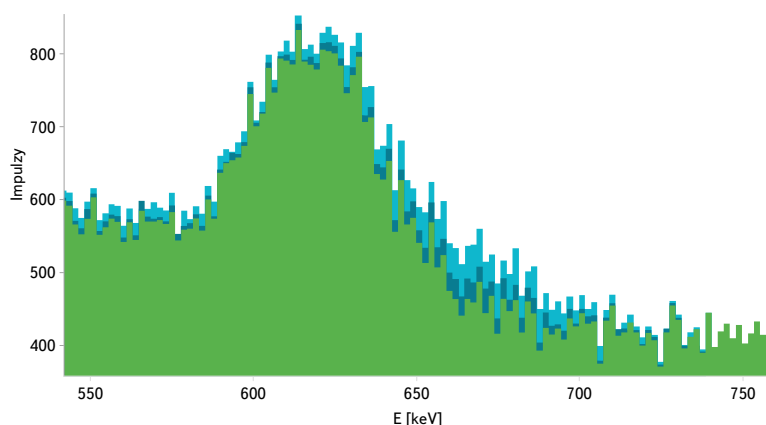
získána informace o průměrném složení vody, která protekla kolem detektoru za posledních 10 minut. Integrační dobu je možné libovolně měnit, kratší integrační doba vede ke snížení citlivosti, delší zase ke snížení reprezentativnosti. Aby bylo možné spektra analyzovat i zpětně, byly každých 10 minut nápočty za posledních 10 minut ukládány.

Časový průběh gama spekter vykazuje stabilní koncentrace gama aktivity v řece Vltavě, k výraznému navýšení dochází pouze po deštích. Po bouřích a po přívalových deštích dochází v říční vodě až ke zdvojnásobení celkové aktivity gama. To je způsobeno splachováním radonu a jeho přeměnových produktů jednak přímo ze vzduchu, jednak z povrchu říčních břehů. Jak je patrné z obr. 2, v dešťovém spektru je výrazně navýšena především aktivita ^{214}Bi s energií 609 keV, dále pak ^{214}Pb (242, 295 a 352 keV).

Standardní metoda analýzy je založena na píkové analýze s využitím numerické derivace spektra, která zohledňuje pouze lokální vlastnosti spektra a pro složitá spektra s výskytem interferujících radionuklidů je neúčinná. Při použití standardní analýzy gama spektra ovlivněného dešťovou událostí dochází ke zvýšení hodnot detekčních mezí pro jednotlivé radionuklidy, zejména pro ty, u nichž dochází ke spektrálním interferencím. Silně ovlivněny jsou také detekční meze pro ^{137}Cs , jehož hlavní energie gama je 662 keV při energetickém rozlišení NaI(Tl) detektoru koliduje právě s energií ^{214}Bi 609 keV a pro ^{131}I s hlavní energií gama 364 keV, se kterým zase koliduje pík ^{214}Pb s energií 352 keV.

ZVÝŠENÍ CITLIVOSTI DETEKČNÍHO SYSTÉMU SAGMA POMOCÍ NASVD

Z důvodu proměnlivosti pozadí a spektrálních interferencí byla jako primární analýza zvolena metoda PCR (Principle Component Regression), která patří do rodiny dekonvolučních algoritmů. Jejím výhodou je zejména to, že básová spektra lze odvodit na základě souboru pozadových měření. Jednotlivá pozadová spektra jsou pak uspořádána do matice, jejíž singulární rozklad (NASVD – Noise Adjusted Component Regression) poskytuje básová spektra, která lze použít pro přesné fitování pozadí metodou nejmenších čtverců. Doplněním básového souboru o spektrální odezvu detektoru pro vybrané radionuklidy lze pak nejenom detekovat, ale i kvantifikovat aktivitu těchto radionuklidů.



Přidaná aktivita odpovídající NDA NASVD algoritmu

Čistě pozadové spektrum

Přidaná aktivita odpovídající NDA standardního algoritmu

Obr. 4. Porovnání spekter uměle kontaminovaných pulsy ^{137}Cs na úrovni odpovídající NDA pro různé metody odečtu pozadí; při použití standardní metody je hodnota NDA $0,84 \text{ Bq.L}^{-1}$, při použití NASVD metody je to $0,24 \text{ Bq.L}^{-1}$

Fig. 4. The comparison of spectrum artificially with ^{137}Cs pulses at the NDA-compliant level for different background subtraction methods; when using the standard method the value is 0.84 Bq.L^{-1} , when using NASVD method the value is 0.24 Bq.L^{-1}

Tato metoda je používána v oblasti letecké gama spektrometrie [21], může ale být použita i v jiných oblastech, v poměrech ČR již byla využita při kontinuíálním měření gama aktivity v aerosolech pomocí NaI(Tl) detektoru [7].

