

Akademie věd České republiky
Ústav teorie informace a automatizace, v.v.i.



Academy of Sciences of the Czech Republic
Institute of Information Theory and Automation

RESEARCH REPORT

**Dokumentace k Hodnocení produktu ASIM-HARP vypracovaného v rámci
projektu Bezpečnostního výzkumu VG20102013018**

P. Pecha, R. Hofman, E. Pechová

**Rozvoj deterministické verze systému HARP a její
pravděpodobnostní rozšíření**

No. 2334

Draft, listopad 2013

ÚTIA AV ČR, P.O.Box 18, 182 08 Prague, Czech Republic
Tel.: +420 286892337, Fax: +420 266052009, Url: <http://www.utia.cas.cz>,
E-mail: pecha@utia.cas.cz

Anotace

Deterministické jádro HAVAR-DET programového systému HARP je podrobně popisováno v publikacích [9], [10]. V předkládané dokumentaci popisujeme rozšíření jádra HAVAR-DET, které si vynutily hlavně práce na asimilačním subsystému ASIM. Bylo třeba zjemnit výpočetní síť v blízkých vzdálenostech od zdroje znečištění a zaměřit se na výpočty časové a prostorové závislosti dávkových příkonů z ozáření z mraku, depozice a úvazků z cesty inhalace. Dále bylo třeba hledat a zabudovat zdroje aktuálních vstupních dat modelu včetně meteorologických předpovědí na prostorové mříži. Pozornost je věnována efektivnímu způsobu interaktivního editování vstupů a zobrazování výstupních veličin.

Ve druhé části práce je popisováno pravděpodobnostní rozšíření původního deterministického jádra do oblasti hodnocení na pravděpodobnostním základě. Metodiky hodnocení vycházejí z dlouhodobějšího výzkumu v oblasti analýzy neurčitostí charakteristik vstupních parametrů do modelů šíření radionuklidů při únicích do životního prostředí a návrhu metodiky generování pravděpodobnostních charakteristik cílových veličin. Na základě rozboru charakteristik náhodných výstupů lze provádět analýzu šíření neurčitostí modelem a studie sensitivity na fluktuace vstupů. Z hlediska hlavního sledovaného cíle výzkumu, kterým je zde použití moderních asimilačních technik pro zpřesnění modelových předpovědí, je dostupnost pravděpodobnostního aparátu zcela nevyhnutelná. V jednotlivých rekurzivních krocích sekvenčních asimilačních algoritmů jsou využity požadované modifikace popisující šíření náhodných fluktuací.

Obsah

Obsah.....	1
Zkratky.....	3
1 Aktuální rozšíření deterministického jádra HAVAR-DET	5
1.1 Struktura rozšířeného systému HARP	5
1.2 Hlavní aktuálně provedená rozšíření systému HAVAR-DET.....	6
1.2.1 Rozšíření možností segmentovaného Gaussovského modelu vlečky škodlivin SGPM 7	
1.2.2 Zjemnění výpočetní sítě v komponentě HDET 42.....	9
1.2.3 Zásadní úloha meteorologických vstupů do modelů šíření znečištění	10
1.3 Desktopová a webová varianta uživatelského přístupu.	15
2 Vývoj pravděpodobnostního přístupu k hodnocení následků radiačních nehod.....	16
2.1 Rozbor zdrojů chyb Gaussova modelu vlečky	16
2.2 Šíření neurčitostí vstupních parametrů modelem životního prostředí.....	18
2.2.1 <i>Variabilita a neurčitost</i>	18
2.2.2 Metody vzorkování	19
2.2.3 Implicitní grupy neurčitostí řetězu transportu aktivity v životním prostředí	21
2.3 Popis náhodného charakteru výstupů	22
2.4 Konvenční analýza neurčitosti a základní statistiky.....	23
2.5 Návrh alternativních zobrazování při pravděpodobnostním pohledu.....	24
2.6 Pseudonáhodné PSA – Level 3 studie	27
2.7 Univerzální 2-D zobrazování charakteristik náhodných realizací při pravděpodobnostních bězích.	28
3 Příloha č. 1: Popis algoritmu vývoje radiologické situace v terénu od samého počátku úniku.....	33
3.1 Poznámky k rozšířenému algoritmu SGPM (Segmented Gaussian Plume Model) ..	33

3.2	Konverzační režim definice vstupů a zpracování výstupů	34
3.3	Depozice aktivity, dávkové příkony a dávky od aktivity deponované na zemském povrchu.....	35
3.4	Objemová aktivita radionuklidů v přízemní vrstvě vzduchu a její časový integrál pro výpočty interního ozáření z inhalační cesty a ozáření z mraku.....	37
3.4.1	Cesta inhalace.....	37
3.4.2	Externí ozáření z mraku	39
3.5	Simulace protiopatření.....	41
3.5.1	Jódová profylaxe	41
3.5.2	Ukrytí	42
3.5.3	Evakuace	44
4	Příloha č. 2: TWIN experiment: Praktické návody pro scénář přípravy „simulovaných měření“ TWIN.OUT	45
5	Příloha č. 3: Generování náhodných realizací matic depozičních příkonů v projektu Balnahod_2013.....	51
6	Literatura	52

Zkratky

ADM	Atmosférický disperzní model
ASIM	Asimilační subsystém (zpřesňování modelových předpovědí kontaminace okolí jaderných zařízení s využitím měření přicházejících z terénu)
FCM	Ingesční model (Food Chain Model)
HARP	(HAzardous Radioactivity Propagation) – aktuální hlavní programový systém pro odhady šíření radioaktivity životním prostředím. Tvořen deterministickým jádrem HAVAR-DET a návazným pravděpodobnostním rozhraním se způsobilostí generovat vstupy do asimilačního subsystému ASIM
HDET 35	SW komponenta HARP: výpočetní kód pro deterministické odhady radiologických důsledků na populaci při úniku radioaktivity do životního prostředí (modelování disperze pomocí algoritmu PRIMO nebo SGPM - síť s rozdělením na 35 radiálních pásem do 100 km od zdroje). Lokalizováno na jaderná zařízení EDU a ETE
HDET 42	SW komponenta HARP: výpočetní kód navazující na HDET 35 pro deterministické odhady časového a prostorového vývoje radiologické situace na terénu (algoritmus SGPM - jemnější výpočtová síť s rozdělením na 42 radiálních pásem umožňuje i analýzy v časné fázi a blízko zdroje úniku). Lokalizováno na jaderná zařízení EDU a ETE
HAVAR	Původní programový systém pro odhady radiologických důsledků na populaci při úniku radioaktivity (modelování disperze pomocí základního přímočarého gaussovského modelu šíření vlečky znečištění - vývojový předchůdce kódu HAVAR-DET)
HAVAR-DET	Programový systém pro deterministické odhady radiologických důsledků na populaci s možností alternativně zahrnout verzi HDET 35 (s algoritmy PRIMO nebo SGPM) nebo HDET 42 (s algoritmem SGPM). Z hlediska pravděpodobnostní verze HARP a asimilačního systému ASIM jde o jádro, které je mnohonásobně vyvoláváno pro jednotlivé realizace náhodných vstupů
NWP	(Numerical Weather Prediction) Numerické předpovědní modely
PRIMO	Algoritmus přímočarého šíření příměsí popsany modelem přímočarého šíření gaussovské vlečky řešeného numericky
SGPM	Algoritmus segmentovaného modelu stáčení vlečky podle dynamiky úniku synchronizované s proměnnou meteorologií (hodinové předpovědi).

