MONITOROVÁNÍ RADIACE V ČASNÉ FÁZI NEHODY NA JADERNÉM ZAŘÍZENÍ – ANALÝZA VŠECH TYPŮ MĚŘENÍ POUŽITELNÝCH PRO KOREKCI MODELOVÝCH PŘEDPOVĚDÍ

MONITORING OF RADIATION SITUATION IN THE EARLY PHASE OF EMERGENCY ON NUCLEAR FACILITY – ANALYSIS OF ALL TYPES/KINDS OF MONITORING/MEASUREMENTS APPLICABLE FOR CORRECTION OF MODEL PREDICTIONS/PROGNOSIS

Petr PECHA, Petr KUČA, Irena ČEŠPÍROVÁ, Radek HOFMAN
pecha@utia.cas.cz, petr.kuca@suro.cz

Došlo 4. 10. 2011, upraveno 7. 11. 2011, přijato 9. 11. 2011.
Dostupné na http://www.population-protection.eu/attachments/039_vol3n2_pecha_kuca_cespirova_hofman.pdf.

Abstract

The paper concerns monitoring methods of radioactive pollution in environment in the early phase of a radiation accident. The main aim of the paper is to identify those monitoring methods suitable for purposes of improvement of model-based predictions of radiation sutiation by the means assimilating radiological measurements from terrain. Data assimilation methods are statistical methods based on Bayesian filtering. As a specialized software system for application of data assimilation in radiation protection we demonstrate product HARP which offers advanced interactive tools for assessment of consequences of accidental releases of radionuclides into the atmosphere. The measurements available from different channels (dose-rate monitoring networks, ground-based mobile monitoring, aerial monitoring) provides valuable information on radiation situation. However, due to different time scales, spatial scales of the type of measured quantity, the combination or even comparison of the channels is not straightforward. The interactive subsystem ASIM of the system HARP provides effective methods for merging this complex data into a consistent analysis describing radiation sutiation on terrain.

Keywords

Radiation monitoring, Monitoring network, Nuclear emergency, Model prognosis, Data assimilation, Bayesian filtering.

1 SPOLUPRÁCE V OBLASTI ZPŘESŇOVÁNÍ MODELOVÝCH PŘEDPOVĚDÍ NA ZÁKLADĚ KONFRONTACE S MĚŘENÍMI PŘICHÁZEJÍCÍMI Z TERÉNU

Příspěvek je zaměřen na možnosti využití výsledků měření ionizujícího záření v rámci existujících radiačních monitorovacích sítí pro zpřesňování modelových předpovědí vývoje radiologické situace po radiační nehodě. Pracovištěm se špičkovým know-how v oblasti monitorování je Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO), který kromě jiného se účastní na zajištění provozu Radiační monitorovací sítě ČR (RMS) a spolupracuje na vývoji a aplikaci pokročilých monitorovacích technik jak pro průběžná měření na stálých měřicích místech, tak i pro mobilní měření (pozemní i letecké). SÚRO se v roli správce dat RMS podílí i na zajištění účasti ČR v síti EURDEP, sloužící ke vzájemné výměně dat z monitorování dávkového příkonu a objemových aktivit ovzduší národními monitorovacími sítěmi v Evropě a okolních státech a k průběžnému zveřejňování výsledků tohoto monitorování. SÚRO se dále podílí na zajišťování havarijní připravenosti v oblasti reakce na mimořádnou událost s možnými radiačními důsledky na obyvatelstvo a životní prostředí mj. zajišťováním průběžné operativní správy Sítě včasného zjištění RMS ČR (v nepřetržitém režimu 24x7), tak aby informace o případném výskytu hodnot překračujících nastavené úrovně byla včas a správně zachycena a interpretována v systému havarijní připravenosti ČR. SÚRO se věnuje i problematice využití modelování vývoje radiační situace v případech radiačních mimořádných událostí a jejich možných dopadů na obyvatelstvo a životní prostředí v oblasti radiační ochrany a havarijní připravenosti. Pro tuto činnost SÚRO využívá různé modelovací nástroje včetně systému HARP (viz dále) vyvíjeného ve spolupráci s Ústavem teorie informace a automatizace AV ČR (ÚTIA).

Modelové předpovědi a popis šíření radioaktivních látek se v ÚTIA vyvíjejí se záměrem zavedení pokročilých statistických asimilačních technik, jejichž cílem je zvýšení spolehlivosti matematických odhadů na základě využití dalších informací, z nichž nejdůležitější jsou výsledky měření přicházející z terénu. V oblasti asimilace měření s modelovou předpovědí radiologické situace lze práce prováděné v ÚTIA označit jako v ČR průkopnické. Jedním z nejdůležitějších cílů je provádění asimilace v reálném čase, kdy v časových krocích odpovídajících periodám přicházejících měření je možno postupně korigovat předpovědi modelu a tím postupně zpřesňovat předpověď rozsahu zasažených oblastí, kde je třeba uvažovat o zavedení neodkladných opatření, a radiační situace v nich.

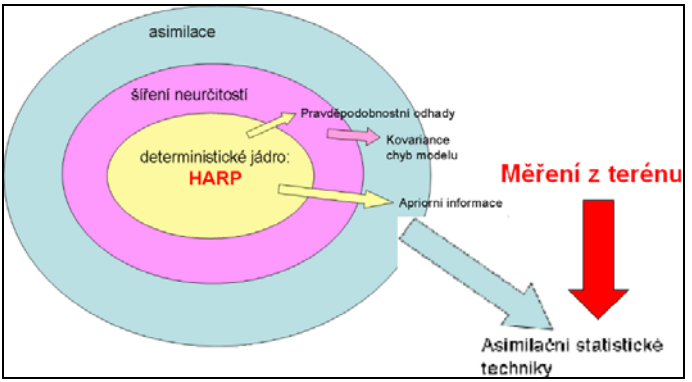
Historie spolupráce při modelování transportu znečistění a jeho následků v ÚTIA a SÚRO

Na problematice šíření radioaktivity životním prostředím se v ÚTIA pracuje již zhruba 10 let, v SÚRO ještě mnohem déle. Z nejvýznamnějších to byla například mezinárodní spolupráce v rámci EU grantů INCO COPERNICUS FI14P-CT96-0006 nebo EVANET-HYDRA projekt, která vyústila i ve společné publikace se zahraničními partnery. Spolupráce na mezinárodní úrovni se týkala i

účasti SÚRO a ÚTIA v projektu implementace systému ROSOS v ČR, zahrnujícím i lokalizaci evropského systému RODOS (Real-time Online DecisiOn Support systém) na podmínky jaderných zařízení v ČR. Byla vypracována řada lokalizačních postupů pro řetěz atmosférických a hydrologických modelů – viz příklad online vstupů do diagnostického módu práce systému RODOS (příloha 1). Následovala spolupráce s ÚJV Řež a EGP Praha v rámci návazného projektu 6/2003, jehož cílem byl vývoj vlastních metodických postupů a programových prostředků vyplývajících z požadavků Krizového a koordinačního centra SÚJB a SÚRO.

Specialisté ze SÚRO i ÚTIA se aktivně podíleli na společném česko-rakouském STEP IIb „Realistic Case Studies“ (2002 a 2003) v rámci procesu z Melku, zahrnujícím i komparativní analýzy těžké havárie JE se zdrojovým členem ST2. V ÚTIA byly provedeny též srovnávací výpočty kódem COSYMA a systémem RODOS (verze PV 4.0 implementovaná v ÚTIA).

Tyto dlouhodobé zkušenosti umožnily řešitelskému kolektivu poukázat na slabiny dosavadního výzkumu a definovat oblasti rozšíření ve směru rozvoje moderních asimilačních algoritmů. Vytyčené záměry byly podpořeny udělením grantu 102/07/1596 Grantovou agenturou ČR. Další rozvoj asimilačních technik v rámci tohoto grantového projektu umožnil ve spolupráci se SÚRO ověřovat možnosti využití dat ze Sítě včasného zjištění (SVZ) RMS v předpovědních modelech.



Obr. 1
Rámcové schéma environmentálního modelu HARP (HAzardous Radioactivity Propagation) a napojení jeho asimilačního subsystému

V současné době je v ÚTIA (příjemce) v rámci Bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra (poskytovatel) řešen projekt č. VG20102013018 s názvem ***„Aplikace pokročilých statistických metod asimilace modelových předpovědí s pozorováními v terénu ve formě moderního programového prostředku pro podporu rozhodování za krizových situací“***. V rámci řešení projektu bude

výsledný produkt HARP přizpůsoben požadavkům potenciálních uživatelů s možností využívat jak jen deterministické jádro systému a jeho bohatou interaktivní grafickou podporou, nebo na druhé straně jeho plnou statistickou funkčnost včetně pravděpodobnostní nadstavby s asimilačním subsystémem ASIM (viz Obr. 1). Právě pro vývoj funkčního asimilačního subsystému je nezbytná spolupráce s odborníky ze SÚRO.

Modelovat nebo měřit – jaké je optimální východisko?

V oblasti odhadování stavu modelovaného systému se vývoj ubírá dvěma směry. Předně, v souvislosti s prudkým rozvojem výpočetní techniky, jsou zaváděny složitější algoritmy respektující pokročilé fyzikální modely. Ukázalo se, že jednostranná víra v možnost deterministického zpřesňování fyzikálního modelu s neomezenou schopností se přibližovat k realitě je lichá. A ani to v důsledku stochastického charakteru úlohy plynoucí z inherentních neurčitostí modelu není možné. Na druhou stranu můžeme spoléhat na dostupná měření, která jsou ovšem řídká v prostoru i čase a také zatížena chybami. Pesimista může označit situaci za tristní, kdy máme k dispozici nepřesný model a špatná měření. Naštěstí ovšem existuje realistické východisko z problému představované syntézou obou přístupů, nazývané termínem **asimilace dat**. Jde o korekci výsledků modelu pomocí měřených hodnot, přičemž ve schématu asimilace je současně respektována fyzikální znalost neboli apriorní informace obsažená v modelu. Metoda asimilace bere v úvahu pozitivní rysy modelování i měření. Tam, kde je měření dostatek, upraví numerický model podle těchto hodnot. V případě, že kvalitní pozorování chybějí, spolehne se na numerický model.

Až na aplikační úroveň jsou dotaženy pokročilé metody složených Kalmanových filtrů a hlavně pak metody částicových filtrů [24]. Při výzkumu pomohly zkušenosti a znalosti akumulované v tomto směru v oddělení adaptivních systémů v ÚTIA, kde má rozvoj těchto moderních přístupů dlouholetou tradici.