Stanovení mezí detekce pro spektra analyzovaná metodou NASVD bylo provedeno Monte Carlo simulací, ve které byly do pozadových spekter uměle přidávány impulzy odpovídající jisté virtuální aktivitě hodnoceného radionuklidu. Tato spektra pak byla podrobena analýze detekčním algoritmem. Výsledek analýzy (regresní koeficient) byl následně vztažen k virtuální aktivitě (aktivitě odpovídající uměle přidaným pulsům).

Výpočet nejmenší detekovatelné aktivity (NDA) je vyjádřen na obr. 3. Přidaná aktivita odpovídá NDA, když podíl falešně negativních a falešně pozitivních pozorování je právě 5 %. V grafickém znázornění je to aktivita odpovídající průsečíku přímky odpovídající 95% tolerančnímu intervalu hodnot regresního koeficientu pro spektra bez přidané aktivity a přímky odpovídající jednostrannému predikčnímu intervalu kalibrační křivky s pokrytím 95 %.

Účinnost algoritmu NASVD při odečtu pozadí lze dobře demonstrovat porovnáním uměle kontaminovaných gama spekter na úrovni NDA pro NASVD a pro standardní metodu odečtu pozadí. Jako standardní metoda byl použit výpočet SW Gamwin pracující se standardním přístupem podle L. A. Currieho [22]. Na obr. 4 je zobrazeno pozadové spektrum v oblasti zájmu pro ^{137}Cs (vymezeno bílou barvou). Tmavě modře vybarvená oblast vymezuje uměle injektované pulsy ^{137}Cs potřebné k dosažení NDA při vyhodnocení pomocí metody NASVD, světle modře vybarvená oblast pak pulsy potřebné k dosažení NDA při standardní metodě.

Vzhledem k tomu, že za určitých okolností může být účelné provádět kontinuální měření v delších integračních časech, bylo sčítáním původních 10 m spekter vytvořeno pět datasetů obsahující 10m, 1h, 4h, 12h a 24h spektra. Vzhledem k tomu, že spektra získaná po dešťových událostech vykazují výrazné fluktuace, byly vytvořeny dvě skupiny spekter v rámci těchto pěti datasetů, 1. spektra změřená během a po dešťových událostech, dále jen „dešťová spektra“ a 2. spektra ovlivněná i neovlivněná dešťovými událostmi, dále jen „všechna spektra“. Rozdělení spekter umožnilo provést zhodnocení vlivu nepříznivých meteorologických podmínek na NDA.

Pro všech deset datasetů pak byly stanoveny hodnoty NDA pro ^{137}Cs a ^{131}I , a to jednak standardní metodou odečtu pozadí, jednak pomocí metody NASVD. Porovnání je zobrazeno v tabulkách 2 a 3.

Tabulka 2. Hodnoty NDA pro pozadí datasetu „všechna spektra“
Table 2. NDA values for “all spectrum” dataset background

Radionuklid	Všechna spektra	Integrační čas				
		10 min	1 h	4 h	12 h	24 h
^{131}I	Standardní	3,6	1,48	0,74	0,25	0,13
	NASVD	1,29	0,52	0,26	0,16	0,13
^{137}Cs	Standardní	4,2	1,7	0,84	0,28	0,14
	NASVD	1,41	0,57	0,28	0,16	0,12

Tabulka 3. Hodnoty NDA pro pozadí datasetu „dešťová spektra“
Table 3. NDA values for the “rainfall spectrum” dataset background

Radionuklid	Dešťová spektra	Integrační čas		
		10 min	1 h	4 h
^{131}I	Standardní	5,3	2,9	1,8
	NASVD	1,42	0,69	0,36
^{137}Cs	Standardní	8,4	3,1	1,7
	NASVD	2,26	0,83	0,37

Porovnání standardní metody odečtu pozadí a NASVD metody ukazuje, že čím jsou podmínky měření méně příznivé (větší výkyvy pozadí, kratší integrační čas), tím má zapojení NASVD větší význam. Největší rozdíl ve výsledných NDA byl zaznamenán při použití kratších integračních časů u dešťových spekter. V takových případech vede použití NASVD až k pětinasobnému snížení výsledné NDA, zatímco při stabilním pozadí a dlouhých integračních časech mohou být výsledky obou metod srovnatelné.

Hodnoty dosažených NVA mohou mít velký vliv na praktickou uplatnitelnost systému v havarijní připravenosti státu. Porovnáním hodnot NDA v tabulkách 2 a 3 s požadavky [6] vyplývá, že při desetiminutové integrační době by za dešťové události SAGMA se standardní metodou odečtu pozadí legislativní požadavky nespĺnila, zatímco při použití metody NASVD ano.

