

POUČENÍ Z DŘÍVĚJŠÍCH NEHOD NA JADERNÝCH ZAŘÍZENÍCH PRO OBLAST VÝVOJE PROGRAMOVÝCH PROSTŘEDKŮ PRO PODPORU ROZHODOVÁNÍ

Ing. Petr Pecha, CSc
Ústav teorie informace a
Automatizace, AVČR
Pod Vodárenskou věží 4
182 00, Praha 8
tel.: +420 266052009,
e-mail: pecha@utia.cas.cz

Ing. Radek Hofman
Ústav teorie informace a
Automatizace, AVČR
Pod Vodárenskou věží 4
182 00, Praha 8
tel.: +420 266052442
e-mail: hofman@utia.cas.cz

Ing. Petr Kuča
Státní ústav radiální
ochrany
Bartošková 28
140 00 Praha 4, Nusle
tel.: +420 226518198
petr.kuca@suro.cz

Profesní zaměření

Petr Pecha: Vědecký pracovník. Zkušenosti v oboru modelování šíření radioaktivity do životního prostředí, pravděpodobnostní přístup k hodnocení následků radiačních nehod, rozvoj pokročilých statistických metod asimilace modelových předpovědí s pozorováními v terénu. Účast při lokalizaci systému RODOS na podmínky ČR.

Radek Hofman: PhD student - vývoj a aplikace bayesovských adaptivních technik pro asimilaci výsledků modelování s reálnými měřeními. Zaměřen na postupy částicových filtrů pro časnou fázi nehody a na vývoj algoritmů kalmanovské filtrace pro pozdější fázi nehody.

Petr Kuča: Vedoucí oddělení Informačních systémů Státního ústavu radiální ochrany. Zodpovídá za provoz Radiální monitorovací sítě České Republiky. Spolupracuje na výzkumu možností využití online meteorologických měření a radiačních měření pro účely asimilačních procedur.

Přírodní a lidské faktory vzniku nehod

Katastrofické záplavy, devastující zemětřesení nebo pandemické šíření infekčních nemocí jsou příkladem možného ohrožení široké populace přírodními živly. Značné riziko může být též spojeno s vlastní lidskou činností, způsobené neodpovědným individuálním chováním, zanedbáním povinností nebo lidskými chybami obvykle souvisejícími s poruchami zastaralých zařízení nebo při nasazení nezralých a neověřených technologií. Nemusí se však jednat jen o průmyslové havárie a nehody při transportu. Události z 11. září 2001 dramaticky odstartovaly teroristické útoky zaměřené proti civilnímu obyvatelstvu. Veřejnost dnes mnohem citlivěji vnímá možné hrozby plynoucí z úmyslného zneužití chemických látek a biologických a radioaktivních materiálů. Terorismus přechází od tradičních metod ke zbráním hromadného ničení. Predikce a odhad následků rozsevu škodlivých látek bude určitě hrát zásadní úlohu v připravenosti na teroristické akce a v odezvě na ně.

Doposud největší chemická katastrofa se stala v indickém městě Bhópál. V noci 3. prosince 1984 uniklo v chemické továrně společnosti Union Carbide z poškozeného zásobníku více než 40 tun smrtícího methylisokyanátu. Jedovatý plyn měl téměř okamžitě na svědomí asi 20 tisíc mrtvých. Celkem bylo v Bhópálu postiženo přes půl miliónu lidí. Kolem 120 tisíc lidí bylo vážně zasaženo a na následky pohromy dodnes ročně umírá mnoho desítek lidí. Společnost Union Carbide odmítala odpovědnost za tragedii a argumentovala tím, že incident byl výsledkem sabotáže. To se však nepotvrdilo a pozdější šetření prokázala závažné technické nedostatky, naprosté selhání systému varování, totální výpadek informování veřejnosti a neexistenci jakékoliv havarijní připravenosti.