Modelové předpovědi a měření v terénu při časné fázi radiační nehody

Celou šíři problematiky nastíněné výše omezíme na analýzu časné fáze radiační nehody. Specifikujeme požadavky na radiační monitoring, které lze reálně využít pro zpřesnění predikce matematického modelu šíření znečistění. Pod časnou fází radiační nehody se obvykle míní interval od samého počátku úniku znečistění až do doby, kdy radioaktivní mrak opustí sledovanou oblast. Časová škála se může pohybovat od několika hodin do několika málo dní. Právě tato fáze je nejdůležitější z hlediska rychlé odezvy na včasné zavedení odpovídajících protiopatření (ukrytí, jódová profylaxe, evakuace) ve skutečně nejzatíženějších oblastech. Tato analýza v minulosti nebyla dostatečná, chyběly ověřené programové prostředky a cílená protiopatření nebyla adekvátně připravena. Jak již bylo řečeno, vzhledem ke složitosti a neurčitostem úlohy nemůžeme nikdy uspět s jakkoliv složitými a sofistikovanými výpočetními kódy. Pouze spojením pokročilého modelování s asimilací měřených hodnot v terénu s následující rekurzí v jednotlivých časových krocích lze generovat věrohodné odhady.

Existuje několik důležitých zdrojů informací, které mohou zlepšit odhad vývoje stavu radiačního znečistění při nehodě. Základní fyzikální znalost je zahrnuta v apriorním odhadu stavu (časový a prostorový vývoj koncentrace radioaktivity ve vzduchu, její depozice na terénu apod.), který poskytuje matematický model. Významný efekt vyplyne z možnosti zapracování měření, která online přicházejí z terénu, dále může být významná i intuice podpořená zkušeností.

Rozvoj radiační nehody může být od samého začátku tak variabilní a je doprovázen takovými nejistotami, že je nutné ad hoc zavést další kroky. Vcítíme-li se do role toho, kdo má odpovědně vydat příkaz ke spuštění neodkladných opatření, ten bude pod velkým psychickým a časovým tlakem. Uvědomme si, že toxický mrak se v několika hodinách (až několika málo desítkách hodin) nepochybně dostane až k hranici republiky, a tak zde bude velký tlak na co nejrychlejší, ale současně věrohodnou, předpověď zasažených lokalit a příslušné úrovně kontaminace v nich. Neurčitosti týkající se zdrojového členu úniku, počátečního tepelného vznosu vlečky, fluktuací pole proudění, aktuálních disperzních a depozičních charakteristik apod. neumožní zodpovědnému jedinci (týmu) korektně rozhodovat, pokud nedostane další doplňující relevantní informace.

Otázka odhadu těchto neurčitostí je průběžně řešena pomocí analýzy neurčitosti a při popisu šíření chyb modelem. V posledních několika letech byly publikovány práce prováděné v ÚTIA, které jsou nezbytnou podmínkou k přechodu k odhadům následků nehod na pravděpodobnostním základě a pro použití pokročilých statistických asimilačních postupů. V tomto případě se odkazujeme na reference například na webu http://asim.utia.cas.cz/.

V dalších kapitolách se budeme věnovat možnostem, které může současná konfigurace RMS v časné fázi mimořádné události poskytnout matematickým modelům šíření znečistění pro asimilační účely.

2 POPIS STÁVAJÍCÍ SITUACE V OBLASTI MONITOROVÁNÍ PROVÁDĚNÉHO V RÁMCI RMS

2.1 Legislativa

Právní rámec pro systém radiační ochrany v ČR, včetně systému monitorování radiační situace na území ČR, vytváří zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon), v platném znění, a na něj navazující prováděcí předpisy. Radiační situace na území ČR je systémově monitorována a vyhodnocována Celostátní radiační monitorovací sítě (RMS), jejímž řízením RMS je pověřen Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). RMS je zřízena a provozována na základě vyhlášky SÚJB č. 319 /2002 Sb., o funkci a organizaci celostání radiační monitorovací sítě, v platném znění, a nařízením vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování, v platném znění, zajištění provozu a obnovy zařízení RMS je dále upraveno usnesením vlády ČR

č. 478 ze dne 14. května 2001, v platném znění, a schválenými programy monitorování držitelů povolení. Náležitosti programů monitorování, které mimo jiné stanovují rozsah monitorování okolí jaderných zařízení zajišťovaného držiteli povolení k provozu těchto zařízení, určuje vyhláška č. 307/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Podle uvedené vyhlášky SÚJB č. 319 /2002 Sb. je funkcí RMS zejména (viz §3) zajištění monitorování radiační situace na území České republiky (dále jen "monitorování"), včetně přenosu dat a správy informačního systému pro

a) hodnocení radiační situace pro potřeby sledování a posuzování stavu ozáření,
b) rozhodování o opatřeních vedoucích ke snížení nebo odvrácení ozáření v případě radiační havárie,
c) mezinárodní výměnu informací a dat o radiační situaci,
d) zveřejňování a poskytování informací a dat o radiační situaci na území České republiky.

RMS je tvořena (viz §4) stálými složkami monitorovací sítě, které pracují nepřetržitě za obvyklé radiační situace a za radiační mimořádné situace, a pohotovostními složkami monitorovací sítě, které se aktivují při podezření na vznik nebo při vzniku radiační mimořádné situace.

RMS pracuje v normálním režimu – monitorování za obvyklé radiační situace, na kterém se podílejí stálé složky RMS resp. v havarijním režimu – monitorování za radiační mimořádné situace nebo při podezření na její vznik, na kterém se podílejí stálé i pohotovostní složky RMS (viz §5).

2.2 Monitorování

Pro účely této práce je významná zejména činnost RMS v zóně havarijního plánování (viz Nařízení vlády č. 11/1999 Sb.) v časné fázi úniku, kterou se budeme dále blíže zabývat, tzn:

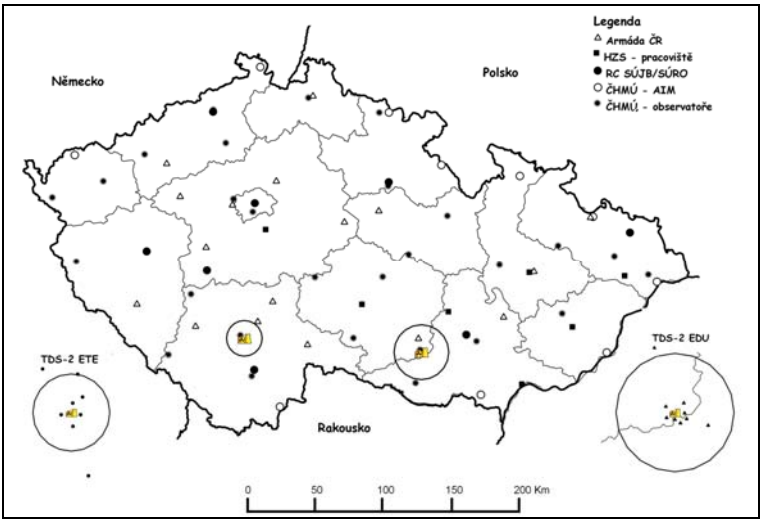
- síť včasného zjištění,
- síť termoluminiscenčních dozimetrů,
- činností mobilních skupin a letecké skupiny.

2.2.1 Síť včasného zjištění (SVZ)

SVZ je tvořena teritoriální sítí pokrývající celé území státu a teledozimetrickými systémy (TDS) JE Dukovany a JE Temelín (viz obr. 2).

2.2.1.1 Teritoriální síť

Teritoriální síť sestává z 54 měřicích míst, umístěných na pracovištích SÚJB (7 na RC a 1 na SÚJB), SÚRO (1), ČHMÚ (28 na observatořích a 10 na stanicích AIM) a HZS (7). Všechna měřicí místa jsou jednotně vybavena detekčními systémy pro měření příkonu fotonového dávkového ekvivalentu s rozsahem měřených hodnot od cca 50 nSv/h do 1Sv/h, měřenou veličinou je průměrná hodnota příkonu za 10-minutový měřicí interval (viz obr. 3).



Obr. 2
Síť včasného zjištění – Teritoriální část a TDS ETE a EDU

Obr. 3
Měřicí místo SVZ – teritoriální síť – lokalita Dukovany (ČHMÚ)

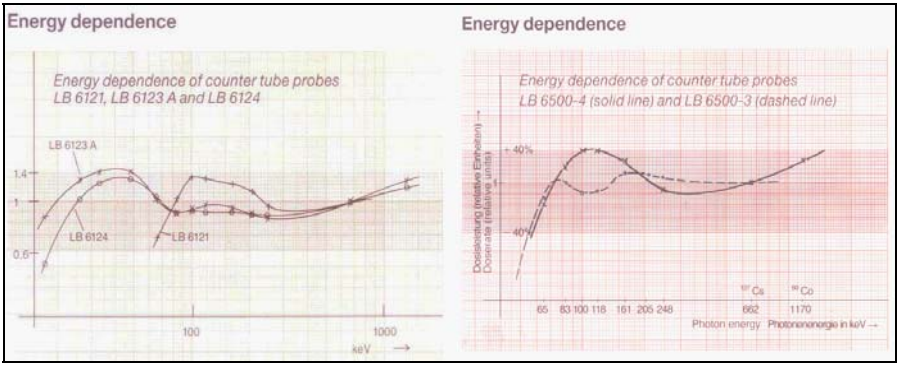
Výsledky měření jsou průběžně předávány do centrální databáze RMS, a to

- z měřicích míst provozovaných ČHMÚ: za obvyklé radiační situace (ORaS) 1x za hodinu (vždy šestice 10-minutových hodnot za uplynulou hodinu), data jsou v centrální databázi k dispozici cca mezi 10-15. minutou následující hodiny; za radiační mimořádné situace (RaMS) se frekvence předávání hodnot zvyšuje na 2x za hodinu, data jsou v centrální databázi k dispozici cca mezi 10-15. minutou následující půlhodiny;

- z měřicích míst provozovaných SÚJB (RC), SÚRO a HZS po ukončení každého 10-minutového měřicího intervalu, data jsou v centrální databázi k dispozici do cca 5. minuty po ukončení 10-minutového měřicího intervalu.

Měřicí systém je tvořen centrální jednotkou Berthold LB-111 se sondami LB-6500-3 (Geiger-Müllerův počítač pro měření vyšších hodnot příkonu od cca 100µSv/h do 1Sv/h) a LB-6360 (proporcionální počítač s rozsahem od 50nSv/h do 1mSv/h), umístěnými standardně ve výšce 1m nad zemí ve volném terénu na neobdělávané půdě bez přítomnosti vyšších objektů (budovy, stromy apod.) v blízkosti měřicího zařízení (kromě případů, kdy místní podmínky neumožňují tato kritéria v plném rozsahu dodržet).