Poznámka: HDET 35 počítá radiologické důsledky „za plotem JE“ od vzdálenosti >1 km, vyvinut pro výpočty v Bezpečnostních zprávách pro analýzu radiologických důsledků projektových nehod. Rozvoj asimilačních technik si vynutil zahrnout i oblast blízko zdroje úniku. Proto

byla vyvinuta komponenta HDET 42, kdy byla zjemněna výpočetní síť v blízkém okolí s 42 radiálními pásmy od 50 m až do 100 km od zdroje znečištění.

1 Aktuální rozšíření deterministického jádra HAVAR-DET

1.1 Struktura rozšířeného systému HARP

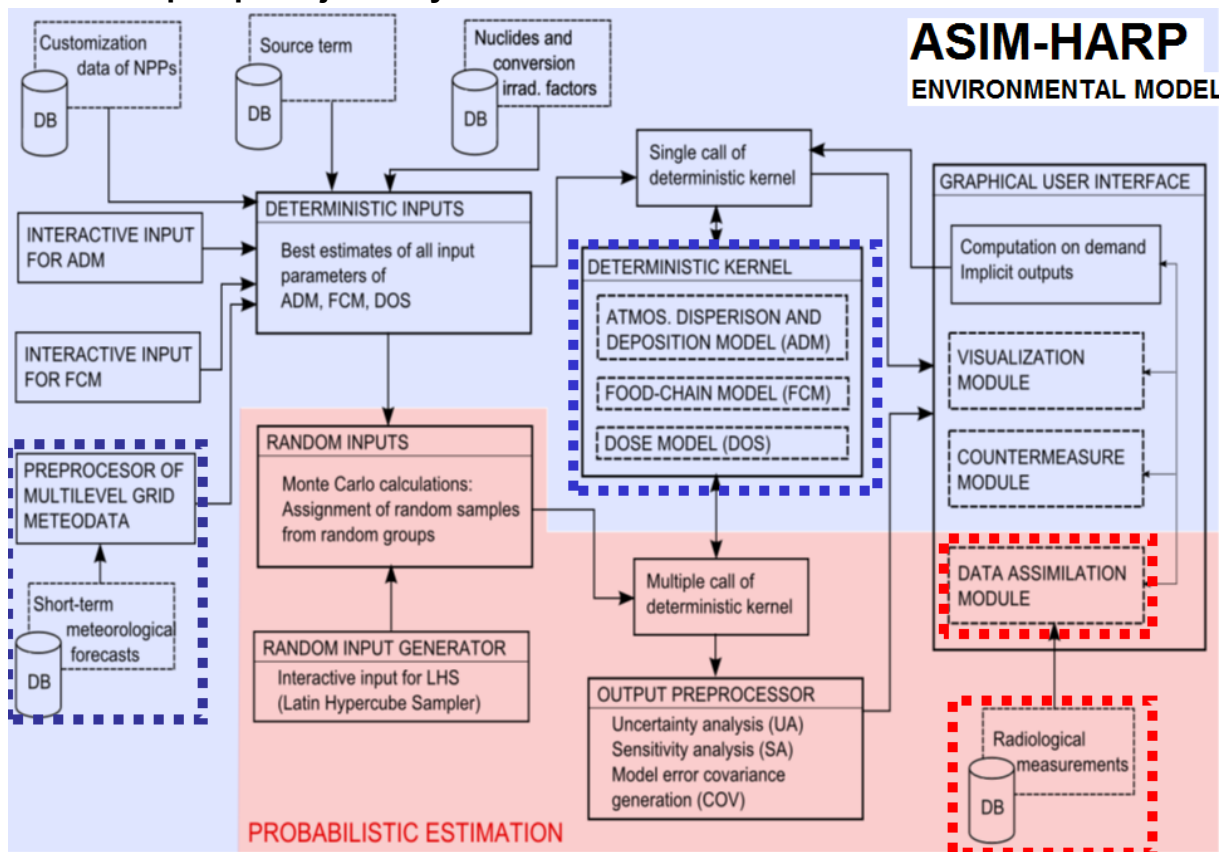
Environmentální systém HARP je výsledkem víceletého vývoje v oblasti analýzy šíření radioaktivity životním prostředím a jeho deterministické jádro HAVAR-DET bylo podrobena v roce 2010 hodnotící proceduře Komisi č. 6. Od té doby byla provedena rozšíření základního deterministického jádra tak, aby bylo možno generovat dostatečně informativní vstupy pro navazující modul ASIM. Vycházíme tedy ze sady dokumentace hodnocené v roce 2011, konkrétně:

- (i) Metodika[9]
- (ii) Uživatelský manuál [10]
- (iii) Aplikace v oblasti jaderné bezpečnosti (tuto původní studii z roku 2011 nyní nahrazuje nová dokumentace [2])

V současné době se pro proceduru Hodnocení programového produktu ASIM-HARP předkládá nová dokumentace [1] (použité pokročilé asimilační metodiky a jejich aplikace v časně fázi) a [2] (aktualizovaná Validace a aplikace v oblasti posuzování dopadu havárií). Jako třetí nová dokumentace je předkládán tento report, popisující aktuální rozvoj deterministické verze HAVAR-DET systému HARP a její pravděpodobnostní rozšíření.

Deterministické jádro HAVAR-DET je na následujícím schématu v modrém rámečku s označením DETERMINISTIC KERNEL. Jsou vyznačeny nezbytné databáze a interaktivní vstupní a výstupní procedury. Červeně je vyznačena pravděpodobnostní část spolupracující jak se základním deterministickým jádrem tak podporující procedury asimilačních algoritmů (orámováno červenou přerušovanou čarou).

Schéma spolupracujících systémů ASIM a HARP



1.2 Hlavní aktuálně provedená rozšíření systému HAVAR-DET

Tento předkládaný report rozšiřuje jednak původní metodiku [9] deterministického jádra HAVAR-DET a dále nabízí nové možnosti a uživatelské funkce. V oblasti metodické jmenujeme hlavně:

- Jemnější polární výpočtová mříž (42 radiálních pásem do 100 km od JE, 80 úhlových sektorů). Přepracovány jak interaktivní vstupy ADM a FCM tak zobrazovací rozhraní.
- Implementace mřížových meteorologických dat pro oblast 200 x 200 km kolem JETE i JEDU. Riziko avizovaných možných potíží s přístupem k těmto datům bylo řešeno vypracováním alternativního meteorologického subsystému (MEDARD versus ČHMÚ).
- Byl rozšířen algoritmus segmentovaného gaussovského modelu SGPM jak pro účely mnohasegmentových úniků tak pro účely sekvenčních asimilačních běhů v časně fázi úniku.
- Další drobné změny.