Metoda NASVD dále přináší zvýhodnění SAGMA ve srovnání s konkurencí. Ve srovnání se SARA Water System, přístrojem podobné konstrukce [19] vykazuje SAGMA poloviční hodnoty detekčních mezí. Ve srovnání s přístrojem měřícím vodu ve stíněné průtočné nádobě [18] byly při 24hodinovém integračním čase a použití datasetu „všechna spektra“ meze detekce zařízení SAGMA přibližně 15x vyšší. To je způsobeno skutečností, že při měření ponornou sondou nejsou odstíněny dominantní složky pozadí (terestriální, kosmické) tak účinně, jako při použití olověného stínění. Ovšem při zkrácení integračního času na 10 minut již je dominantní část pozadí tvořena radionuklidy obsaženými v proměřované vodě. Díky účinnému odečtu tohoto zdroje fluktuací metodou NASVD je dosaženo snížení poměru mezi hodnotami NDA zařízení SAGMY a průtočné stíněné sondy na hodnotu 1,4.

Vzhledem k tomu, že SAGMA je určena přednostně pro havarijní monitorování, můžeme desetiminutový integrační čas považovat za přednostní režim předpokládaného využití vyvíjeného systému (výhoda spočívající ve vysokém časovém rozlišení stanovené aktivity). Za podmínek havarijního monitorování je oproti konkurenci SAGMA zvýhodněna zejména jednoduchou robustní konstrukcí schopnou bez přerušení měření zvládnout následky havarijní situace.

Ačkoli oproti stíněným systémům vykazuje SAGMA významně nižší citlivost, při použití požadového datasetu „všechna spektra“ dosahuje SAGMA při přibližně 24hodinovém integračním čase NDA pro ^{137}Cs hodnoty $0,1 \text{ Bq.L}^{-1}$, tedy legislativního požadavku pro normální monitorování [6]. Výše uvedené hodnoty mezi detekce spočítané z požadových hodnot vody v tárovacím kanále ve VÚV TGM naznačují, že SAGMA má díky metodě NASVD z hlediska detekční citlivosti potenciál zcela nahradit současný způsob monitorování gama aktivity v povrchových vodách.

SESTAVENÍ MINISÍTĚ SCOMO

Během léta 2019 byly zkompletovány první tři exempláře přístroje SAGMA včetně autonomního zásobování elektrickou energií a dálkového přenosu dat. Přístroje byly umístěny do monitorovacích bodů, čímž byla sestavena prvotní forma monitorovací sítě SCOMO. První exemplář SAGMA nahradil provizorní sondu v tárovacím kanále VÚV TGM, další dva byly umístěny v reálných říčních podmínkách řeky Jihlavy v lokalitě Ivančice (viz obr. 1) a řeky Vltavy v lokalitě Kořensko. Minisít SCOMO je od srpna 2019 provozována ve zkušebním provozu, který bude pokračovat do dubna 2020. Cílem je po skočení testovacího provozu SCOMO začlenit do systému monitorování radiační situace v ČR.

ZÁVĚR

Byla sestavena monitorovací stanice umělé aktivity gama v povrchových vodách na bázi nízkorozpočtové ponorné sondy sdružené s řídicí jednotkou a s autonomním zdrojem napájení. Díky algoritmu NASVD byla citlivost monitorovací stanice zvýšena natolik, že vyhovuje legislativním požadavkům a za mimořádně nepříznivých klimatických podmínek vyvinutý systém může konkurovat i přístrojům měřícím vzorky vody ve stíněné cele. Z monitorovacích stanic byla sestavena monitorovací minisít, její schopnost autonomního a automatického provozu je momentálně testována. V rámci testování minisítě jsou sbírány datasey popisující fluktuace pozadí v jednotlivých lokalitách.

Poděkování

Výzkum byl podpořen projektem Ministerstva vnitra České republiky (projekt VI20172020083).

Literatura

- [1] SÚJB, Vyhláška o podrobnostech k zajištění zvládnání radiační mimořádné události č. 359/2016 Sb., 2016.
- [2] SÚJB, Atomový zákon č. 263/2016 Sb., 2016.
- [3] US NRC, Emergency classification. 2018 [vid. 1. 8. 2019]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/about-emerg-preparedness/emerg-classification.html>
- [4] PAPANASTASIOU, C., IOANNIDOU, A., STOULOS, S. and MANOLOPOU, M. Atmospheric deposition of cosmogenic ^{10}Be and ^{137}Cs from fallout of the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*, 1995, 170, p. 151–156.
- [5] SÚJB, Národní program monitorování. 2018 [vid. 1. 8. 2019]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/narodni-program-monitorovani/>
- [6] SÚJB, Vyhláška o monitorování radiační situace č. 360/2016 Sb., 2016.
- [7] HÝŽA, M. and RULÍK, P. Low-level atmospheric radioactivity measurement using a NaI(Tl) spectrometer during aerosol sampling. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 126, p. 225–227.
- [8] FOUŠOVÁ, E. a REIDINGER, J. *Zpráva o stavu vodního hospodářství ČR v roce 2016*. Ministerstvo zemědělství, 2017, 132 str.
- [9] Ministerstvo vnitra České republiky. Audit národní bezpečnosti, 2016 [vid. 1.8.2019]. Dostupné z: <https://www.vlada.cz/assets/media-centrum/aktualne/Audit-narodni-bezpecnosti-20161201.pdf>