Přesnost měření lze s přihlédnutím k energetické a směrové závislosti detektorů odhadnout na +/- 25% v celém rozsahu měřených energií (cca 60-2000keV) a příkonů (cca 50nSv/h-1Sv/h) – viz obr. 4.

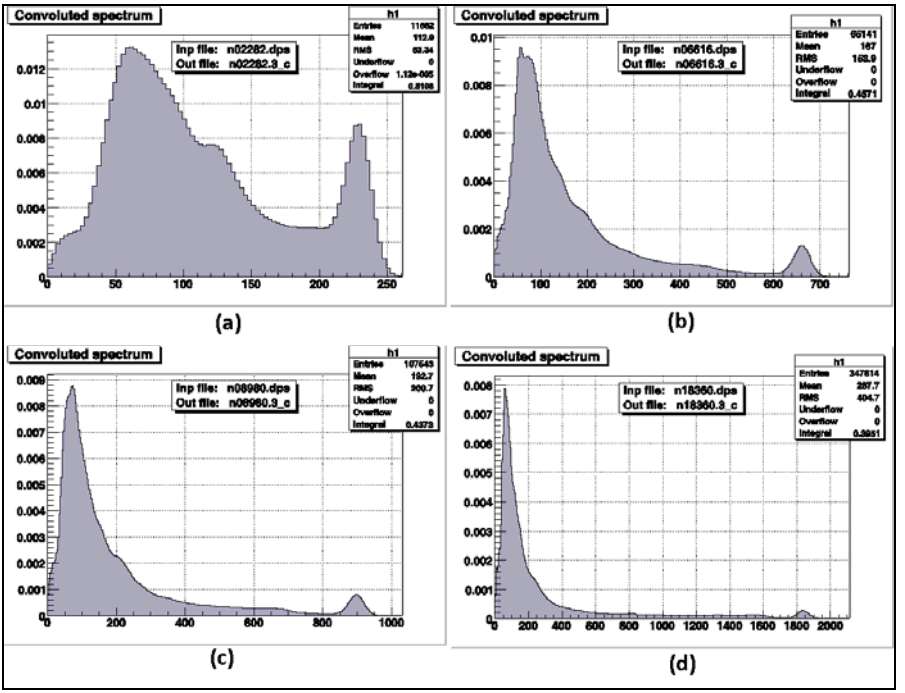


Obr. 4
Energetická závislost detektorů LB 6123A (vlevo) a LB-6300-3 (vpravo)

Poznámka: Vzhledem k deformaci energetického spektra v místě detektoru oproti primárnímu spektru radionuklidového zdroje při předpokladu rovnoměrného rozložení objemové aktivity radionuklidu v ovzduší (velikost oblasti významně přispívající k měřenému příkonu v místě detektoru je několik málo stovek metrů), vedoucí k posunu původního spektra směrem k nižším energiím (viz obr. 5), lze uvažovaný energetický rozsah považovat za postačující [9].

Teritoriální síť je primárně zaměřena za detekci dopadů událostí, ke kterým došlo mimo území ČR, na území našeho státu, a tomu odpovídá i rozložení měřicích míst, pokrývajících území státu se vzdáleností mezi jednotlivými měřicími místy obecně desítky km – což znamená, že pro detekci mimořádných úniků z JE Dukovany a JE Temelín je její využití jen omezené, vesměs pouze na údaje z měřicích míst na observatořích ČHMÚ při JE Dukovany a Temelín.

Poznámka: V roce 2010 byla uvedena do provozu Síť včasného zjištění Armády ČR, tvořená 17 měřicími místy pokrývající území státu vybavenými obdobně jako měřicí místa celostátní SVZ a pracující v obdobném režimu, data ze SVZ AČR jsou do RMS předávána každou hodinu.



Obr. 5
Spektrum v místě detektoru pro energii 228,2 keV (a); 616,6 keV (b); 898,0 keV (c); 1836,0 keV (d)

2.2.1.2 Teledozimetrický systém (TDS)

Základním detekčním systémem, monitorujícím případný únik radioaktivních látek z JE Dukovany a Temelín mimo areál JE do životního prostředí, je teledozimetrický systém provozovaný držitelem povolení (ČEZ a.s.)., tvořený dvěma okruhy detektorů – vnitřním okruhem (TDS-1) s detektory umístěnými v a na hranici areálu JE a vnějším okruhem (TDS-2) s detektory umístěnými v obcích v okolí JE.

TDS provádí kontinuální měření dávkového příkonu s on-line předáváním dat na centrální datové úložiště příslušné JE, výsledky měření jsou dále průběžně předávány do centrální databáze RMS, kde se ukládají – ve stejné časové matrici jako výsledky měření teritoriální sítě – jako průměrné hodnoty příkonu za 10-minutový měřicí interval. Data jsou v centrální databázi k dispozici do cca 5. minuty každého 10-minutového intervalu.

Teledozimetrický systém JE Dukovany je tvořen 27 měřicími místy 1. okruhu (TDS-1) umístěnými na hranici areálu JE a 8 měřicími místy 2. okruhu (TDS-) umístěnými v obcích v okolí JE (viz obr.1). Oba okruhy TDS jsou vybaveny měřicími systémy Bitt RS-03/X, vybavenými proporcionálními

detektory s měřicím rozsahem příkonů od 10nSv/h do jednotek Sv/h, detektory jsou umístěny ve výšce 2,5 metru nad zemí.

Teledozimetrický systém JE Temelín je tvořen 24 měřicími místy 1. okruhu (TDS-1) umístěnými na hranici areálu JE (na oplocení) a 7 měřicími místy 2. okruhu (TDS-2) umístěnými v obcích v okolí JE (viz obr. 1). Okruh TDS-1 je vybaven měřicími systémy Rados RD-02, používající Geiger-Müllerovy počítače s měřicím rozsahem příkonů od 10nSv/h do až 10Sv/h, detektory jsou umístěny ve výšce 1,5 metru nad zemí. Okruh TDS-2 je vybaven měřicími systémy Eberline FHZ-621, používajícími proporcionální detektory s měřicím rozsahem příkonů od 10nSv/h, detektory jsou umístěny ve výšce 2,5 metru nad zemí.

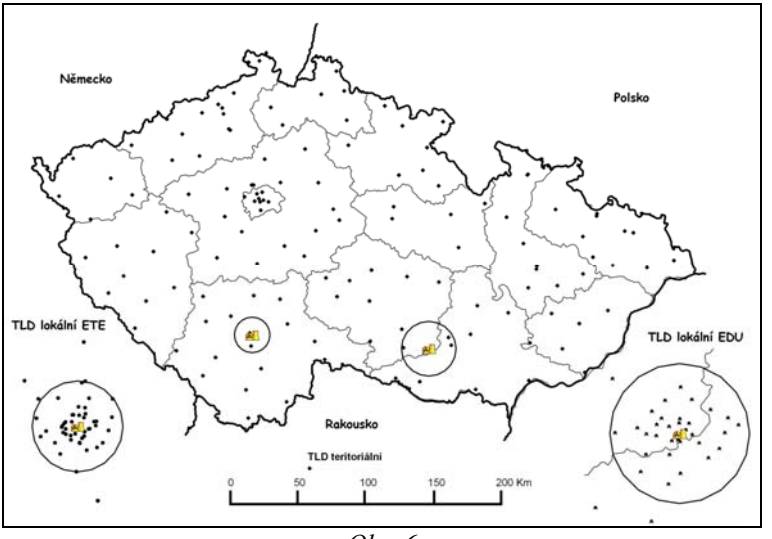
Součástí monitorování příkonu v ZHP jsou i mobilní měřicí systémy pro monitorování dávkového příkonu vybavené i komunikační jednotkou, za normální situace uložené v JE, které by v případě úniku radionuklidů z JE do životního prostředí byly operativně rozmístěny v ZHP v předem vytipovaných lokalitách v ohrožených sektorech (po směru větru od zdroje šíření) a doplnily by tak TDS-2 o několik dalších měřicích míst.

Přesnost měření TDS lze s přihlédnutím k energetické a směrové závislosti detektorů odhadnout na +/- 25% v celém rozsahu měřených energií a příkonů.

2.2.2 Síť termoluminiscenčních dozimetrů (TLD)

Síť TLD je – obdobně jako SVZ – tvořena:

- teritoriální sítí měřicích míst, pokrývající celé území státu,
- lokálními sítěmi měřicích míst, rozmístěných v okolí JE Dukovany a JE Temelín.



Obr. 6

Síť termoluminiscenčních dozimetrů – Teritoriální část a detaily lokálních sítí

2.2.2.1 Teritoriální síť TLD

Teritoriální síť je tvořena 184 měřicími body, pokrývajícími víceméně rovnoměrně území státu (viz obr. 1), přičemž cca 1/3 detektorů bodů je umístěna v budovách paralelně s detektory umístěnými v téže lokalitě na volném prostranství, pro možnost odhadu stínicího faktoru budov. Detektory jsou umístěny ve výšce 1 metr nad zemí.

Detektory z měřicích míst jsou pro vyhodnocení sváženy do centrální laboratoře TLD v SÚRO vybavené příslušným vyhodnocovacím zařízením, kde jsou rovněž připravovány „vynulované" detektory pro rozmístění na měřicích bodech v dalším monitorovacím období.

Výsledky monitorování jsou předávány do centrální databáze RMS ve formě hodnoty průměrného příkonu za monitorovací období.

Monitorovací období za ORaS je tři měsíce (kalendářní čtvrtletí), za RaMS může ebýt monitorovací období podle potřeby zkráceno.

Měřicí rozsah detektorů je od cca 25μSv za monitorovací období.

2.2.2.2 Lokální sítě TLD

Lokální sítě, umístěné v ZHP JE Dukovany a JE Temelín, jsou provozovány jednak SÚJB (RC) a SÚRO, jednak držitelem povolení (ČEZ a.s.).

Lokální sítě provozované SÚJB (RC) a SÚRO jsou tvořeny 12 měřicími místy v ZHP EDU (viz obr. 1) a 9 měřicími místy v ZHP ETE (viz obr. 1), detektory jsou umístěny ve výšce 1 metr nad zemí. Monitorovací období jsou obdobná jako v teritoriální sítí TLD.

Lokální sítě provozované držitelem povolení (ČEZ, a.s.) jsou tvořeny 36 měřicími místy v ZHP EDU (viz obr. 5 vlevo) a 52 měřicími místy v ZHP ETE (viz obr. 5 vpravo), detektory jsou umístěny v ZHP EDU ve výšce 3 metry nad zemí, v ZHP ETE ve výšce 1 metr nad zemí. Vyhodnocování detektoru probíhá v laboratořích radiační kontroly okolí (LRKO) držitele povolení. Monitorovací období jsou obdobná jako v teritoriální sítí TLD.