V oblasti uživatelské podpory zmíníme dále podrobněji:

- Nové moduly pro interaktivní zadávání vstupních parametrů jak disperzního tak ingesčního modelu.
- Uživatelsky snadné subsystémy pro 1-D a 2-D zobrazení deterministických i náhodných výstupů. Možnost 2-D zobrazení vývoje radiologických dopadů úniků na okolí.
- Aparát pro vyhodnocování statistik náhodných výstupů.
- Sada pomocných rutin pro nejrůznější operace s 2-D maticemi výsledků.
- V přílohách jsou uvedeny některé návody pro uživatele pro práci s desktopovou aplikací.

K uvedené dokumentaci předkládáme desítky výzkumných reportů, příspěvků na konferencích a publikace v odborných časopisech. Všechny tyto publikace jsou k dispozici k online prohlížení na:

- 1) <http://havarrp.utia.cas.cz/harp/> - zde vše včetně online přístupu k jednotlivým dokumentům
- 2) asim.utia.cas.cz - výsledky dosažené jmenovitě pro oblast asimilace ASIM v rámci BV MV projektu č. VG20102013018.

1.2.1 Rozšíření možností segmentovaného Gaussovského modelu vlečky škodlivin SGPM

V algoritmu SGPM je skutečná dynamika úniku je nahrazena rozdělením do *IINT* segmentů úniku. $IINT = 1$ až $NINT$, původně s omezením $NINT \leq 5$ nyní $NINT \leq 12$. Celková doba trvání úniku MHOD (suma času trvání segmentů) je maximálně 72 hodin. V každém segmentu *IINT* je provedena homogenizace (s konstantní intenzitou úniku pro celou dobu trvání segmentu) a v každém z nich jsou určeny po částech konstantní charakteristiky unikajících vzdušin. Proveďte se synchronizace úniku s počasím spočívající ve schématu, kdy ekvivalentní úniky jsou přepočítány na fiktivní hodinové segmenty. Každý takový hodinový segment je modelován pro každý nuklid ve všech jeho následujících hodinových fázích jako gaussovská hodinová kapka. Pro každou hodinu od počátku úniku jsou k dispozici hodinové změny povětrnostních podmínek. ČHMÚ každých 12 hodin (nověji 6 hodin) poskytuje krátkodobé lokální předpovědi na 48 hodin (hodinové hodnoty pro směr větru, rychlost větru, kategorii stability atmosféry, srážky a výšku směšovací vrstvy). Nová verze HAVAR-DET může na základě volby používat pro rozšířenou polární výpočetní síť gridové meteorologické předpovědi v oblasti 160 x 160 kolem ETE nebo EDU s rozlišením 9 x 9 km. V roce 2013 byl získán alternativní dodavatel povětrnostních dat (povoluje stahovat data vždy na specifickou žádost, nikoliv rutinně) s rozlišením 3 x 3 km (systém MEDARD z ÚI AVČR).

Modelování nyní probíhá s respektováním předpovídané 2-D meteorologie (diskrétní pro výpočetní dlaždici s přepočtem střední rychlosti vlečky v efektivní výšce pomocí mocninového výrazu). Každý hodinový segment („gaussovská kapka“) je modelován samostatně. V dalších hodinách je určováno jeho unášení novou meteorologií, přičemž je zahrnuto ochuzování mraku a depozice aktivity na zemském povrchu v důsledku suché a

mokr  depozice a radioaktivního rozpadu. Jsou samostatn  napo it ny dopady pohybu každého segmentu v každé jeho hodinov  fázi (p zemn  objemov  aktivita po ka d  hodině, její  asov  integrál za každou hodinu, depozice na povrchu za konkr tn  hodinu a p slu n y hodinov   asov  integrál depozice). Procedura se opakuje pro ka d y nuklid a nakonec se vše s it . Zd nliv  jde o t  kop dn y postup, kdy se uchovává velké množství mezivýsledků ve formě matic (42 radiálních vzdáleností \times 80 úhlových směrů). Tyto výsledky však interaktivn  zpracovává nov y zobrazovací subsystém (podrobn  popis v samostatn m dopl nku [D1], stru n  na Obr.1), kter y umožňuje zadat „plovoucí“ referenční hodnotu času T_{REF} v hodinách pro zobrazení. Lze zvolit, zda budou pro zvolenou hodinu od po  atku úniku T_{REF} vykresleny prostorové průběhy výstupů nebo pro daný bod v prostoru se ukáže  asov  průběh od po  atku úniku do T_{REF} . Tato funkce má také z sadn  význam pro pou it  sekven n  asimilační techniky pro generování „umělých“ m ren  p  TWIN experimentech, kdy výstupní veli ninou se vol  d vkov  p ikon (MRAK + DEPO) (P lloha2 a v dopl nku [D1]). K libovoln  zvolen  hodině od po  atku úniku T_{REF} lze takto získat okam it  obraz o vývoji radiologick  situace na terénu. Poznamenejme, že pro obs hlej  směsi nuklidů lze ur it m způsobem n kter  nuklidy sdružit do skupin s podobnými vlastnostmi vzhledem k atmosf rick  disperzi.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
d:\2012_UTIA_SUR0\Zobrazeni_Uysledku_DUK0>cd src
D:\2012_UTIA_SUR0\Zobrazeni_Uysledku_DUK0\src>python data_parser.py
Nacitam data...
Cas zpracovani: 0.0150001049042
Hotovo!