Mimořádné události na jaderných zařízeních mohou vést k úniku radioaktivity do životního prostředí. Následky nehod předcházejících katastrofu v Černobylu se vesměs omezily na lokální měřítko. Lze například jmenovat nehody v závodech na přepracování paliva a separaci plutonia z padesátých let minulého století v bývalém SSSR nebo požár reaktoru ve Windscale ve Velké Británii. Nejhorší událost na reaktoru v USA se stala na jaderné elektrárně TMI (Three Mile Island) v březnu roku 1979. Po sérii závažných chyb provozní obsluhy a operátorů nakonec TMI-2 reaktor došel do stavu částečného tavení paliva. Tento incident sice nevedl k významnější kontaminaci okolí nebo ozáření osob, nicméně situace byla široce komentována v médiích, aniž by byly poskytnuty pravdivé informace o vývoji události. Takto byl položen základ k dlouhodobému nepříznivému efektu na veřejné mínění o budoucnosti jaderné energetiky v USA. Dalším zdrojem zavedení radioaktivity do životního prostředí byly testy jaderných zbraní, u nichž byl naprosto převládající zhoubný efekt v krátkém časovém intervalu od okamžiku výbuchu. Dlouhodobá kontaminace je sice dodnes patrná, nicméně v globálním měřítku není podstatná.

Dosud největší světovou havárií na jaderném zařízení byla vážná nehoda na černobylské elektrárně na Ukrajině, která se stala 26. dubna 1986. Operátor noční směny se nezodpovědně rozhodl provést neautorizovaný test. Došlo k flagrantnímu porušení předpisů a řetěz chyb a porušení operátorských předpisů vedl až ke stadiu, kdy se fatálně projeví nedostatky v samotném fyzikálním návrhu reaktoru RBMK. Během exkurze výkonu se výkon reaktoru během jedné sekundy zvýšil stokrát a došlo k parnímu výbuchu (v Černobylu tedy nešlo o jaderný výbuch). Víko reaktoru se odtrhlo, aktivní zóna byla obnažena a grafitový moderátor začal prudce hořet. Radioaktivní materiál byl efektem hoření chrlen do atmosféry a lehčí komponenty přiměsí byly unášeny větrem až do okolních evropských zemí.



V časně fázi nehoda si vyžádala 2 oběti z řad obsluhy a více než 30 úmrtí hasičů, kteří byli posláni do boje s hořícím peklem. Deterministické účinky projevující se syndromem akutního ozáření (akutní nemoc z ozáření) byly zjištěny u 134 pacientů. Bez jakékoliv diskuse lze očekávat stochastické zdravotní následky v pozdější fázi, protože miliony lidí v různých zemích byly vystaveny zvýšené radiační expozici. Jsou zveřejňovány různé zprávy a odhady o zvýšeném

výskytu některých nemocí jako důsledku katastrofy¹. Může trvat celé dekády, než budou vyjasněny dlouhodobé následky v projevech zdravotní újmy obyvatel. Zatím je zřejmé, že na základě podrobných výzkumů a statistického zpracování ve větších oblastech černobylská nehoda iniciovala vzrůstající výskyt rakoviny štítné žlázy u dětí² (viz obr. 1). V roce 2005 WHO informovala o zhruba 50 úmrtích přičítaných ozáření v důsledku nehody a dále o přibližně 4000 případech nálezů karcinomu štítné žlázy u dětí a adolescentů. Z toho v konečném součtu 9 dětí zemřelo, nicméně nemoc je úspěšně léčitelná a pro oběti nemoci se odhaduje míra přežití 99%. Akutní nemoc z ozáření, karcinom štítné žlázy a psychologické následky patří mezi jednoznačně prokázané zdravotní následky. Pokud se týká ostatních zdravotních důsledků, vědecká komunita dosud nenašla jednoznačnou souvislost jejich případného výskytu se zvýšenou radiací nad hodnoty pozadí [3]. Nicméně byly zahájeny a probíhají podrobné analýzy dosud nezodpovězených otázek souvisejících se zdravotními následky v pozdní fázi nehody se zaměřením na leukemii, vývoj zdravotního stavu dětí ozářených před narozením, výzkumem případného výskytu genetických změn a vrozenými tělesnými poškozeními.

Psychologické následky pramení z pochopitelného strachu z působení neznámých nebezpečných látek, z obav a úzkosti z ozáření dětí, z nedůvěry k opětnému ujišťování místních autorit a ze strachu a z depresí doprovázejících nucenou evakuaci z obydli a známého prostředí. Někteří lidé trpí psychickými poruchami, jiní uvolňují duševní stres zvýšenou konzumací alkoholu a cigaret. Situace si vynucuje omezení v oblasti konzumace potravin a změny jídelníčku pro zamezení vnitřní kontaminace. K nepřímým důsledkům pak lze přiřadit pokusy o sebevraždu, cirhózu jater nebo rakovinu plic. Psychologické následky jsou zcela reálné a prokázané a s jejich zvládnutím by měly počítat i havarijní plány.