Vzhledem k nutnosti provádět vyhodnocování detektorů v laboratořích TLD jsou výsledky z monitorování sítěmi TLD dostupné až s určitým časovým odstupem (v řádu dnů).

2.3 Mobilní skupiny, letecká skupina

Nedílnou součástí RMS jsou:

- **Mobilní skupiny** (MS), které provádějí monitorování dávek, dávkových příkonů a aktivity radionuklidů v terénu, odběry vzorků složek životního prostředí a rozmístění a výměnu dozimetrů v sítích termoluminiscenčních dozimetrů.
- **Letecká skupina (**LeS), která provádí v případě potřeby monitorování velkoplošných území (měření dávkových příkonů; plošných resp. hmotnostních aktivit umělých resp. přírodních radionuklidů). Její činnost je zajišťována resortem SÚJB (SÚRO) ve spolupráci s resortem Ministerstva obrany (AČR).

2.3.1 Činnost mobilních skupin

Pro případ radiační havárie mají obě naše jaderné elektrárny (JE) vypracovány vnitřní havarijní plány na základě analýz možných havarijních sekvencí (v ČR mají JE povinnost analyzovat dopady všech potenciálních radiačních havárií, které mají pravděpodobnost vzniku vyšší než 10^{-7}). Tyto plány jsou provázány s vnějšími havarijními plány, kde kromě jiného jsou uvedeny i postupy pro plánování a zavádění ochranných opatření v okolí jaderné elektrárny v tzv. Zóně havarijního plánování (ZHP) s cílem zmírnit eventuální následky vzniklé radiační havárie.

ZHP jsou stanoveny do vzdálenosti 20 km u JE Dukovany a 13 km JE Temelín. V případě podezření na možný únik radioaktivních látek do okolí JE je obyvatelstvu v ZHP vydán signál k ukrytí, jodové profylaxi a k vyčkání na další informace pro případ nutné evakuace. Pro některé havarijní sekvence, které předpokládají počátek úniku radioaktivních látek do okolí nejdříve po 10 hodinách od počátku havárie, je teoreticky možná evakuace obyvatelstva ještě před příchodem kontaminovaného mraku, ale při náročnosti takovéto akce je vhodnější obyvatelstvo ukrýt (alespoň ty, kteří nemohou provést řízenou samoevakuaci) a vyčkat dalších informací. Předpokládá se, že ukrytí by nemělo trvat déle než 2 dny. Další instrukce/pokyny – tj. rozhodnutí o ukončení, resp. prodloužení či rozšíření ukrytí a o eventuálním provedení evakuace ukrytých obyvatel by již byly vydány na základě dalších informací založených na znalosti reálné situace, tj. velikosti úniku, meteorologických podmínkách na daném území a hlavně výsledků **měření prováděných přímo v terénu**.

V časné fázi radiační havárie je tedy nutné urychleně provést taková měření, která budou sloužit jako podklad pro rozhodnutí o těchto neodkladných ochranných opatřeních. Důležitými informacemi, které má systém krizového řízení v ČR k dispozici před vlastním únikem radionuklidů, jsou modelové prognózy vznikající radiační události na JE získané na základě reálných technologických údajů, reálné meteo-situace a dopředu napočítaných havarijních sekvencí. Další významnou informací získávanou již během úniku jsou hodnoty dávkových příkonů z teledozimetrické sítě dozimetrů rozmístěných v areálu havarované elektrárny (cca 25 detektorů v každé JE). Tyto informace mohou napomoci identifikovat směr úniku a spolu s predikčními modely pak vytipovat oblasti monitorování zasahujících mobilních skupin.

V další (střední a pozdní) fázi je pak nutné rozhodnout o následných ochranných opatřeních, tj. o regulaci/zákazu resp. uvolnění distribuce potravin ze zasaženého území, o opatřeních v zemědělství, vodním hospodářství atp.

Činnost každé MS se v případě radiační havárie vždy řídí příkazy krizového managementu, nicméně obzvláště pro časnou fázi je třeba mít připravené a nacvičené postupy a předpřipravené pojezdové trasy, dokumentaci, apod.

2.3.2 Posloupnost činností

a) Časná fáze:

Pro rozhodování v časné (únikové a podnikové) fázi radiační havárie je nutné co nejrychleji zmapovat kontaminované území. Ideální by bylo mapování

pomocí bezpilotních prostředků, ty ale v současné době k dispozici nejsou a v nejbližší době ani nebudou mimo jiné kvůli legislativním problémům, takže měření dávkových příkonů (DP) zůstává na mobilních skupinách a letecké skupině.

Současná strategie vychází z předpokladu, že monitorování MS a LeS bude zpravidla zahájeno po skončení úniku radionuklidů. (Pozn.: v závislosti na typu události a reálných meteo-podmínkách může dojít k situaci, kdy některá měření by se musela zahájit již v průběhu úniku. Tato eventualita by ale přicházela v úvahu jen v případech, kdy délka trvání úniku by znemožnila včasné měření pro rozhodnutí o nutnosti ukrytí resp. evakuaci obyvatelstva, a zejména by probíhající únik nesměl významně kontaminovat posádku (z důvodu ochrany zdraví členů MS a LeS) ani přístrojové vybavení monitorujících skupin (z důvodu interpretovatelnosti výsledných měření). Měřené hodnoty dávkových příkonů v daném místě a čase pomohou upřesnit výše uvedenou modelovou prognózu s cílem získat co nejvěrohodnější podklad pro rozhodování – zda provést evakuaci, a pokud ano, kdy a kde. Upřesněná prognóza dovolí upravit strategii monitorování „uvnitř“ zasaženého území.

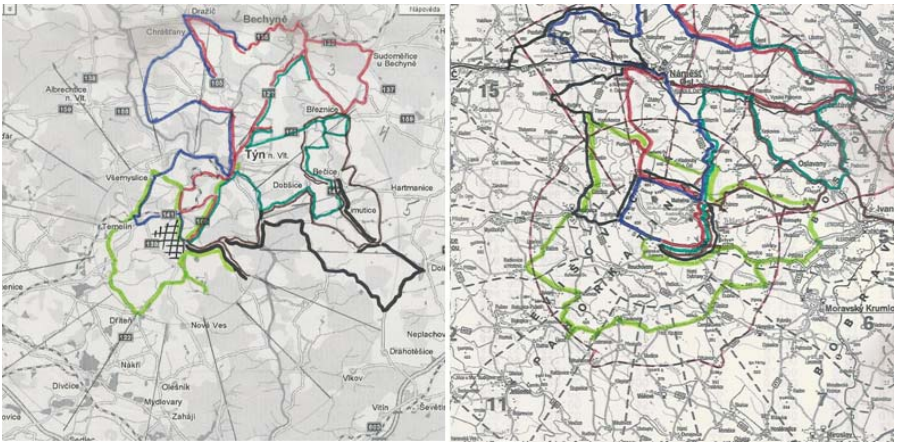
Území, které pokrývá ZHP kolem obou JE, je podle směru větru rozděleno na 16 sektorů. Pro první etapu měření v případě radiační havárie je v okolí JE naplánováno 17 pojezdových tras. Každá trasa pokrývá 3 sousední sektory, trasa č. 17 je vedena po blízkém okolí JE. Dle výše zmíněných predikčních modelů a reálné meteorologické situace se odhadne počet zasažených sektorů a provede jejich výběr. Na počátku měření po přechodu kontaminovaného mraku je nutné proměřit všechny zasažené sektory a sousední sektory z každé strany zasažených, 1 MS by projížděla trasu č. 17, tedy trasu po okolí havarované JE. Úkolem mobilních skupin je projet po předem připravených trasách v ZHP ve vybraných sektorech v obou směrech za současného měření dávkového příkonu (odhad dávky za daný časový interval). Dle výsledků z měření tras a korigovaných predikčních modelů pak Krizový štáb (KŠ) resp. Regionální krizový štáb (RKŠ) rozhodne o další činnosti MS: buď opakovaně projíždět předdefinované trasy a měřit dávkový příkon, nebo měřit dávkový příkon přímo ve vytipovaných sídelních jednotkách s ukrytým obyvatelstvem (Obr. 7).

Za hranicí ZHP již monitorovací trasy nejsou předem stanoveny, avšak může nastat situace, kdy bude nutné i tuto oblast pečlivě a rychle proměřit, neboť zde nebudou a priori obyvatelé ukryti a bude nutné rychle rozhodnout, zda je třeba zavést neodkladná opatření, a pokud ano, kde a jaká. Proto i zde je třeba počítat s MS pro provedení rychlého mapování dávek a eventuální rozvoz dozimetrů. Trasy těchto skupin by byly zadány KŠ resp. RKŠ pomocí průjezdních bodů v závislosti na stávající situaci.

V závislosti na reálné situaci by MS na základě pokynu KŠ/RKŠ měly též za úkol provést výměnu detektorů v síti TLD.

Významným pomocníkem při monitorování kontaminovaného území v první fázi po havárii může být letecká skupina [8]. Během leteckého měření lze za relativně krátkou dobu proměřit velké území. Je zřejmé, že v první fázi není nutné proměřit potenciálně kontaminované území s vysokou citlivostí, úkolem LeS je provést „kontrolu“ výsledků predikčních modelů. Výsledky měření jsou

zapracovány do map tak, aby bylo možné potvrdit a upřesnit hranice kontaminace. Pro tuto fázi je dostačující měření dávkových příkonů (pokud možno přepočtených na hodnoty 1 m nad povrchem země). Výsledky takovýchto měření budou zatíženy poměrně velkou chybou, ale pro první odhady, obzvláště s následným proměřením kritických bodů pozemními skupinami, budou dostačující.



Obr. 7
Trasy v ZHP JE Temelín v sektorech 1 -5 a trasa 17 (vlevo, světle zelená); Trasy v ZHP JE Dukovany v sektorech 1 - 4, 16 a trasa 17 (vpravo, světle zelená)

Upřesňující měření musí proběhnout tak, aby jeho výsledky byly k dispozici nejpozději do 48 hodin od vyhlášení ukrytí. Tato doba je ještě zkrácena o dobu, po kterou MS a LeS v důsledku trvajícího významného úniku nemohly monitorovat.

Využití leteckých měření v první fázi havárie závisí na možnostech vrtulníku, neboť – podobně jako u MS – je potřeba začít monitorovat co nejdříve po přejití mraku. Zde může hrát důležitou roli denní i roční období, počasí, ale taktéž doba potřebná ke vzletu vrtulníku – u AČR činí 12 hodin, u PČR je doba významně kratší. Proto je pro první fázi vhodná spolupráce s PČR, pro pozdní fázi, kde čas již nehraje takovou roli, lze využít vrtulník AČR.

b) Střední a pozdní fáze

Měření ve **střední a pozdní fázi** mají za cíl získat podklady pro řízení následných, příp. dlouhodobých opatření – ukončení evakuace, vyloučení potřeby relokace, regulaci potravních řetězců apod., pro odvrácení následného nezdůvodněného ozáření obyvatelstva.