=====
==== VOLBA REFERENCNIHO CASU
zadejte T_<kuca> v hodinach <1-...>: 4

zvolte vekovou kupinu:
0 - kojenci
1 - dospeli
pozadovana vekova skupina: 1

=====
==== TYP VYKRESLENI
0 - Prubehy v case pro dany bod od pocatku po cas 4 hodin
1 - Prostorove zobrazeni pro fixni cas 4 hodin <2D, po paprsku>
volba: 1

=====
==== ZOBRAEZNI PRO FIXNI CAS:

=====
==== I N H A L A C E
10 - Casovy integral koncentrace aktivity v prizemni vrstve az po cas 4 hodin
0 - Prikon efektivni davky z inhalace pro dospeli v case 4 hodin
2 - Uvazky davky z inhalace od pocatku uniku az po cas 4 hodin
==== M R A K
3 - Prikon efektivni davky z mraku pro dospeli v case 4 hodin
5 - Davky z mraku od pocatku uniku az po cas 4 hodin
==== D E P O Z I C E
61 - Celkova depozice do od zacatku do casu 4 hodin
6 - Davkovy prikone z depozice v case 4 hodin
7 - Davky z depozice od pocatku uniku az po cas 4 hodin
=====
80 - Prikon ze vsech cest <INHALACE + MRAK + DEPO> v case 4 hodin
81 - Davka ze vsech cest <INHALACE + MRAK + DEPO> od zacatku do casu 4 hodin
=====
85 - Davkovy prikone <MRAK + DEPO>
86 - Uystup ruzice TWIN.OUT <MRAK + DEPO> po hodinach od zacatku do casu 4
=====
9 - Konec
volba:

```

Obr.1: Interaktivní panel pro skládání segmentovaných výstupů do požadovaných výstupních radiologických veličin.

Obr.1 nabízí rozmanité užitečné funkce. Například volby 85 a 86 jsou zaměřeny přímo na interaktivní podporu TWIN experimentu pro rekurzivní minimalizační asimilační techniku (podrobný popis je v samostatném doplňku [D1]). Na tento zobrazovací modul navazuje modul protiopatření (algoritmy jsou zmíněny v Příloze 1, vlastní popis a ovládání modulu protiopatření uvádíme v samostatném doplňku [D1]).

Deterministické jádro HAVAR-DET v platné modifikaci HDET 35 popsané ve výchozí verzi z roku 2011 [9, 10] lze použít samostatně pro plnohodnotnou analýzu šíření radioaktivního znečištění různých hypotetických scénářů úniku radioaktivity. Například pro účely BZ, EIA studie, studie citlivosti na fluktuace vstupních parametrů, úniky při nejhorších meteorologických podmínkách apod. Výsledky průběžné validace modelu dokumentuje předkládaná studie [2].

1.2.2 Zjemnění výpočetní sítě v komponentě HDET 42

HDET 35 počítá radiologické důsledky „za plotem JE“ od vzdálenosti >1 km, vyvinut pro výpočty v Bezpečnostních zprávách pro analýzu radiologických důsledků projektových nehod. Rozvoj asimilačních technik si vynutil zahrnout i oblast blízko zdroje úniku. Proto byla vyvinuta komponenta HDET 42, kdy byla zjemněna výpočetní síť v blízkém okolí s 42 radiálními pásmy od 50 m až do 100 km od zdroje znečištění:

Radiální pásma (m):

HDET 42	HDET 35
50.00	
150.00	
250.00	
400.00	
600.00	500.00
850.00	
1200.00	1500.00
1650.00	
2200.00	2500.00
2850.00	3500.00
3600.00	
4500.00	4500.00
5500.00	5500.00
6500.00	6500.00
7500.00	7500.00
8500.00	8500.00
9500.00	9500.00
10500.00	10500.00
11500.00	11500.00
13000.00	13000.00
15000.00	15000.00
17000.00	17000.00
19000.00	19000.00
21000.00	21000.00
23000.00	23000.00
25000.00	25000.00

27000.00	27000.00
29000.00	29000.00
32500.00	32500.00
37500.00	37500.00
42500.00	42500.00
47500.00	47500.00
52500.00	52500.00
57500.00	57500.00
62500.00	62500.00
67500.00	67500.00
72500.00	72500.00
77500.00	77500.00
82500.00	82500.00
87500.00	87500.00
92500.00	92500.00
97500.00	97500.00

Výpočet výstupních veličin se provádí v uzlech polární sítě, která má 35 resp. 42 radiálních pásem a 80 uhlových sektorů. Každá radiologická veličina se generuje v matici (zavedeme termín „růžice“) 35 resp. 42 × 80) a takto vstupuje do zobrazovacího rozhraní. Zobrazování výsledků v HDET 35 zůstává beze změny a je podrobně popsáno v dokumentaci [10]. Zjemnění výpočetní sítě v blízké oblasti bylo nezbytné pro asimilaci modelu s měřeními v časné fázi nehody, kdy rozhodující úlohu mají již existující senzory okruhu teledozimetrického systému ležící ve vzdálenostech do 500 metrů od možného zdroje úniku. Nutnost realistického modelování dávkových příkonů v pozicích senzorů je zřejmá.

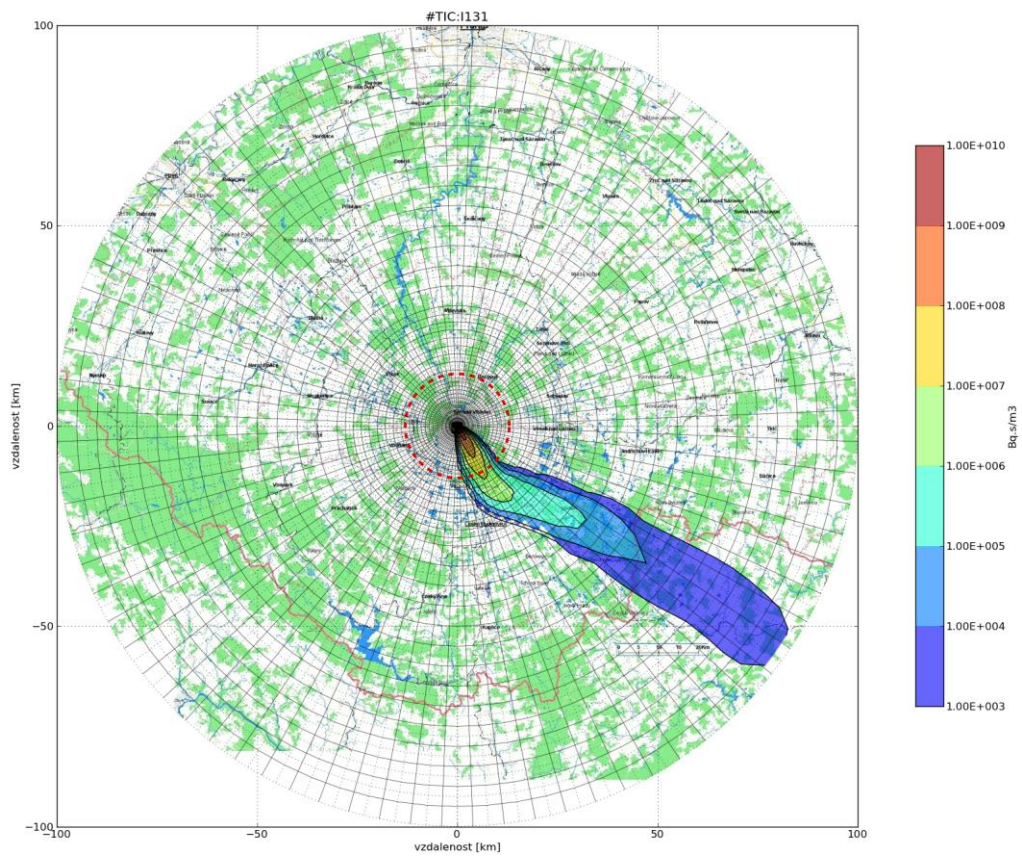
Zdánlivě snadná úprava výpočtové sítě má dopad v oblasti přidružených databází. Příslušně musejí být rozšířeny i další struktury jako gridová data orografická, demografická a nový formát mřížových meteorologických předpovědí. S tímto byly spojeny další aktualizací úkoly, jako je upgrade populačních dat na základě nového sčítání obyvatelstva z roku 2011 nebo implementace alternativního modelu MEDARD poskytujícím předpovědi počasí na jemnější prostorové mříži.

1.2.3 Zásadní úloha meteorologických vstupů do modelů šíření znečištění

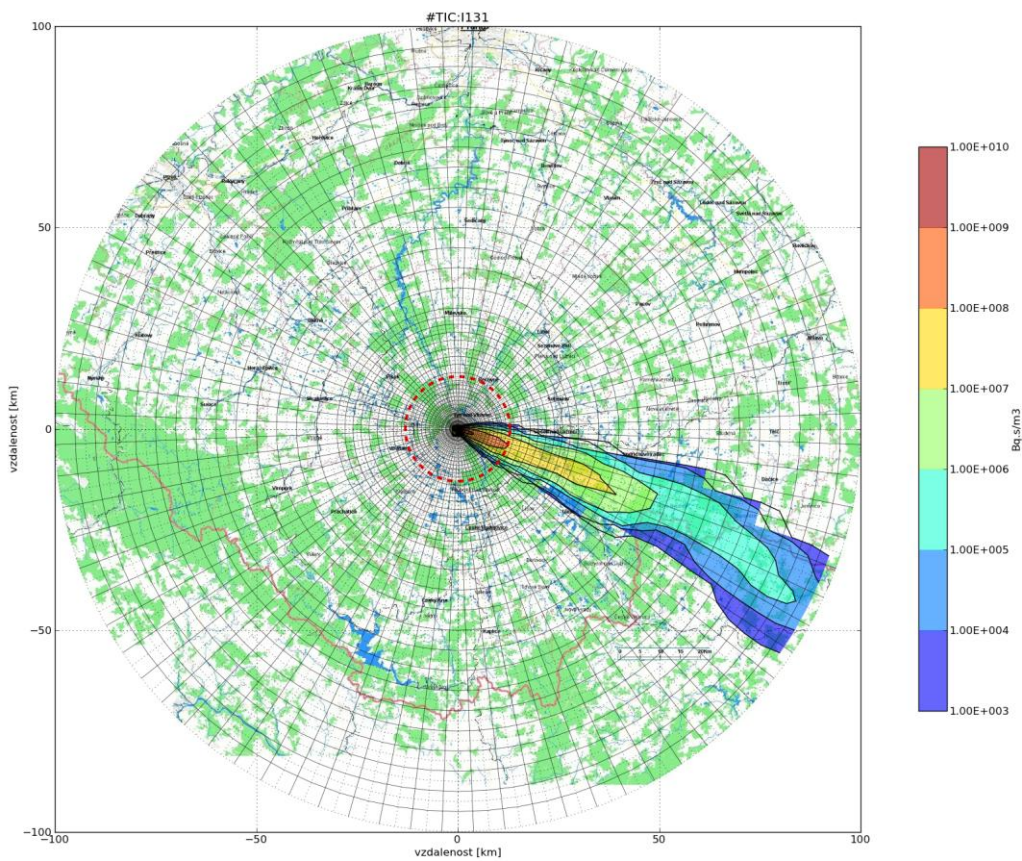