Základní poučení z příčin vzniku, průběhu a následků katastrof

Z předchozího přehledu vybraných nehod, které sebou přinesly těžké následky, vyplývá, že mnohé z nich vůbec nemusely nastat nebo případné následky nemusely být tak rozsáhlé. Porušování předpisů, nedodržování pravidel, lidské chyby a nedostatečně vyškolená obsluha jsou identifikovány jako nejčastější faktory, které iniciovaly vznik a vývoj nehod. Také chyby v samotném návrhu a konstrukci mohou závažně oslabit implementované vnitřní bezpečnostní rysy jaderného zařízení³. Sledujeme-li vývoj dřívějších nehod, situaci obvykle ještě zhoršovalo neadekvátní krizové řízení obvykle ochromené informačními zmatky a šumem, nepřipraveností na skutečný rozvoj nehody v dílčích fázích, nedostatečným plánováním, prací s neověřenými zdroji a postupy, a také podceněním psychologických a sociálních aspektů. Tým odpovědný za krizové řízení musí mít k dispozici vhodné nástroje k rozhodování včetně nejmodernějších hardwarových a softwarových prostředků, aby mohl správně identifikovat rozsah následků a případně zahájit přípravu na zavádění neodkladných opatření.

Objektivní informování veřejnosti přispěje k potlačení paniky mezi obyvatelstvem a vede k aktivitám orientovaným správným směrem. Výstupy pro bulvární žurnalistiku by měly být korigovány skutečnými odborníky a neměly by dávat prostor pro vznik „senzačních“ zpráv a prezentaci nejrůznějších diletantských bludných konstrukcí. Některé informační zdroje pohromu

¹ Orgány Komise EU po své návštěvě Ukrajiny v roce 1993 zveřejnily odhad zvýšeného výskytu všech typů nádorových onemocnění v kontaminovaných oblastech kolem 1% za celou normální dobu života.

² Dávky vnitřního ozáření štítné žlázy byly způsobeny hlavně vnitřním příjmem radionuklidu ¹³¹I v důsledku neregulované konzumace kontaminovaného mléka a jarní listové zeleniny.

³ Na rozdíl od tlakovodních reaktorů typu WWER používaných v ČR, které jsou chlazeny a moderovány lehkou vodou, byl černobylský reaktor typu RBMK chlazen lehkou vodou, ale jako moderátor neutronů je použit grafit. V důsledku této konfigurace aktivní zóna vykazuje kladný teplotní koeficient reaktivity související se vznikem parních prostor v chladicích kanálech („void“ efekt) při mimořádném stavu. Při abnormální tvorbě páry tak absorpce neutronů v aktivní zóně klesá a výkon reaktoru se prudce zvyšuje.

v Černobyli bagatelizovaly a zlehčovaly⁴, jiné naopak zveličovaly⁵. Následky nehody byly v některých případech ať úmyslně nebo neúmyslně nesprávně interpretovány. Protistrany lpí na svých postojích k situaci, které ovšem definitivně prověří až čas. Jako příklad může sloužit komentář uvedený v [2], kde autoři poznamenávají, že “ ... a large number of death of the recovery workers (known as liquidators) were reported by Reuters but these are due to natural causes. There were similar reports of farm animals born with deformities but this neglected the fact that the normal rate of congenital birth defect in some farm animals is nearly 10%.... “.

Nehody musí být ohlašovány včas a s dalšími adekvátními informacemi. Jako odstrašující příklad může posloužit situace, která se stala na samém počátku černobylské havárie. Navzdory enormnímu úniku aktivity bylo vydáno varování a oficiální informace až o 2 dny později, kdy ve Švédsku naměřili dramatické zvýšení radioaktivity ve vzduchu. Dále je všeobecně uznána nutnost důkladného vyškolení operátorů a nastavení jasných kritérií pro identifikaci a reportování stavu ohrožení. Operátoři musí dostat jednoznačné postupy a nesmí být přetížení přílišným množstvím úloh⁶. Celkem shrnuto, pochybení při zajišťování kvality a údržby, nedostatečné vyškolení operátorů, špatná komunikace o bezpečnostních aspektech nehody, ale také diletantské řízení, sebeuspokojení a samolibost jsou uznávány jako hlavní příčiny mimořádných událostí spojených s nekontrolovanými úniky radioaktivity.