V této fázi MS a LeS by prováděly již více specializované monitorování – plošně detailnější měření dávek měření kontaminace půdy pomocí gama

spektrometrie, svoz/rozvoz termoluminiscenčních dozimetrů, odebírání vzorků potravních řetězců, životního prostředí apod.

Úkolem **letecké skupiny** by bylo podrobné mapování zasažených (i potenciálně zasažených) území s důrazem na vymezení kontaminovaného území a na vyhledávání tzv. „horkých míst" – relativně malých ploch s výrazně zvýšenou kontaminací oproti okolí. Podobně jako při první fázi probíhá měření na předem definovaných rovnoběžných linkách. Vzhledem k tomu, že tato měření nejsou již omezena časově tak, jako při první fázi, je zde možné (a z důvodu přesnosti i nutné) zvolit rozestup linek podstatně menší: 50 - 250 m. Výsledkem monitorování jsou opět dávkové příkony přepočtené na 1 m nad zemí, ale pokud není kontaminant příliš složitá směs (což po několika dnech od havárie již většinou není), je možné provést odhady plošných aktivit nejdůležitějších (umělých) radionuklidů – ^{137}Cs a ^{131}I.

MS by na lokalitách vytipovaných leteckou skupinou (horká místa) upřesňovaly výsledky na zemi

- měřením dávkových příkonů a to jak na místě, tak za jízdy v automobilu,
- spektrometrickými měřeními na místě a
- prováděly by sběr vzorků životního prostředí s jejich následným proměřením ve spektrometrické laboratoři.

Pro střední a pozdní fázi čas již není tak kritický, monitorování lze provádět s ohledem na místo, rozsah a úroveň kontaminace, roční období, apod.

2.3.3 Počet a vybavení mobilních skupin a letecké skupiny

Mobilní skupiny

V ČR v rámci RMS v současnosti pracuje 36 mobilních skupin z rezortů SÚJB (18 MS), MO (2 MS), MV (1 MS PČR a 5 MS GŘ HZS), MF (8 MS) a 2 MS držitele povolení (Je Dukovany a Temelín). Řízením RMS byl pověřen SÚJB, v jeho kompetenci je tedy i zabezpečení přípravy a řízení činnosti MS. Na metodickém vedení MS se spolu se SÚJB podílí SÚRO.

Vybavení jednotlivých mobilních skupin vychází z jejich postavení v systému a prováděných činností (viz tab. 1); pro každou fázi nehody je nutné mírně odlišné vybavení:

- **časná fáze** – pro měření a mapování dávek musí být všechny MS vybaveny detektory dávkového příkonu gama a měřicími systémy pro pojezdová měření, GPS pro přesné stanovení polohy a některé MS i sadou příslušných termoluminiscenčních nebo elektronických dozimetrů. Samozřejmostí jsou osobní signální elektronické dozimetry.
- **střední a pozdní fáze** – MS musí být vybaveny přístroji používanými v časné fázi, navíc je třeba mít pro spektrometrická měření scintilační detektor, resp. lépe polovodičový detektor (plus spektrometrickou trasu není-li součástí detektoru), nástroje pro odběr vzorků životního prostředí, včetně přenosného odběrového zařízení na odběr aerosolů, ev. jódu (jódové patrony na toto zařízení).

Dle přístrojových požadavků lze MS rozdělit do tří skupin (tab. 1) – skupiny s nejjednodušším vybavením – základní skupiny A, skupiny schopné provést i jednoduchá spektrometrická měření – základní skupiny B a speciální skupiny – mobilní spektrometrická laboratoř zaměření zejména na komplexní monitorování ve střední a pozdní fázi přímo v terénu. Mimo tyto skupiny pak stojí letecká skupina. To znamená, že v časné fázi by vyjížděly pouze základní skupiny typu A a B, speciální skupina by vyjížděla až později, ve střední a pozdní fázi.

Tabulka 1
Rozdělení MS dle jejich činnosti a vybavení

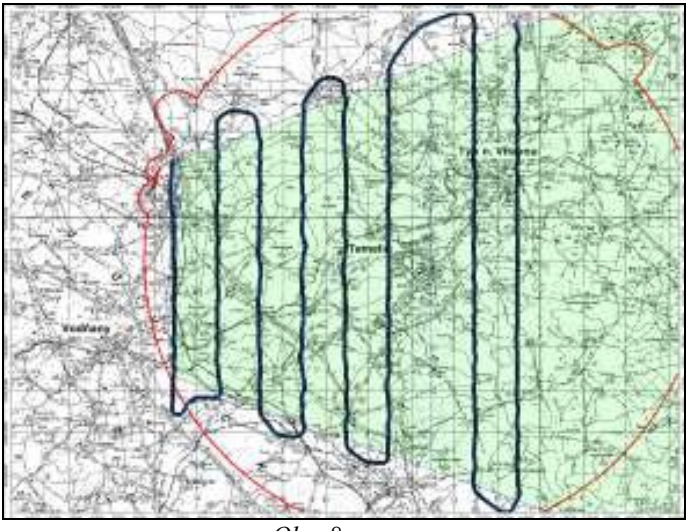
Skupina	činnost	přístrojové vybavení	personální obsazení	doba dojezdu [h]	Počet skupin
základní A	• měření dávkového příkonu • svoz/rozvoz TLD/ELD, načítání dat z ELD	• osobní elektronický dozimetr • mobilní měřicí systém • detektor na měření dávkového příkonu, GPS; TLD, ELD, čtečka ELD	2 + 2 (řidič + operátor)	6 h + doba dojezdu nebo 2 h pohotovost	6 RC SÚJB 8 GŘC
základní B	• scintilační spektrometrie • měření povrchové kontaminace • odběr vzorků ŽP	• spektrometr (GR135) • detektor povrchové kontaminace • detektor neutronů (signalizační) • sada nástrojů na odběr vzorků	2 + 2 (řidič + operátor)	2 h pohotovost + doba dojezdu	5 HZS 2 RC SÚJB 1 SÚRO (1 PČR)
speciální	• polovodičová spektrometrie • odběr aerosolů	• přenosný HPGe detektor se spektrometrickou trasou • přístroj na odběr aerosolů • detektor neutronů (dávky)	1 + 2 (řidič + 2 operátoři)	6 h + doba dojezdu	1 SÚRO
letecká	letecká spektrometrie	letecký spektrometrický systém doplněný HPGe detektorem	2 operátoři + 1 hodnotitel + řidič + posádka vrtulníku	24h a více (v závislosti na vrtulníku)	1 SÚRO AČR/PČR

Do budoucna je možné uvažovat o navýšení počtu základních skupin A, kde by se předpokládalo využití osob seznámených s rizikem – ne specialistů na radiační monitoring. Vybavení by představoval jednoduchý přístroj pro automatické měření dávek svázané s geografickými souřadnicemi. S těmito skupinami by se počítalo zejména pro méně kontaminované oblasti pro potvrzení modelových prognóz a volbu další strategie monitorování těchto oblastí s ohledem na zavádění následných dlouhodobých ochranných opatření.

Letecká skupina

Činnost letecké skupiny zabezpečuje letecká skupina SÚRO ve spolupráci s Armádou ČR resp. Policií ČR, které poskytují vrtulník s posádkou.

Postup při monitorování je následující: na vytipované ploše – polygonu se nalétávají rovnoběžné linky, kdy směr linek je dán terénem (např. v případě údolí je vhodnější létat ve směru údolí) a tvarem vytipovaného polygonu (velké časové ztráty nastávají při otáčkách a přechodu z jedné linky na druhou, proto je vhodnější nenavrhovat linky příliš krátké). Dalším důležitým parametrem monitorování je rozestup linek, kdy je nutno provést kompromis mezi časem a přesností (čím jsou linky blíže k sobě, tím je vyšší pravděpodobnost nalezení tzv. „hot spot“ – horkého místa, kde je prudký nárůst dávkového příkonu na relativně malé ploše). Rozestupy mezi linkami se volí běžně mezi 50 – 500 m, ale je-li potřeba, může být např. i 2 km, jak tomu bylo při cvičení Zóna 2010, viz obr. 8 [10, 20].



Obr. 8
Letecké monitorování – výsledek monitorování během cvičení Zóna 2010 (dávkové příkony přepočtené na 1m nad zemí; všechny naměřené hodnoty byly na úrovni pozadí)

Pro letecká měření v rámci RMS sítě se využívá spektrometrickým IRIS (**I**ntegrated **R**adiation **I**nformation **S**ystem, PicoEnvirotec). Systém IRIS je vysoce účinný spektrometrický systém, což je výhodné pro monitorování i území s relativně nízkou kontaminací (např. ještě dnes lze s ním na většině území ČR měřit kontaminaci půdy ^{137}Cs následkem havárie JE v Černobylu). Na druhou stranu tato vysoká detekční účinnost může působit problémy při měření v první fázi havárie JE, kde dávkové příkony mohou být vysoké. Detektor se pak může zahltit a nepomůže ani přechod na vyšší vzdálenosti od země (běžně se létá ve výškách 50 – 200 m). Proto je vhodné využití i dalších – jednodušších – přístrojů. Takovým příkladem může být systém pro měření dávkových příkonů PDOSE (PicoEnvirotec), vhodný jak pro stacionární měření, ale především pro mobilní měření v automobilu nebo vrtulníku.

Pro upřesnění složení kontaminantu je vhodné použít spektrometrickou trasu s polovodičovým detektorem.

2.3.4 Popis vybraných přístrojů pro mobilní skupiny a leteckou skupinu

Mobilní skupiny

a) Měření dávkových příkonů

Základním měřením prováděným mobilními skupinami je měření dávkového příkonu. Mobilní skupiny v současnosti disponují několika typy přístrojů pro měření dávkového příkonu, jejichž vlastnosti jsou shrnuty v tab. 2 [10]. Využití jednotlivých přístrojů se liší jak podle jejich schopnosti měřit různé úrovně dávkových příkonů, tak podle schopnosti zaznamenat např. radionuklidy vyzařující fotony o nízké energii. Veškeré přístroje jsou ověřovány dle zákona o metrologii. Nejistota měření se pohybuje do 25 %.