Do matematického modelu znečištění vstupují údaje poskytované meteorologickou službou, jejichž kvalita hraje rozhodující úlohu. V současnosti se jedná o reálná měření charakteristik počasí v terénu a dále pak předpovědi odvozené z NWP (Numerical Weather Predictions) modelů. Zabýváme se modelováním do zhruba 100 kilometrů od zdroje znečištění, proto využíváme existující předpovědi jednak pro lokalitu jaderného zařízení (bodové předpovědi) podle modelu ALADIN a jednak 3-D předpovědi pro větší okolí elektráren EDU a ETE (zhruba 200 × 200 km) ve formátu HIRLAM.

V práci [11] jsou podrobně popsány formáty meteorologických vstupů do kódu HARP. Zde popisujeme používané NWP modely MEDARD a ALADIN z hlediska vstupů a výstupů, zahrnutí orografie, typu zemského povrchu a také je zmíněna úloha asimilace meteorologických měření z terénu na postupné upřesňování předpovědi vývoje povětrnostní situace. V poslední době došlo ve formátech MEDARD k dalšímu vývoji, kdy pravoúhlá

výpočetní mříž byla zjemněna z původních 9×9 km na 3×3 km). Je provedeno srovnání (podrobně v [11]) simulace radioaktivního znečištění pro únik ^{137}Cs , alternativně s předpovědí podle ALADIN (s konverzí do HIRLAM formátu). Na obrázcích 2a,b je běžný povětrnostní scénář s rychlostmi větru řádově jednotky metrů za sekundu. Tendence v průbězích je celkem zachována, nicméně při bližším pohledu se určité rozdíly ukázaly.



Obr. 2a: TIC ^{137}Cs s předpovědí HIRLAM (11 April 11 0000 UTC)

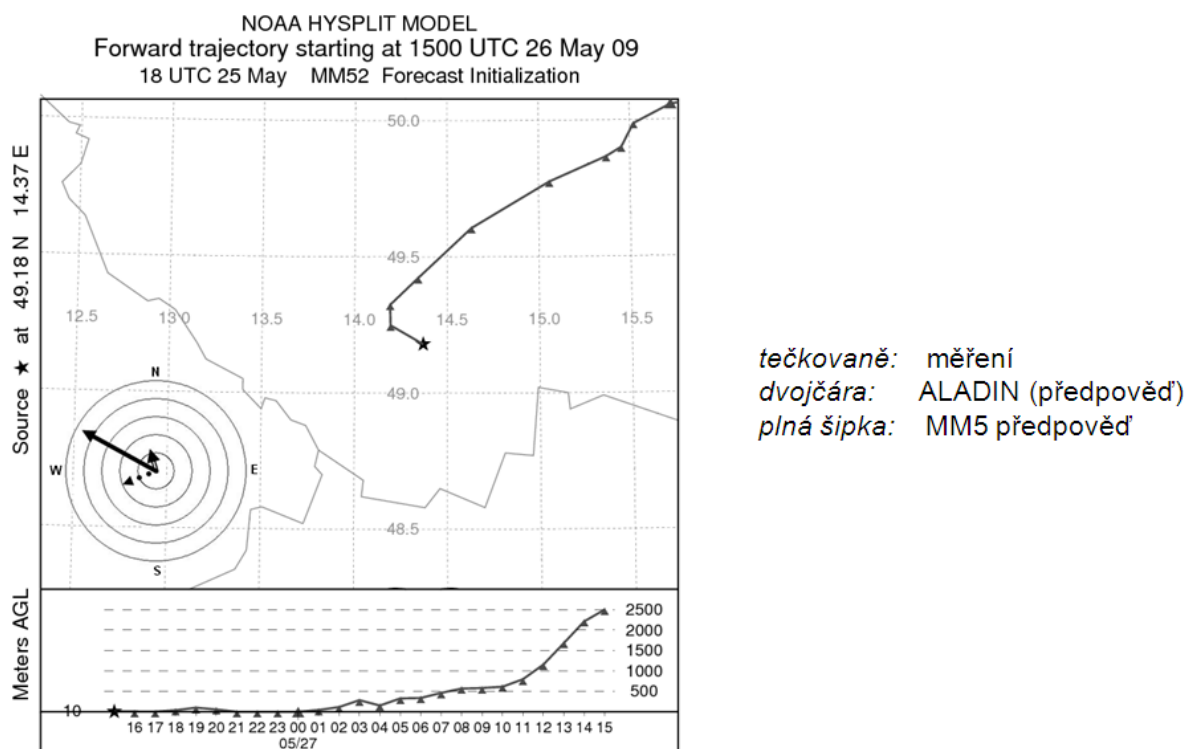


Obr. 2b: TIC ^{137}Cs s předpovědí MEDARD (11 April 11 0000 UTC).

Podrobnější zkoumání diferencí meteorologické předpovědi různých modelů, navíc ještě se srovnáním se situací měřenou v místě úniku pro stejný termín, jsme prováděli již v práci [14]. Odtud je převzat následující Obr. 3. Byl použit mezinárodní kód HYSPLIT pro analýzu šíření znečištění s mesoscale modelem počasí MM5.

HYSPLIT – HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model

MM5 – PSU/NCAR mesoscale model (Pennsylvania State Univ, National Center for atmospheric research)



Obr. 3: Stopa deponovaného ^{131}I na terénu přesně po 5. hodině šíření podle modelu HYSPLIT s daty MM5. Hypotetický únik z JE Temelín.

Pro tentýž časový termín 26 May 09 1500 UTC byly v archivu nalezeny směr a rychlost větru z meteorologických měření na lokalitě. Směr větru předpovídaný pro zvolený čas úniku modely ALADIN (dvojčára) a MM5 (plná šipka) byly srovnány s naměřenou veličinou. Obecně lze konstatovat, že dochází k nezanedbatelným odchylkám. Ve velké většině se sice dosahuje dobré shody, my jsme však záměrně pro demonstrační účely v archivu vyhledali svým způsobem abnormální případ (měnící se povětrnostní situace s oblastmi nízkých rychlostí větru). Pokud se týká předpovědí jednotlivých modelů, je třeba si uvědomit, že model poskytuje pro danou lokalitu určitou střední hodnotu na modelové dlaždici (její velikost 9×9 km je poněkud velká).

Nicméně z tohoto faktu plyne **zásadní poučení pro asimilační postupy**: Základní pravidlem asimilačních postupů je nutnost vzít v úvahu všechny dostupné informace včetně expertních znalostí a zkušeností. Z tohoto hlediska jednou ze zásadních relevantních údajů jsou věrohodná reálná meteorologická měření na lokalitě vztažená k okamžiku úniku. Toto má

zcela zásadní význam v sekvenčních asimilačních postupech, kdy v prvním časovém kroku je nezbytné přiřadit prioritu naměřeným hodnotám směru a hlavně rychlosti větru ve srovnání s interpolovanými hodnotami na celé dlaždici 9×9 km (podrobněji v [1], Appendix A, B).

1.3 Desktopová a webová varianta uživatelského přístupu.

Kromě standardní desktopové verze (viz též shrnutí v Příloze 2) je produkt vypracován též ve formě uživatelsky snadné webové aplikace. Základní desktopový přístup umožňuje spouštět úlohy a zobrazovat výstupy z prostředí WINDOWS, tak jak je popsáno ve shora zmíněných reportech a průvodcích. Zvláště pak pro účely výcviku a výuky je nabízen alternativní přístup přes web. Aplikace umožňuje provádět základní běhy deterministického jádra systému HARP v běžném webovém prohlížeči

<https://dss.utia.cas.cz>

Systém je implementován jako klient-server aplikace. Uživatel k aplikaci přistupuje přes internet pomocí svého uživatelského účtu. Simulační běhy modelu konfiguruje z webových stránek k tomu určených. Po odeslání zadání na server zajistí služba plánování úkolů (task manager) provedení výpočtu v distribuovaném prostředí. Po jeho skončení si uživatel může výsledky opět prohlédnout ve svém účtu, třeba jako průhledné vrstvy na pozadí Google Maps. Dostatečný výkon pro tyto výpočty zajišťuje distribuované výpočetní prostředí vyvinuté na míru. Jeho hlavními komponentami jsou:

- Webový server poskytující uživatelské rozhraní (webové stránky - zadávání výpočtů a prohlížení výstupů),
- Databáze pro ukládání dat (uživatelské účty, výpočetní data atd.),
- Plánovač úloh - systém zajišťující distribuci úloh mezi výpočetní počítače a sběr výsledků.