Navzdory otřesným zkušenostem a utrpení mnoha postižených lidí lze najít i pozitivní následný efekt spočívající v rigorózním auditu chemické a jaderné bezpečnosti s nastartováním nového přístupu v krizovém řízení.

Programové nástroje pro predikci vývoje radiologické situace

Z širšího pohledu se krizové řízení soustřeďuje na ocenění bezpečnostního rizika a na plánování, monitorování a organizaci záchranných akcí. Pro rychlou odezvu cílenou na zmírnění následků nehody a regeneraci je nezbytná spolupráce a součinnost všech výkonných orgánů na vládní a případně i na mezinárodní úrovni⁷. V následujícím textu se budeme věnovat dílčímu tématu rozvoje moderních simulačních programových prostředků pro podporu rozhodování za krizových situací na jaderných zařízeních.

Možné zásahové akce na zmírnění radiologických následků na populaci jsou voleny podle typu a rozsahu nehody a jejího vývoje v delším časovém horizontu. Každá fáze nehody je charakterizována svojí vlastní časovou škálou, dominantní cestou ozáření (zevní, vnitřní ozáření) a z toho vyplývajícím typem zaváděných protiopatření. Je zřejmé, že je třeba vyvíjet programové prostředky specifické pro každou dílčí fázi. Nehodu na jaderném zařízení je nutné sledovat a analyzovat ve třech etapách:

- **Předhavarijní situace:** Bylo indikováno abnormální chování určité komponenty. I když ještě nedošlo k úniku, objevila se jeho reálná hrozba. Simulační software je aktivován, jsou shromažďována aktuální vstupní data do disperzních kódů. Postupně

⁴ Článek “Chernobyl – the Biggest BLUFF of the 20th Century” v prominentním polském magazínu WPROST, no. 2, Jan. 2001.

⁵ “Chernobyl death toll grossly underestimated” – nový report ekologických aktivistů Greenpeace prorokuje čtvrt milionu nádorových onemocnění a téměř 100 000 obětí.

⁶ Například během incidentu na jaderné elektrárně Three Mile Island, mechanická závada byla operátory mylně rozpoznána jako počáteční havárie elektrárny se ztrátou chlazení. Vzhledem k nedostatečně vyškolenému personálu a dysfunkci indikátorů na operátorském sále potom následoval řetěz nesprávných operátorských zásahů vedoucích ke ztrátě kontroly nad stavem reaktoru. Různé fáze o nepříznivém vývoji nehody se dostaly do místních médií včetně smyšlené informace o úmrtí dvou dětí a způsobily značný stress a paniku obyvatel.

⁷ V období 1997 až 2005 probíhala v Ústavu teorie informace a automatizace společně se Státním ústavem radiační ochrany (za podpory Státního ústavu pro jadernou bezpečnost) lokalizace evropského systému RODOS (Real-time On-line Decision Support system) na podmínky České Republiky, přičemž sada lokalizačních reportů je archivována na SÚJB.

s upřesňováním vstupů jsou periodicky prováděny předběžné odhady vývoje radiologické situace. Časová škála předhavarijní fáze se může pohybovat v rozsahu od několika málo minut do desítek hodin.

- **Časná fáze úniku („plume phase“):** Zahrnuje interval od samého počátku úniku 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 protipatření (ukrytí, jódová profylaxe, evakuace) ve skutečně nejzatíženějších oblastech. Tato analýza byla při minulých nehodách zcela nedostatečná, chyběly ověřené programové prostředky a cílená protipatření neexistovala. V dalším textu zmíníme, že 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. Přitom lze navíc upřesňovat aktuální hodnoty dalších důležitých náhodných parametrů modelu, jako jsou intenzita úniku radioaktivity, disperze vlečky v atmosféře, vypadávání aktivity na terén nebo parametry pole větru. Výsledkem našeho příspěvku je adaptace pokročilých statistických metod bayesovské filtrace popsaná v [4] a zmíněná též na konci tohoto článku.
- **Pozdější fáze nehody („post-emergency“):** Pokračuje monitorování vývoje radiologické situace a řízení ochranných intervenčních zásahů v postižené oblasti až do doby, kdy radiace se sníží na přijatelnou úroveň. To může trvat od několika týdnů do mnoha let. Z hlediska programového nasazení v odhadech dlouhodobého vývoje kontaminace v terénu jsou použity asimilační metody založené na EKF metodách (Extended Kalman Filter). Přitom apriorní odhad počáteční podmínky KF rekurze dává předchozí modelování v časně fázi (naš přístup podrobněji v [5]).