Tabulka 2
Přístroje pro měření fotonových dávkových příkonů používané na MS; jejich základní parametry

Přístroj	Rozsah měření dávkových příkonů	Detektor	Energetický rozsah [keV]
DC-3E-98	do 10 mGy/h	GM	50 - 1500
FH 40 G	100 nSv/h-1 Sv/h	proporcionální	50 - 1300
NB 3201	40 nGy/h - 100 mGy/h	plastický scintilátor	35 - 1500
GR-130/135	GM: 0,01-100 mSv/h NaI(Tl): 0,01-50 μSv/h	NaI(Tl)+GM	50 - 3000
RP 2000	100 nGy/h-10 mGy/h	GM	50 - 1500

Vysvětlivky: GM - Geiger-Müllerova trubice, NaI(Tl) - scintilační detektor.

b) Měření dávkových příkonů za jízdy

Pro tato měření se využívá mobilní systém MK. Systém se skládá z detektoru dávkového příkonu GR 130 resp. GR 135, umožňující nahrávání

měřených dat do připojeného notebooku, GPS, které zjišťuje a do notebooku nahrává ke každému měření příslušné souřadnice, a notebooku s aplikací PDE+, která všechna data zaznamenává do paměti notebooku, a umožňuje je i zakreslit do mapových podkladů pro větší přehlednost. Chyby měření jsou zde samozřejmě vyšší než při stacionárním měření dávkových příkonů, důležitou roli zde hraje řada faktorů – typ automobilu, ve kterém je systém převážen, uložení systému v automobilu, ale i rychlost jízdy a prostředí, ve kterém se automobil pohybuje (rovina, údolí…).

c) Osobní signální elektronické dozimetry

Pro jednoduchá (nouzová) měření lze využít osobních elektronických dozimetrů, které jsou povinny mít u sebe všechny osádky MS. Je ovšem zřejmé, že tato měření by byla zatížena velkou chybou a výsledky měření by bylo možno považovat pouze za orientační.

Letecká skupina

a) IRIS

Systém IRIS obsahuje 4 scintilační krystaly o objemu 4 litry (celkem 16 litrů), zařízení pro detekci pozice (GPS), výškoměr, navigační zařízení zajišťující přesné navádění po letových profilech a odolný notebook. Během leteckého monitorování se do paměti notebooku zaznamenávají naměřená spektra a údaje o pozici a výšce nad terénem, ze kterých je později pomocí software stanoven dávkový příkon a plošná aktivita vybraných umělých radionuklidů resp. hmotnostní aktivita přírodních radionuklidů. Rychlé jednoduché vyhodnocení naměřených spekter se provádí pomocí programů PEIView (součást systému IRIS), pro detailní vyhodnocení měření se používá komerční SW PRAGA. Délku jednotlivých měření lze nastavit v intervalu jednotek až desítek sekund, běžně se používá 1 s. IRIS měří dávkové příkony ve vrtulníku (pomocí SW je přepočítává na referenční výšku 1 m nad zemí) a díky svým spektrometrickým vlastnostem je schopný též provádět kvalitativní a kvantitativní analýzu kontaminantu pro vybrané umělé radionuklidy (např. ^{137}Cs, ^{131}I, ^{60}Co, ^{88}Kr), pokud měřená směs radionuklidů není příliš složitá.

Obdobným přístrojovým vybavením (IRIS) v současnosti disponuje i Armáda ČR, ale není zatím zapojeno do struktury RMS. Letecké prostředky průzkumu zatím nejsou realizovány.

b) PDOSE

PDOSE je detektor dávkového příkonu, jehož součástí je i GPS, takže je schopný zaznamenávat nejen dávkové příkony, ale i poziční data ke každému měření a je tedy možné na základě těchto údajů provádět i rychlé zakreslení naměřených dávkových příkonů do přehledových map.

Měřicí jednotka obsahuje dva Geiger-Müllerovy detektory (malý a velký), které se automaticky přepínají dle registrované četnosti impulzů, měřicí rozsah je 20 nGy/h - 400 mGy/h. Jednotka obsahuje i modul pro bezdrátovou komunikaci a vlastní GPS přijímač. Měřená data (radiační i poziční pro následné zakreslení

naměřených dat do přehledných map) se zaznamenávají do MDA (Mobile Data Acquisition systém), který se skládá z malého počítače, modulu bezdrátové komunikace (Bluetooth) a GPS přijímače. Soubory dat jsou následně vyhodnocovány pomocí SW PEIView (pro rychlá jednoduchá vyhodnocení) resp. PRAGA Ground (pro precizní vyhodnocení). Délka vzorkování může být od 1 s až do několika minut, pro letecká měření je vhodné použít délku vzorkování 1 s. Je nutné si uvědomit, že přístroj měří a ukazuje dávkový příkon na palubě vrtulníku, neboť nemá integrovaný modul pro měření výšky nad terénem a není tudíž schopný provádět korekce na změny výšky, což by v případě jednoduchých terénů nemuselo být na závadu – vrtulníky jsou schopny dodržovat letové výšky s poměrně velkou spolehlivostí (obvyklá výška letu je 100 m ± 20 %, v případě monitorování za havárie by výška letu byla vyšší). I takto naměřené hodnoty ale s velmi dobrou spolehlivostí vypovídají o situaci na zemi [21].

c) Spektrometrická trasa; detektor Falcon

Pro spektrometrická měření se při leteckém monitorování používá spektrometrická trasa s polovodičovým detektorem HPGe (ORTEC, relativní účinnost 25%, FWHM 1.9 keV pro ^{60}Co, 1.33 MeV, analyzátorem DigiDart (4096 kanálů) a notebookem s programem Maestro (ORTEC) nebo kompaktní polovodičový detektor určený pro terénní měření Falcon 5000® Portable HPGe-Based Nuclear Identifier. Tyto detektory mají relativně malou účinnost, ale v případě vysoké úrovně kontaminace terénu je možné tyto detektory využít i k jednoduchému mapování s omezeními podobnými jako u PDOSE.

2.3.5 Porovnání vybraných přístrojů pro terénní měření

V letech 2006 - 2007 proběhlo v SÚRO v rámci projektu [9] porovnání měřicích metod a kompatibility výsledků měřených vybranými systémy a přístroji používaných v Radiační monitorovací síti ČR. Jednalo se o:

- letecké prostředky – systém IRIS testován pro dva typy používaných vrtulníků
  - BELL 412 ve spolupráci s Policií ČR,
  - Mi 17 ve spolupráci s Armádou ČR,
- pozemní prostředky
  - měření dávkového příkonu za jízdy automobilem (systém MK),
  - „bodové“ měření dávkového příkonu (GR 130 a GR 135),
  - měření in-situ (spektrometrická „bodová“ měření),
  - odběr vzorků a následná laboratorní spektrometrická měření.

Parametry systému IRIS a MK a detektoru GR130/135 jsou popsány výše.

Na vytipovaných lokalitách byla provedena spektrometrická měření pomocí spektrometrické trasy (Obr. 9). Systém se skládá z polovodičového detektoru (ORTEC) s relativní účinností 25%, FWHM 1,9 keV (60Co, 1,33 MeV) a analyzátoru DigiDart (4096 kanálů; ORTEC). Naměřená spektra byla vyhodnocena pomocí programu Maestro (ORTEC). Detektor byl umístěn na stojanu 1 m nad zemí. Délka nabírání spektra byla 1800 s a mrtvá doba činila 2 – 3 %. Nejistoty měření se pohybovaly mezi 10 - 20 %.

Obr. 9
Spektrometrická in situ měření

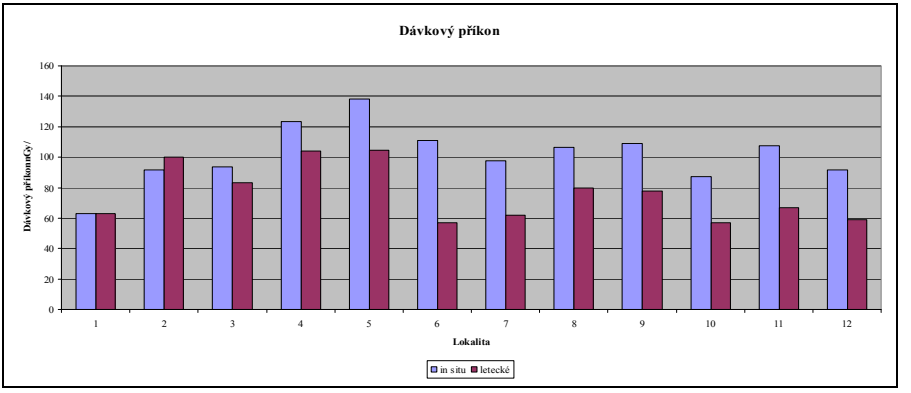
Obr. 10
Mapa polygonu

Na několika lokalitách měření in situ byl proveden odběr povrchové vrstvy půdy. Půda se odebírala dle postupů pro mobilní skupiny, tj. ohraničila se plocha 20 x 20 cm^2 a postupně se na této ploše odebral porost, vrstva zeminy do hloubky 5 cm a vrstva zeminy do hloubky 20 cm. Takto odebrané tři vzorky byly

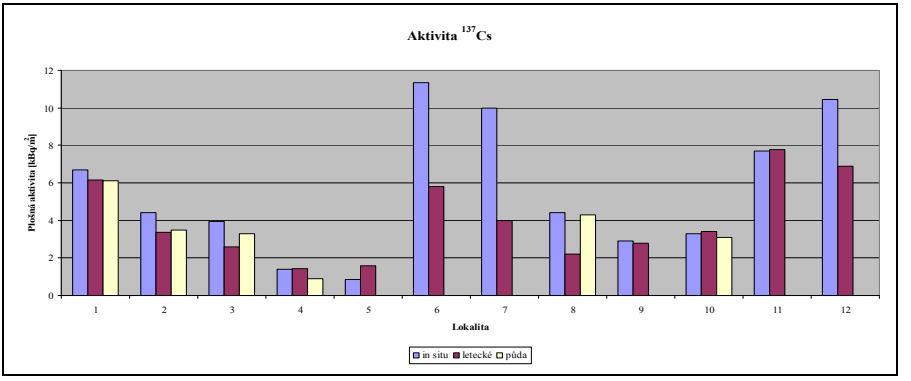
předány do spektrometrické laboratoře SÚRO, kde byl následně stanoven obsah umělých (^{137}Cs) a přírodních radionuklidů (^{40}K, U-řada a Th-řada).

Pro testování bylo využito území (polygon) o ploše přibližně 10 x 10 km^2 v centrální části Čech, jihovýchodně od Prahy poblíž města Vlašim (Obr. 10). Území polygonu je mírně zvlněné, nadmořská výška se pohybuje mezi 250 až 520 m.n.m., z porostu převažují louky a pole, lesy jsou přibližně na 20 % území. Na území se vyskytují přírodní radionuklidy v koncentracích běžných na území ČR (^{40}K, Ra-řada a Th-řada) a v důsledku havárie v Černobylu se vyskytuje i ^{137}Cs (1-20 kBq/m^2).