Výpočty jsou prováděny distribuovaně na běžných PC registrovaných do systému, tzv. "workerech". Aby nějaké PC mohlo být součástí systému, musí splňovat pouze tu podmínku, že je připojeno na internet. Workery s plánovačem úloh komunikují pomocí běžného HTTP protokolu (request-response, kdy složitější objekty ve formátu JSON jsou serializovány a komprimovány pro přenos). Jako workera lze použít i PC bez vlastní IP adresy, např. PC v lokální síti za firewallem, protože centrální server je pasivní a veškerá komunikace je iniciována ze strany workera. To znamená, že jako worker může být použito PC připojené k internetu kdekoli na světě. Toto řešení je robustní, při výpadku částí workerů se úkoly rozdělí mezi ostatní. Dále získáváme dobrou škálovatelnost. Při požadavku na práci mnoha uživatelů zároveň, např. výuka studentů v učebně, se jednoduše pustí více workerů pro daný úkol.

Při vývoji uživatelského rozhraní je kladen důraz na uživatelskou přívětivost, jako např. plná validace správnosti vstupů (viz obrázky a detailní popis na <https://dss.utia.cas.cz/contact/>). Aplikace je optimalizována také pro použití na tabletech a podobných zařízeních.

2 Vývoj pravděpodobnostního přístupu k hodnocení následků radiačních nehod

Spolu s vývojem deterministického jádra HAVAR-DET kódu HARP probíhala analýza možností zahrnout neurčitosti nejrůznějšího původu vstupující do hodnocení radiologických důsledků radiačních nehod. V roce 2003 byly zahájeny první kroky výzkumu v této oblasti. V práci [3] jsou vyšetřovány charakteristiky neurčitostí vstupních parametrů do modelů šíření radionuklidů při únicích do životního prostředí. V práci [4] se potom přikročilo k návrhu metodiky vyhodnocování pravděpodobnostních charakteristik cílových veličin v modelech šíření radionuklidů životním prostředím. Samotná koncepce návrhu systému HARP je konstruována se záměrem umožnit i v deterministické verzi HAVAR-DET rychlé odhady citlivosti výstupů na fluktuacích důležitých vstupů.

Pravděpodobnostní verze HARP se zaměřuje na neurčitosti vstupů majících stochastický charakter. Pravděpodobnostní modelování spočívá v mnohonásobném vyvolávání deterministického jádra HAVAR-DET pro jednotlivé konkrétní realizace z množiny náhodných vstupů, čímž jsou generovány jednotlivé náhodné výstupní trajektorie (matice výsledků na polární síti) zvolené z celé škály nabízených radiologických výstupů). Lze volit prakticky libovolnou výstupní charakteristiku a z jejích realizací pomocí statistického aparátu generovat náhodné charakteristiky (modelovat distribuční funkci, počítat kumulativní distribuční funkci CDF, komplementární CCDF, kvantily apod.). Takto lze provádět analýzu neurčitosti a citlivostní studie. Uživatel dostává komplexnější informace beroucí v úvahu neurčitosti modelu i případnou špatně podmíněnou definici scénáře úniku.

2.1 Rozbor zdrojů chyb Gaussova modelu vlečky

Vzhledem k složitosti realistického popisu šíření radioaktivních látek v atmosféře vycházejí matematické modely transportu a disperse látek v atmosféře z určitých zjednodušujících předpokladů a konstrukcí. Neexistuje žádný univerzální model. Matematické modely, od jednoduchých až po velice složité, jsou určeny vždy pro určité typy situací. Každý model má určité přednosti a určité nedostatky. Nejčastěji používaný model je Gaussův model disperse látek v atmosféře. Tento model v jeho zpřesněné segmentované verzi je použit i pro výpočty v programovém systému HARP. Gaussův model je odvozen za předpokladu kontinuálního vznosného mraku z bodového zdroje šířícího se nad rovinným terénem. Přesnost předpovědi (tj. výsledných výpočtů) ovlivňují svými neurčitostmi následující vstupní parametry a předpoklady modelu:

- Správné stanovení horizontálních a vertikálních dispersních koeficientů
- Realistické stanovení vznosu mraku a efektivní výšky úniku
- Použití expertních znalostí a metod stanovení kategorií stability atmosféry
- Přesnost stanovení rychlosti větru
- Stanovení profilu rychlosti větru v závislosti na výšce
- Stanovení směšovací výšky

- Doba průměrování přízemní objemové aktivity (zda-li jsou to např. 10-ti minutové, 30-ti minutové nebo jedno hodinové průměry)
- Původní předpoklady konstantních meteorologických podmínek po celou dobu úniku a celou dobu advekce mraku nad vyhodnocovanou lokalitou požadovaly:
 - Konstantní směr a rychlost větru
 - Konstantní atmosférická turbulence
 - Komponenta, která dosáhne země je plně odrážena zpět do mraku
 - Neuvažuje se depozice
 - Neuvažují se žádné chemické reakce
 - Uvažují se jen vertikální a horizontální dispersní koeficienty kolmé na směr šíření – neuvažuje se disperse ve směru šíření
 - Předpokládá se, že disperse látek v atmosféře je náhodný proces, který může být popsán Gaussovou distribucí
 - Požadováno ocenění závislosti dispersních koeficientů v závislosti na drsnosti terénu
 Za těchto předpokladů lze odvodit rovnici přímočarého šíření vlečky unášející nereaktivní škodliviny.