Asimilace měřených dat – cesta k realistickému modelování

V současnosti se přechází od deterministického modelování k pravděpodobnostnímu přiblížení, které může poskytnout kvalitnější pravděpodobnostní odpovědi na otázky odhadů následků. Je nutné zahrnout hlavní neurčitosti parametrů stavu majících stochastický charakter, neurčitosti plynoucí ze zjednodušené parametrizace fyzikálních procesů, z nekompletně určeného scénáře úniku, ze zjednodušeného algoritmu na konečné diskrétní výpočtové síti apod. Simulace šíření neurčitostí modelem poskytuje data nejen pro následující pravděpodobnostní hodnocení radiologických důsledků, nýbrž i pro techniky moderního statistického přístupu k modelování, založené na asimilaci modelových předpovědí s pozorováními přicházejícími z terénu. Pokročilé programové systémy modelující průniky znečištění do životního prostředí proto nově zahrnují asimilační subsystémy.

Existuje několik důležitých zdrojů informací, které mohou zlepšit odhad vývoje stavu systému 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. Dále, expertní odhady dávají doporučení na charakteristiky náhodných parametrů modelu. Významný efekt vyplyne z možnosti zpracování měření, která online přicházejí z terénu. Každý takový zdroj informací může být znám jen na určitém stupni detailnosti (například úroveň použitého algoritmu modelu, nízká resp. vyšší hustota měření v terénu, případy s nepřímými měřeními, neúplný popis kovarianční struktury chyb modelu a měření). Principem asimilace dat (DA) je slučování všech těchto zdrojů za účelem zlepšení modelových předpovědí.

Naše zkušenosti a výsledky ukázaly, že kombinace modelování a monitorování v pozdější fázi nehody [5] není tak obtížná jako v časně fázi [4]. V časně fázi je k dispozici online jen relativně málo měření. Navíc, stav se rychle mění a odhady je možné generovat pouze

při určitých zjednodušeních, ad hoc pro každý konkrétní případ. V pozdějších fázích se měření v terénu stávají významnějšími a jejich četnost roste. Změny jsou pomalejší a tak systém může být po částech linearizován. To přináší možnost použít metody klasické Kalmanovy filtrace.

Vývoj a aplikace pokročilých statistických metod DA jsou prováděny v ÚTIA AV ČR v rámci grantového projektu podporovaného GAČR s cílem zvýšit spolehlivost modelových předpovědí při mimořádných únicích škodlivin do atmosféry na základě asimilace měření přicházejících z terénu. Konkrétně, ve spolupráci s Ústavem radiační ochrany jsou testovány možnosti online připojení k Síti včasného zjištění ČR.

Ukázka aplikace techniky bayesovské filtrace v časné fázi hypotetického mimořádného úniku radioaktivity

Jsou dále rozvíjeny zkušenosti a znalosti shromážděné v oddělení adaptivních systémů v ÚTIA v oblasti bayesovských adaptivních metod. Techniky částicových filtrů (PF – Particle Filtering) se ukázaly jako vhodné pro naši úlohu z toho důvodu, že korespondují se zabudovaným základním disperzním modelem SGPM (Segmented Gaussian Plume Model). Tento model je ve své podstatě trajektoriový model. Předností PF procedury je fakt, že stavové trajektorie (třírozměrné „částice“) nejsou změněny při asimilaci příchozích měření z terénu a aktualizují se pouze jejich váhy (věrohodnosti). Tudíž historie každé „částice“ se neztrácí, a tak další krok její časové předpovědi je jednoznačný a zřejmý. PF metoda založená na sekvenčním Monte Carlo schématu je zde adaptována na odhady posteriorní hustoty pravděpodobnosti stavu spojené s tak zvaným převzorkováním (resampling), kdy „částice“ s malou věrohodností vzhledem k došlým měřením jsou postupně eliminovány.