Podrobné výsledky porovnání jsou uvedeny v [9], zde uvádíme pouze nejdůležitější poznatky.



Obr. 11
Porovnání naměřených dávkových příkonů na vybraných lokalitách (modře - in situ měření; červeně - letecká měření) [nGy/h]



Obr. 12
Porovnání naměřených plošných aktivit ^{137}Cs [kBq/m^2] na vybraných lokalitách (modře - in situ měření; červeně - letecká měření; žlutě - laboratorní měření vzorků půdy)

Z výsledných obrázků a tabulek je zřejmé, že veškerá porovnávaná měření jsou kompatibilní i přes to, že odběr a měření vzorku půdy „mapuje“ pouze plochu 400 cm^2, in situ měření průměruje hodnoty z plochy přibližně 10 m^2 a letecká měření reprezentují plochu minimálně 100 m^2 (v závislosti na výšce letu), tedy neporovnávají se zcela stejné „vzorky“, neboť oblast polygonu není natolik homogenní. Letecká měření (při výšce letu 100 m nad zemí) se od pozemních liší maximálně do 40 % (Obr. 11, Obr. 12), při nižších letových hladinách byly výsledky ještě lepší – do 20 %.

V roce 2009 byly testovány další přístroje vhodné pro eventuální měření na palubě vrtulníku [21]. V rámci porovnání byly testovány systémy IRIS a PDOSE (oba PicoEnviroTec) a polovodičová trasa s detektorem ORTEC (parametry viz výše). Přístroje byly umístěny na palubě vrtulníku během cvičného monitorování území poblíž Příbrami (oblast vhodná pro testování pro velkou nehomogenitu přírodních radionuklidů obsažených v půdě).

Spektrometrická trasa se ukázala jako použitelná, byť je třeba počítat s velkou časovou náročností na vyhodnocení. Vzhledem k malé účinnosti detektoru je zřejmé, že chyba takovýchto měření je velká a nejspíš v této podobě pro účely kódu HARP nepoužitelná (nikoli však pro vlastní havarijní měření, kde malá účinnost detektoru by pravděpodobně byla spíše přínosem).

Systém PDOSE je vhodný pro situace, kdy systém IRIS nelze použít. Za takovýchto okolností je ale nutné mít na vědomí, že přístroj měří dávkový příkon na palubě vrtulníku a že tato hodnota je sice úměrná dávce na zemi resp. v 1 m nad zemí, ale je ovlivněna výškou, ve které se v okamžiku měření vrtulník nacházel. Přesto tuto hodnotu lze jako indikátor dávkového příkonu ve většině případů přijmout. I zde ovšem je velké omezení použitelnosti výsledků pro účely kódu HARP.

3 ANALÝZA VLIVU POČTU A ROZMÍSTĚNÍ RECEPTORŮ SÍTĚ NA KVALITU ASIMILACE DAT A PREDIKCE

Vliv počtu a rozmístění receptorů sítě (měřicích míst SVZ) na přesnost asimilace v časné fázi radiační nehody lze demonstrovat na jednoduchém příkladu, kdy uvažujeme hypotetický únik z jaderného zařízení, při kterém se utvoří radioaktivní mrak putující nad terénem, a předpokládáme, že receptory sítě už od počátku poskytují měřené hodnoty v pravidelných časových intervalech. Cílem asimilace je zde kontinuálně upřesňovat odhad časové a prostorové distribuce zvolené radiologické veličiny (např. objemové aktivity vzduchu) a co nejvíce se přibližovat nastalé fyzikální realitě.

Pro jednoduchost se soustřeďme pouze na ozáření z mraku, tj. neuvažujeme ozáření způsobené radioaktivním materiálem deponovaným na terénu vlivem mokré a suché depozice. V tomto příkladu asimilujeme koncentraci aktivity ve vzduchu, danou předpovědním modelem šíření, s měřeními dávkového příkonu z mraku poskytovanými receptory sítě. Uvažovaný skutečný únik simulujeme pomocí atmosférického disperzního modelu, tj. jedná se o tzv. “twin” experiment,

kdy měření jsou simulována disperzním modelem inicializovaným nějakými referenčními hodnotami a perturbována náhodným šumem simulujícím chyby měření. Tato běžně používaná technika má tři základní výhody. Jednak obejdeme fakt, že skutečná data vhodná pro testování vyvíjených metod nejsou dostupná, a dále nám pak tento přístup zajišťuje transparentnost celého experimentu. Můžeme objektivně hodnotit shodu asimilovaného modelu s tím, který byl použit k simulaci skutečného úniku. Nejdůležitější je však fakt, že nám tato technika umožňuje testovat asimilační metody pro širokou skálu meteorologických a jiných podmínek a ohodnotit tak jejich robustnost. Kumulativní hodnoty koncentrace aktivity ve vzduchu nominálního úniku použitého pro simulaci měření můžeme vidět na Obr. 13. (vpravo).

Pro porovnání vlivu hustoty receptorů na kvalitu predikce uvažujme dvě konfigurace receptorů, přibližně pokrývající čtverec o délce strany 20 km, kde zdroj úniku je umístěn v jeho středu. Obě konfigurace jsou tvořeny receptory rozmístěnými do tří soustředných kruhů obklopujících zdroj. Kruh nejblíže ke zdroji představuje receptory umístěné přímo v areálu jaderného zařízení resp. na jeho hranici. Jedná se o dva poněkud extrémní případy. První konfigurace, označovaná v následujícím textu jako *řídká síť*, je tvořena šesti receptory v každém kruhu, tj. celkem osmnácti receptory. Druhá konfigurace, označovaná v následujícím textu jako *hustá síť*, je tvořena dvaceti receptory v každém kruhu, tj. celkem šedesáti receptory. Asimilace je prováděna pro prvních 90 minut po začátku okamžitého jednorázového úniku s délkou časového kroku 10 minut, tj. je provedeno celkem 9 asimilačních kroků.

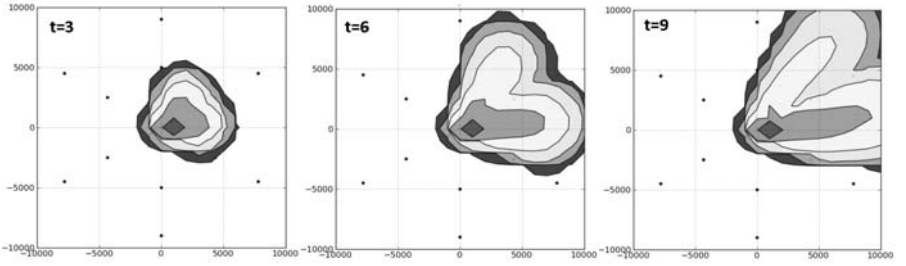
Zvolená asimilační metodika, popsaná např. v [23], je vyvíjena v ÚTIA AV ČR, v.v.i., v rámci projektu Bezpečnostního výzkumu MV ČR VG20102013018. Vychází ze sekvenčních metod Monte-Carlo, kdy je generováno velké množství pravděpodobných scénářů šíření kontaminace, a pomocí asimilace měření jsou statisticky vhodně kombinovány ty nejvíce pravděpodobné z nich. Jedná se o obecnou metodiku aplikovatelnou na všechny třídy parametrizovaných atmosférických disperzních modelů.

Na Obr. 12 a Obr. 13 můžeme vidět výsledky asimilace pro obě uvažované konfigurace SVZ. Receptorové body jsou znázorněny pomocí kroužků. Jsou zde znázorněny asimilované odhady po asimilačních krocích 3, 6 a 9, kdy v *k*-tém kroku je nejlepší odhad prostorového rozložení koncentrace aktivity ve vzduchu proveden pomocí asimilace všech měření z časových kroků *0* až *k*.

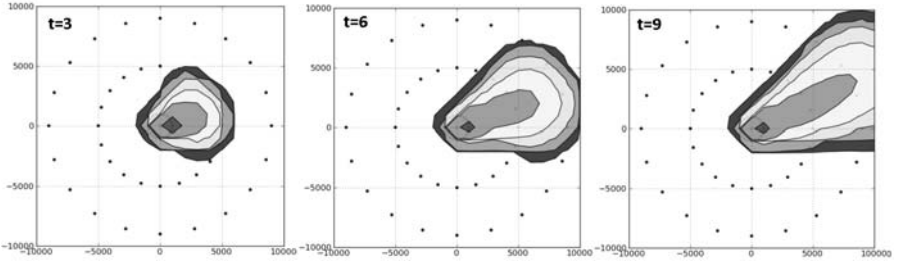
Na Obr. 12 je patrné, že řídká konfigurace sítě neposkytuje dostatek informativních měření a asimilační algoritmus nemůže s dostatečnou přesností určit skutečný směr šíření úniku. Jeho pravděpodobnostní povaha nám však zaručuje, že žádná z pravděpodobných možností není vyloučena a výsledná kumulativní hodnota koncentrace aktivity pokrývá širší oblast, která ovšem zahrnuje i tu skutečně zasaženou. Z výsledků na Obr. 13 je patrné, že hustá síť poskytuje více informativní data a lokalizace skutečného úniku je přesnější ve všech časových krocích.

Na Obr. 14 vidíme porovnání asimilovaných odhadů pro řídkou a hustou síť s nominálním modelem. To, že ani pro hustou síť nedošlo k přesné shodě

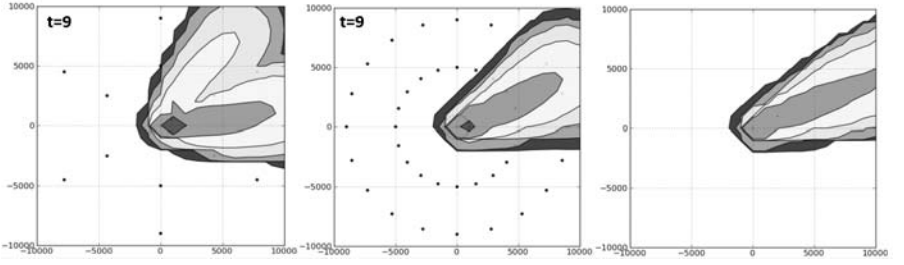
s nominálním modelem, je způsobeno neurčitostmi v celém problému (např. chybami měření) a také pravděpodobnostní povahou použitého asimilačního algoritmu, kdy výsledkem jsou pravděpodobnostní distribuce popisující odhadovanou radiologickou veličinu. Více k dané problematice lze nalézt v [22], kde jsou dokumentovány složitější asimilační scénáře.