[10] DULAI, H., KAMENIK, J., WATERS, C.A., KENNEDY, J., BABINEC, J., JOLLY, J., and WILLIAMSON, M. Autonomous long-term gamma-spectrometric monitoring of submarine groundwater discharge trends in Hawaii. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, 307, p. 1865–1870.

[11] OSVATH, I., POVINEC, P.P., LIVINGSTON, H.D., RYAN, T.P., MULSOW, S., and COMMANDUCCI, J.F. Monitoring of radioactivity in NW Irish Sea water using a stationary underwater gamma-ray spectrometer with satellite data transmission. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2005, vol. 263, No. 2, p. 437–440.

[12] TSABARIS, C., THANOS, I., and DAKLADAS, T. The development and application of an underwater γ -spectrometer in the marine environment. *Radioprotection*, 2005, vol. 40, S1, p. 677–683.

[13] SARTINI, L., SIMEONE, F., PANI, P., LO BUE, N., MARINARO, G. et al. GEMS: underwater spectrometer for long-term radioactivity measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2011, vol. 626–627, p. 145–147.

[14] FANC: Radiological monitoring in Belgium. 2005, FANC report, Brussels.

[15] IRSN: IRSN Activity report 2002 [vid. 1. 8. 2019]. Dostupné z: https://www.irsn.fr/EN/publications/corporate/Documents/irsn_annual_report_2002.pdf

[16] SONCK, M., DESMETS, M., CLAES, J., and SOMBRÉ, L. TELERAD: The Radiological Surveillance Network and Early Warning System in Belgium. Proceedings of IRPA12: 12. Congress of the International Radiation Protection Association: Strengthening Radiation Protection Worldwide – Highlights, Global Perspective and Future Trends, 2012.

[17] GITZINGER, C., HENRICH, E., and TURAI, I. Doel Nuclear Power Station and the national network of environmental radiological monitoring Belgium. European Commission Document, 2013.

[18] CASANOVAS, R., MORANT, J.J., and SALVADO, M. Implementation of gamma-ray spectrometry in two real-time water monitors using NaI(Tl) scintillation detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, 80, p. 49–55.

[19] STEINMANN, P. Radioactivity in river water below nuclear plants, the new network monitors the Aare and the Rhine on an ongoing basis. *Aqua & gas*, 2013, 10.

[20] FEJGL, M. and HÝŽA, M. Development of an autonomous station for measurements of artificial gamma activity in surface water bodies. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, 204, p. 42–48.

[21] MINTY, B. and HOVGGAARD, J. Reducing noise in gamma-ray spectrometry using spectral component analysis. *Exploration Geophysics*, 2002, vol. 33, No. 3, p. 172–176.

[22] CURRIE, L.A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Appl. Radiochem. Anal. Chem.*, 1968, vol. 40, No. 3, p. 586–593.

Autoři

Mgr. Michal Fejgl, Ph.D.
✉ michal.fejgl@suro.cz

Ing. Miroslav Hýža
✉ miroslav.hyza@suro.cz

Ing. Jiří Hůlka
✉ jiri.hulka@suro.cz

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

Příspěvek prošel lektorským řízením.



SYSTEM FOR CONTINUOUS MONITORING OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF SURFACE WATER BODIES

FEJGL, M.; HYZA, M.; HULKA, J.

National Radiation Protection Institute, p.r.i.

Keywords: gamma spectrometry – NaI(Tl) – monitoring of radiation situation – emergency monitoring – ^{137}Cs

This paper reports on the structure of the autonomous station for monitoring artificial gamma activity in surface water bodies for the purposes of emergency preparedness of the Czech Republic. A simple design based on the NaI(Tl) submersible detector powered by a combined solar and wind source has been employed. Data transfer is provided by a satellite connection. The detection capabilities of the device have been tested for various unfavourable conditions, and the detection limits have been lowered by using the noise adjustment singular value decomposition (NASVD) method. The detection capabilities of the device fulfil the legal requirements for emergency monitoring, and are almost equal to the detection capabilities of other available devices with a more complicated and less versatile structure. A monitoring network consisting of three monitoring stations was built in the Czech Republic. These stations are placed in spots that are important from the point of view of water vulnerability from radioactive contamination.