Splnění všech těchto předpokladů vyžaduje značně idealizované podmínky. V předchozích vývojových fázích modelu HARP byla provedena řada citlivostních analýz Gaussova dispersního modelu resp. jeho segmentované verze. Byla použita Briggsova rovnice pro tepelný vznos mraku, mocinná závislost pro stanovení rychlosti větru (z přízemní rychlosti větru) v místě úniku a ve výšce, do které mrak vystoupá, přízemní objemové koncentrace byly počítány jako hodinové průměry.

Na základě rozsáhlých testů se ukazuje, že zvýšení tepelného vnosu mraku snižuje přízemní objemové koncentrace především na menších vzdálenostech. Objemové koncentrace ve směru šíření mraku je třeba chápat u Gaussova modelu jako statistické hodnoty, které by bylo možné získat vyhodnocením velkého množství sledovaných vzorků. Okamžité hodnoty objemových koncentrací jsou ovlivňovány krátkodobými změnami směru větru a meandrováním postupujícího mraku způsobeného různými terénními a teplotními vlivy krajiny. S klesající průměrnou rychlostí větru se vliv meandrování zvyšuje a snižují se průměrné přízemní objemové koncentrace ve stopě mraku. Rozptyl hodnot daný dispersním modelem je jen jednou částí z mnoha dalších vlivů na rozptyl výsledných hodnot při výpočtu radiologických následků. Dalšími vlivy jsou:

- Nepřesnosti ve stanovení zdrojového členu tj.:
 - Inventáře radionuklidů
 - Radionuklidové složení
 - Velikost uniklých frakcí inventáře pro jednotlivé radionuklidy
 - Čas mezi odstavením reaktoru a okamžikem úniku
 - Časový průběh úniku
 - Výška úniku
 - Tepelná vydatnost úniku
- Nepřesnosti ve stanovení suché a mokré depozice
 - Závislost na velikosti aerosolů

- Závislost na drsnosti povrchu
- Závislost na intenzitě a typu atmosférických srážek
- Výpočet externí expozice z oblaku – korekce na konečné rozměry mraku
- Výpočet externí expozice z povrchu – stínění vzrostlou vegetací a nerovnostmi povrchu
- Výpočet interní expozice z inhalace – rozptyl v hodnotách objemu inhalovaného vzduchu

Samostatnou rozsáhlou kapitolou je analýza šíření neurčitostí přes potravinový řetězec. Tomu se obsáhle věnovala studie [5].

2.2 Šíření neurčitostí vstupních parametrů modelem životního prostředí

První souhrnnou publikací pojednávající o trendu přechodu od deterministických odhadů k pravděpodobnostnímu hodnocení je v práci [7]. V práci [3] jsou vyšetřovány charakteristiky neurčitostí vstupních parametrů do modelů šíření radionuklidů při únicích do životního prostředí. Jsou zde vybírány vhodné metodiky analýzy neurčitostí (analytické metody, numerické metody, statistické odhady modelovaných výstupních veličin a konkrétní aplikační procedury).

2.2.1 Variabilita a neurčitost

Transportní procesy přenosu znečištění jsou ve své podstatě stochastické a příslušné neurčitosti neumožňují dosáhnout přesné predikce (turbulentní mechanismy v atmosféře, molekulární procesy suché a mokré depozice apod.). Jiné vstupní parametry mohou vykazovat tak zvanou variabilitu, pokud se mění s časem či v prostoru nebo se jejich hodnoty mohou lišit pro jednotlivé kategorie v rámci celé populace (dynamika úniku znečištění ze zdroje, suchá depozice pro jednotlivé kategorie typu zemského povrchu, spotřeba potravin pro jednotlivé věkové kategorie atd.). Z tohoto hlediska je třeba rozlišovat mezi **neurčitostí** a **variabilitou**.

Variabilita obecně vyjadřuje difference vstupní proměnné způsobené časovými, prostorovými nebo mezikategoriálními závislostmi. Na druhé straně stochastické vlastnosti vedou k **neurčitostem** vstupů v důsledku neúplné znalosti a neúplného popisu složitého systému, parametrizace modelu nebo v důsledku chyb v určování datových konstant.

V práci [4] se potom přikročilo k návrhu metodiky vyhodnocování pravděpodobnostních charakteristik cílových veličin v modelech šíření radionuklidů životním prostředím. V části II je navrhována volba grupy neurčitostí a metodika generování náhodných realizací vstupních vektorů modelů systému HARP. Jsou zkoumány příčiny existence neurčitostí vstupních parametrů a určovány jejich náhodné charakteristiky. Jsou shrnuty metodiky generování náhodných realizací, konkrétně metoda SRS (Simple Random Sampling) nebo metoda LHS (Latin Hypercube Sampling). Je presentován interaktivní generátor LHS vyvinutý ve spolupráci FJFI – ÚTIA

Jsou podporována rozdělení :

normální
lognormální
omezené normální
rovnoměrné (uniformní)
logrovnoměrné
diskrétní rovnoměrné
trojúhelníkové

Rozsahy je možné zadávat absolutně, relativně (vzhledem k mediánu), pomocí kvantilů a dalších.

Prvním krokem je určování konkrétních náhodných realizací specifického vektoru vstupních parametrů. Pro každý submodel transportu je třeba stanovit rozměr N vektoru (počet relevantních vstupních parametrů plynoucí z předběžných procedur třídění a citlivostních studií) a dále korektně definovat náhodné charakteristiky jednotlivých vstupních parametrů. Konečně je třeba navrhnout a naprogramovat optimální výpočetní postupy pro generování realizací náhodných vektorů tak, aby bylo dosaženo věrohodných výsledků v přijatelném výpočetním čase.