Obr. 12
Časový průběh asimilace pro řídkou síť



Obr. 13
Časový průběh asimilace pro hustou síť



Obr. 14
Porovnání skutečné stopy mraku (vpravo) s výsledky asimilace pro řídkou síť (vlevo) a hustou síť (uprostřed)

4 SHRNUTÍ: CO MŮŽE PŘINÉST PROFESIONÁLNÍ MONITORING RADIAČNÍ SITUACE PRO MODELOVÉ PŘEDPOVĚDI A NAOPAK

Metody asimilace modelových předpovědí a měřených dat jsou schopny poskytnout krizovému řízení syntézu všech dostupných údajů a to včetně informace o neurčitosti. Z těchto údajů je možné dále odvodit automatické, či polo-automatické rady pro krizové rozhodování, jako například mapy očekávaného zamoření, či mapy oblastí, v nichž je nutné provést neodkladná opatření. My se zmíníme o další důležité aplikaci, kterou je vývoj softwarových prostředků pro **návrh a prověřování konfigurace monitorovacích sítí**.

Na jednoduchém příkladu dvou možných konfigurací sítě jsme demonstrovali, jak důležitou roli hraje hustota měřicích stanic při redukci neurčitosti v předpovědích kontaminace. Stávající sít měřících stanic se blíží scénáři s řídkou sítí a následným výzkumným cílem je vytvoření metodiky pro návrh topologie receptorů pro doplnění a zahuštění stávající sítě. Techniky stochastické asimilace umožňují vyhodnotit kritéria kvality pro různé předložené konfigurace sítě a tím pádem vybrat tu nejvhodnější.

V demonstračním příkladu jsme uvažovali rozmístění receptorů do pravidelných kruhů, při návrhu skutečné konfigurace receptorů bude ovšem muset být zohledněno mnoho dalších faktorů, jak technických (dostupnost energie a komunikačních prostředků, ochrana před poškozením či odcizením, atd.), tak i ekonomických (cena vybudování sítě a jejího provozu a údržby), demografických (hustota osídlení s důrazem na monitoring hustě osídlených oblastí), politicko-sociálních atd., ze kterých velmi pravděpodobně vzejdou určitá omezení týkající se jak počtu navrhovaných receptorů, tak i možností jejich rozmístění. Rovněž je nutné zohlednit lokální podmínky pro uvažovanou oblast včetně dlouhodobých povětrnostních charakteristik udávajících převládající směry větru.

Námi vyvíjené metody hodnocení by měly být schopny z dané množiny možných konfigurací receptorů, stabilních a případně i mobilních, sestavené s přihlédnutím ke všem relevantním faktorům a omezením, vybrat tu, která bude poskytovat soubor měření s největší informační hodnotou z pohledu jejich využití pro automatické či polo-automatické asimilační systémy.

ZÁVĚR

Zvolená metoda hodnocení umožňuje z dané množiny možných konfigurací receptorů, sestavené s přihlédnutím ke všem relevantním faktorům a omezením, vybrat tu, která bude poskytovat soubor měření s největší informační hodnotou z pohledu jejich využití pro automatické či polo-automatické asimilační systémy.

Metoda umožňuje optimalizovat konfiguraci sítě receptorů ve vybrané oblasti s ohledem i na hledisko kvality asimilace terénních dat a z nich vyplývající kvality modelové prognózy. Využití uvedeného nástroje pro vývoj ucelené

metodiky pro návrh topologie receptorů monitorovací sítě na základě dané množiny omezení je předmětem dalšího výzkumu v rámci shora zmíněného grantového projektu Bezpečnostního výzkumu MV VG20102013018 řešeného v ÚTIA a projektu VF20102015014 řešeného SÚRO.

Résumé

To support a crisis decision making and control in case of nuclear power facility accident resulting in a release of radioactive substances into an atmosphere, it is necessary to have an access to as detailed and actual as possible information on an actual radiation situation on-site and on a prognosis of its potential development. In practice there are usually available on the one hand monitoring radiation situation data obtained by monitoring networks - during an early development phase of event there are particularly dose rate date measured by stable monitoring networks (on territorial and local levels) - and from a monitoring performed by ground-based and airborne mobile groups; and on the other hand model prognoses of potential development of radiation situation provided with computational systems.

In order to increase accuracy and reliability of model prognoses, it is suitable to use an assimilation method of real data from field measurements to correct the computed model prognoses. An effective tool for such assimilation is the ASIM module built in the HARP system, allowing advanced information assimilation from various kinds of monitoring performed independently, involving as well data assimilation from measurements performed in various time matrixes, which may not correspond to a time step of calculation.

Another factor influencing a quality of radiation situation information is a configuration of monitoring networks in surroundings of nuclear power facility. Within the HARP project developed subsystem allows to analyze an influence of monitoring points location in given area on a quality of obtained information on an actual radiation situation. On the base of this analysis the subsystem subsequently enables to realize a project of monitoring points topology optimization in the area, taking into account not only radiation monitoring factors, but also an deviation influence assessment from an ideal topology given by factors, both technical ones (such as availability of electrical power, of communication means etc.) and economical ones (reduction of monitoring points number by reason of expenses economy for network build-up and operation).

A use of developed tools for data assimilation and analysis of monitoring networks topology is a scope of follow-up research within a grant project of the Security Research controlled by the Home Office of the Czech Republic.

Literatura

[1] ČEŠPÍROVÁ, Irena et. al. Letecká měření (IRIS, polovodičový detektor, PDOSE). *Bezpečnost jaderné energie*, 2010, vol 18. ISSN 1210-7085.

[2] ČEŠPÍROVÁ, Irena, FROŇKA, Aleš. Porovnání leteckých a pozemních měření. *Bezpečnost jaderné energie*, 2008, 3/4. ISSN 1210-7085.
[3] ČEŠPÍROVÁ, Irena, HŮLKA, Jiří. Lze UAV využít pro monitorování v případě radiační nehody? In *1. Národní konference Civilní bezpilotní systémy: Odborná společnost letecká*. Praha, 2008. ISBN 978-80-902522-2-6.
[4] ČEŠPÍROVÁ, Irena., PAŠKOVÁ, Zuzana., MATZNER, Jan. Činnost letecké a mobilních skupin během cvičení Zóna 2010. In *Sborník abstrakt – DRO.* Třeboň, ČR, 2010.
[5] ČEŠPÍROVÁ, Irena, PROUZA, Zdeněk. Activity of Mobile and Aerial Groups during Radiation Emergency. In *International Symposium on In Situ Nuclear Metrology As A Tool For Radioecology*. Rabat, Morocco, 2008.
[6] FROŇKA, Aleš, ČEŠPÍROVÁ, Irena. Brief description of the setup of the Czech measurement technique, with a special focus on the development ofter 2002. In *Workshop On Aero-Gammaspectrometry, Federal Office for Radiation Protection.* Berling, 2010.
[7] FROŇKA, Aleš, ČEŠPÍROVÁ, Irena. The system of modern data acquisition – including airborne gamma measurements in case of severe NPP accident. In *Workshop On Aero-Gammaspectrometry, Federal Office for Radiation Protection.* Berling, 2010.
[8] HOFMAN, Radek. *Application of Advanced Data Assimilation Methods in Off-site Consequence Assessment*. [Disertační práce.] Praha: FJFI ČVUT, 2011.
[9] HŮLKA, Jiří, et. al. *Metody hodnocení kontaminovaného území po radiační havárii - význam struktury a funkce krajinného krytu*. [Závěrečná výzkumná zpráva projektu výzkumu a vývoje SÚJB č.1/2008.] Státní ústav radiační ochrany, 2010.
[10] HŮLKA, Jiří. *Vývoj, ověřování a zavádění nových postupů, metod a metodik monitorování radiační situace a ozáření osob se zaměřením na hodnocení výpustí radionuklidů do životního prostředí z JE a monitorování jejich okolí a na expresní metodiky*. [Závěrečná výzkumná zpráva projektu výzkumu a vývoje. SÚJB č.3/2006.] Státní ústav radiační ochrany, 2007.
[11] IAEA. EPR-First RESPONDERS. *Manual for First Responders to a Radiological Emergency.* Vienna, 2006.
[12] IAEA-TecDoc – 1162. *Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency*. Vienna, 2000.
[13] Nařízení vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování.
[14] PECHA, Petr, HOFMAN, Radek, KUČA, Petr. Lessons learned from former radiation accidents on development of software tools for effective decision making support. In *11th International Conference on Present and Future of Crisis Management 2009.* Praha, CZ, 2009.
[15] PECHA, Petr, HOFMAN, Radek, ŠMÍDL, Václav. Bayesian tracking of the toxic plume spreading in the early stage of radiation accident. In *The 2009 European Simulation and Modelling Conference.* Leicester, GB, 2009.
[16] PROUZA, Zdeněk. *Metody a opatření k omezení vzniku a k likvidaci následků teroristického zneužití radioaktivních látek*. [Závěrečná výzkumná

zpráva projektu výzkumu a vývoje SÚJB VAV č.2/2008.] Státní ústav radiační ochrany, 2010.
[17] PROUZA, Zdeněk, ŠVEC, Jiří. *Zásahy při radiační mimořádné události.* Ostrava: Edice SPEKTRUM 57. 125 s. ISBN 978-80-7385-046-3.
[18] SANDERSON, D.C.W., McLEOD, J.J. Recent Applications and Developments in Mobile and Airborne Gamma Spectrometry. In *Proceedings of Integrnational Symposium RADMAGS'98*. Stirling, UK, 1998.
[19] STROBL, C., et. al. Aero-gammaspectrometry as an Important Tool after a Nuclear Accident. In *ALARA Issue arising for Safety and Security of Radiation Sources and Security Screening Devices*. Vienna, Austria, 2009.
[20] TMT Handbook. *Triage, monitoring and treatment of people exposed to ionising radiation following a malevolent act.* 6th EURATOM Framework Programme for RTD, 2008. Dostupné z WWW: <www.tmthandbook.org>.
[21] Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně.
[22] Vyhláška SÚJB č. 319/2002 Sb., o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě.
[23] Zákon č. 18/1997 Sb., ve znění platných předpisů (Atomový zákon).
[24] Zprávy o radiační situaci na území České republiky, Státní ústav radiační ochrany, Praha, 2003 – 2007. Dostupné z WWW: <www.suro.cz>.

Použité zkratky

RMS	Radiační monitorovací síť
MS	mobilní skupina
LeS	letecká skupina
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
KŠ	krizový štáb
RKŠ	regionální krizový štáb
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
RC SÚJB	Regionální centrum Státního úřadu pro jadernou bezpečnost
ZHP	Zóna havarijního plánování
JE	jaderná elektrárna
GPS	Global Positioning System
AČR	Armáda ČR
PČR	Policie ČR
GŘC	Generální ředitelství cel
TLD	Termoluminiscenční dozimetr
ELD	Elektronický dozimetr