V dalším budeme demonstrovat robustnost PF techniky na situaci, kdy v samém počátku nehody nejsou k dispozici zcela jasné a jednoznačné informace. Zkušenosti z minulých radiačních nehod ukázaly, že docházelo k informačním šokům, které mohly být případně doprovázeny přechodným ochromením komunikačních linek. V tomto smyslu nastavíme ilustrativní hypotetický scénář úniku. Uvažujme skutečnou meteorologickou situaci z 31. března 2009 pro lokalitu jaderné elektrárny Temelín. Čas hypotetického úniku je zvolen v 10.00 hod UTC. Současně byla Českým hydrometeorologickým ústavem poskytnuta skutečná meteorologická měření z této lokality pro uvažovaný termín a dále krátkodobá meteorologická předpověď podle modelu ALADIN. Z tab. 1 je zřejmé, že je zde určitý rozdíl mezi měřeními a předpovědí.

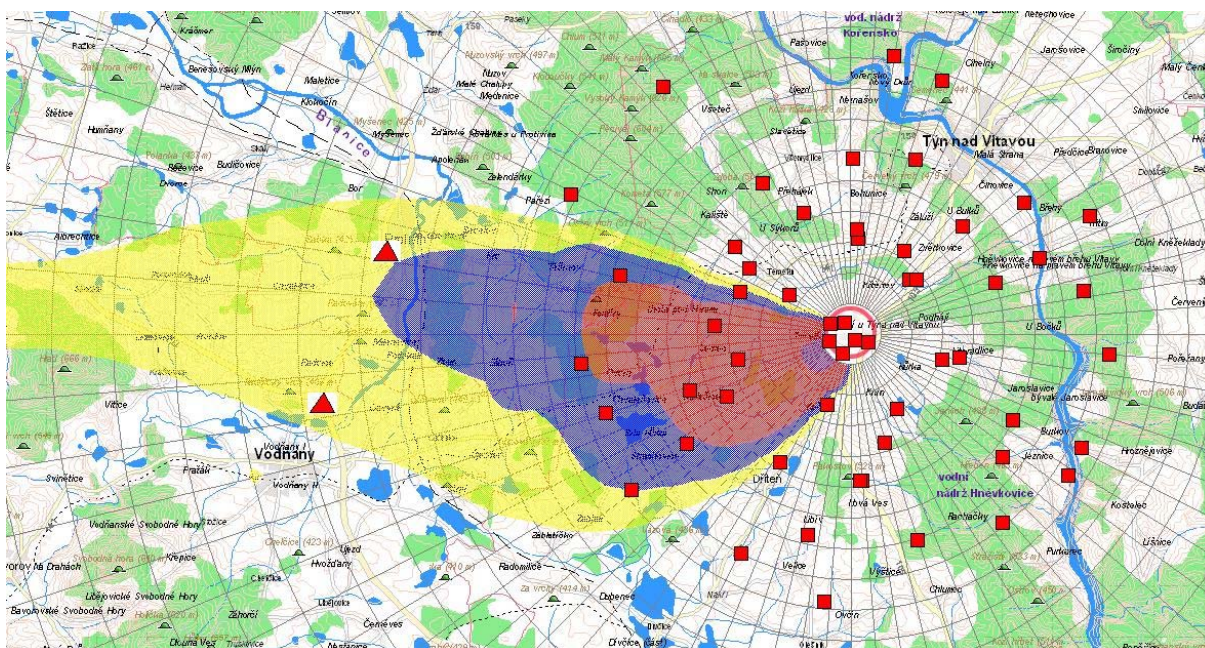
Tabulka 1: Scénář hypotetického úniku ^{131}I , krátkodobá meteorologická předpověď a reálná meteorologická měření (v závorkách) pro JE Temelín ($49^{\circ}10'48.53''\text{N} \times 14^{\circ}22'30.93''\text{E}$), časová známka 20090331-1000 UTC.

| UTC hodina | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | ... |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-----|
| únik nuklidu ^{131}I Bq/h | $5.68 \times e+14$ | $7.92 \times e+14$ | 0 | 0 | ... |
| směr větru ^{1,2)} | 95.0 (69.0) | 101.0 (65.0) | 84.0 (80.0) | 80.0 (64.0) | ... |
| rychlost větru ⁽¹⁾ | 2.0 (3.0) | 2.1 (3.3) | 1.9 (3.8) | 2.2 (4.0) | ... |
| třída atm. stabil. (Pasquill) | A | A | B | B | ... |

¹⁾ ... ve výšce 10 m; ²⁾ odkud fouká (stupně měřené od severu ve směru hodin)

Následující ex post analýza poskytuje retrospektivní pohled na takovou atypickou situaci (překvapivě ne tak ojedinělou). Vývoj situace může být od samého začátku tak variabilní, 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. Na neštěstí, analyzovaný únik předpokládáme zatížený značnými neurčitostmi, týkajícími se zdrojového členu

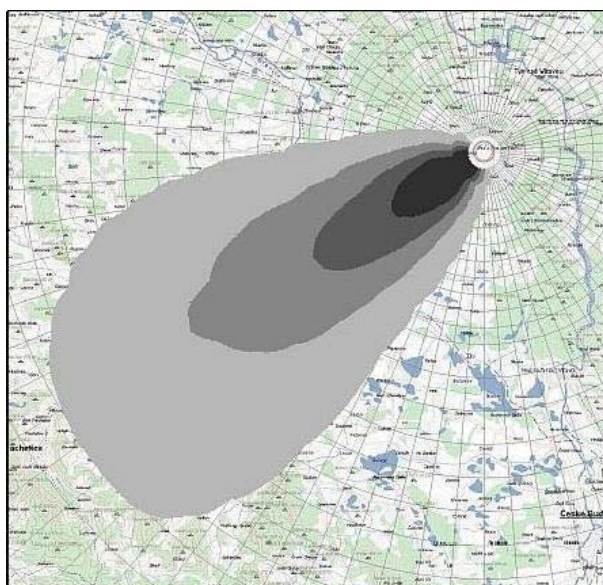
úniku, počátečního tepelného vnosu vlečky, fluktuací pole proudění, aktuálních disperzních a depozičních charakteristik apod., které zodpovědnému jedinci (týmu) neumožní rozhodnout, pokud nedostane další doplňující relevantní informace.



Obrázek 2: Deterministická předpověď zamoření terénu nuklidem ^{131}I , přesně za 3 hodiny po počátku úniku. Použita krátkodobá meteorologická předpověď podle tab. 1. Červené čtverce značí skutečné pozice čidel Radiální monitorovací sítě České Republiky (TDS systém na plotě elektrárny a II. okruh měřících stanic). 2 červené trojúhelníky: náhodně umístěné dvě mobilní stanice.

Dále spekulujme: Budeme respektovat fakt, že pokud se něco stane, potom tvar reálné trajektorie znečištění ve velmi blízkém okolí zdroje by měl s velkou pravděpodobností odpovídat měřené meteorologii pro samý počátek úniku (hodnoty v závorkách v tab. 1). Je zřejmé, že v této počáteční fázi nedostaneme dobrý souhlas s deterministickou předpovědí podle obr. 1. Zde použitá krátkodobá předpověď generovaná na poměrně řídké mřížce 9×9 km nebyla schopna zrovna pro tento časový termín věrně zachytit lokální meteorologii.

Pro zvládnutí takového komplikovaného problému navrhuje v [4] použití rekurzivní procedury bayesovského sledování trajektorií znečištění. V prvním kroku časové predikce je odhadována apriorní hustota pravděpodobnosti sledovaného výstupu (v našem případě se zajímáme o depozici ^{131}I na terénu). Hned po příchodu dalších měření z terénu se provádí odhad posteriorní hustoty pravděpodobnosti na základě asimilace apriorního odhadu s došlými měřeními. Tento druhý krok se nazývá „data update“, přičemž posteriorní hustota pravděpodobnosti se odhaduje numericky sekvenční Monte Carlo metodou částicových filtrů (PF). Numerický experiment podle Obrázku 3 byl veden jako „twin“ experiment, kdy měření byla simulována pomocí stejného modelu s další náhodnou perturbací. Konkrétně, tato „umělá“



Obrázek 3: Očekávané hodnoty posteriorní hustoty pravděpodobnosti depozice ^{131}I , přesně 2 hodiny od počátku úniku a po asimilaci první sady došlých měření s apriorní předpovědí modelu

měření jsou generována v pozicích skutečných měřicích stanic SVZ České republiky podle obr. 2 a na základě průniku s „trajektorií měření“. Tato třírozměrná trajektorie se počítá pomocí stejného modelu transportu znečištění SGPM (deterministická část našeho kódu HARP), kdy jako meteorologické vstupy se použily měřené hodnoty z tab. 1 (údaje v závorkách).

Již na základě předchozího letného pohledu lze vytušit významnou roli asimilačních technik při analýze nekompletních a nejednoznačných scénářů zatížených podstatnými neurčitostmi hodnot parametrů. V předchozím analyzovaném scénáři samotný model předpovídá kontaminaci podle obr. 2. Pokud dále vezmeme v úvahu došlá měření (zde uměle simulovaná podle měřené meteorologie), předpověď na první dvě hodiny je podstatně modifikována (obr. 3). V závislosti na volbě vzájemného poměru velikosti hodnot prvků kovariančních matic chyb modelu a chyb měření lze mapovat tendenci, kdy asimilovaný výsledek se přiklání buď k modelu nebo k měřením. Příklad z obr. 3 platí pro testy s malými chybami měření, kdy asimilovaná trajektorie se silně přiklání k simulovaným měřením.

Shrnutí

Popisované asimilační procedury založené na bayesovské filtraci umožňují zlepšit předpovědi prostorového a časového vývoje výstupů (zde to byla depozice nuklidu ^{131}I). Přitom jádrem výpočtů jsou odhady mnohorozměrného rozdělení hustot pravděpodobnosti, což současně v sobě nese přímou možnost provádět hodnocení následků na pravděpodobnostním základě. Významným rysem DA technik je dále možnost odhadu momentů důležitých náhodných parametrů modelu, jako jsou pole vektoru větru, intenzita úniku radioaktivity ze zdroje, suchá a mokrá depozice nuklidu na terénu nebo dispersní parametry. Z tohoto pohledu lze výsledky na obr. 3 interpretovat také jako konkrétní příklad pravděpodobnostního přístupu k hodnocení následků.

I když zde analyzovaný případ je pouhým zlomkem z celkové problematiky, kterou se krizové řízení musí zabývat, věříme, že rekurzivní použití částicových filtrů je schopno v reálném čase upřesňovat predikci zasažených lokalit a úrovně kontaminace v nich. Provádění intervenčních akcí ve správně zvolených oblastech zvýší efektivitu zásahových akcí a ochranu obyvatel. Mnoho otázek zůstává otevřených, například další spolupráce konstruktérů programových nástrojů se specialisty z oblasti radiačních sítí, a měly by být předmětem dalšího výzkumu. Popisované pokročilé metody statistické asimilace musí být všestranně testovány a posléze automatizovány přesto, že očekáváme, že nikdy nenastane skutečný nouzový stav a naše úvahy a testy vždy zůstanou na hypotetické úrovni s uměle simulovanými „pozorováními“.

Poděkování

Tyto práce jsou součástí grantového projektu GAČR č. 102/07/1596, který je podpořen Grantovou agenturou České republiky. Mnoho užitečných znalostí bylo též získáno při mezinárodní spolupráci v rámci lokalizace systému RODOS (Real-time On-line Decision Support system) na podmínky České republiky.

Použitá literatura

- [1] J. Smith, Nicholas A. Beresford: CHERNOBYL – Catastrophe and Consequences. Springer, Chichester, UK, 2005. ISBN 3- 540 – 2386 – 2.
- [2] J. R. A. Lakey: International Experience of Reactor Incidents and Emergencies. ERPET Training course on Off-Site Emergency Response to Nuclear Accidents. Prague, Oct. 10 – 14, 1994.
- [3] CHERNOBYL - Assessment of Radiological and Health Impacts. 2002 Update of “Chernobyl: Ten Years On”. NEA, 2002.
- [4] P. Pecha, R. Hofman, V. Šmídl: Bayesian tracking of the toxic plume spreading in the early stage of radiation accident. European Simulation and Modelling Conference ESM'2009, Leicester, UK, Oct. 26-28, 2009.
- [5] R. Hofman, P. Pecha : Data Assimilation of Model Predictions of Long-Time Evolution of ^{137}Cs Deposition on Terrain. Proceeding of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium 2008, Boston, US, 06.07.2008-11.07.2008, 2008.