2.2.2 Metody vzorkování

Složitost problému a nelinearita jsou hlavním důvodem pro použití numerického postupu, který umožňuje dosáhnout realistických výsledků. Proto je nezbytné v prvním kroku zvolit vhodnou metodu vzorkování spočívající v generování M -tic realizací, a to jak s ohledem na dostatečně velký počet realizací K tak vzhledem ke korektnímu zahrnutí skutečných korelací mezi vstupními parametry.

V prvním případě jde o volbu optimálního výběrového algoritmu. V [7] je diskutován hlavní důvod, proč nahrazujeme základní metodu hrubého Monte Carlo vzorkování metodou stratifikovaného vzorkování LHS. I když hrubá metoda se snadno implementuje, její základní nevýhodou je možná tvorba nepravidelných shluků realizací ve výběrovém prostoru, zvláště pak při malém počtu pokusů. To si vynucuje generovat poměrně rozsáhlé vzorky (tisíce až desetitisíce realizací), což v případě následující aplikace ve složitém environmentálním modelu může vést k neúnosným dobám výpočtu resp. při zmenšené velikosti vzorku k nestabilním výsledkům (myšleno ve smyslu srovnání výsledných hodnot s opakovaným procesem). Ale ani při velkém počtu vzorků K nezaručuje hrubé MC vzorkování úplné pokrytí všech oblastí výběrového prostoru. Je tedy zřejmé, že tato metoda není příliš vhodná například pro určování extrémních hodnot kvantilů výstupních veličin simulovaných matematickým modelem. Proto bylo třeba přejít k metodám stratifikovaného vzorkování, v našem případě konkrétně k proceduře LHS, která rozvíjí myšlenku „*vzorkování na základě důležitosti*“ (Importance Sampling).

Zjednodušeně řečeno, metoda LHS předem klade určitá deterministická pravidla na mechanismus generování vzorků tak, aby vykazovaly lepší statistické vlastnosti. Práce [7] se zabývá právě touto problematikou kolem náhodných vektorů vstupních parametrů, která se pak aplikuje v dílčích submodelech šíření radionuklidů a hodnocení rizika jejich působení na

lidský organismus. V Tab. LHS je uveden interaktivní panel pro generování náhodných vstupů.

Tabulka LHS: Interaktivní panel LHS pro generování vektorů náhodných realizací vstupních parametrů modelu.

of variables

of vectors

LHS generator of the HARP system

Model uncertainties for Particle Filter assimilation method application

Random fluctuations of model parameters

Scale factor: release intensity - 1. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	0.05-quantile <input type="text" value="1"/>	truncation <input type="text" value="3,5-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="truncated lognormal"/>	0.95-quantile <input type="text" value="100"/>	# of values <input type="text" value="11"/>
Scale factor: horizontal atm. dispersion	nom. value <input type="text" value="1"/>	0.05-quantile <input type="text" value="1"/>	truncation <input type="text" value="2,5-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="truncated lognormal"/>	0.95-quantile <input type="text" value="4"/>	# of values <input type="text" value="11"/>
Scale factor: dry depo velocity-elem I	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="2"/>	truncation <input type="text" value="3-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="loguniform"/>	right bound <input type="text" value="518"/>	# of values <input type="text" value="3"/>
Fluctuation of wind direction - 1. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="-5"/>	truncation <input type="text" value="3,5-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="uniform"/>	right bound <input type="text" value="5"/>	# of values <input type="text" value="11"/>
Fluctuation of wind direction - 2. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="-5"/>	truncation <input type="text" value="3,5-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="uniform"/>	right bound <input type="text" value="5"/>	# of values <input type="text" value="11"/>
Wind speed fluct. during 1. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="-1"/>	truncation <input type="text" value="1-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="uniform"/>	right bound <input type="text" value="1"/>	# of values <input type="text" value="1"/>
Wind speed fluct. during 2. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="-1"/>	truncation <input type="text" value="1-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="uniform"/>	right bound <input type="text" value="1"/>	# of values <input type="text" value="1"/>
Wind speed fluct. during 3. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="-1"/>	truncation <input type="text" value="3,5-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="uniform"/>	right bound <input type="text" value="1"/>	# of values <input type="text" value="1"/>
Scale factor: release intensity - 2. hour	nom. value <input type="text" value="1"/>	0.05-quantile <input type="text" value="1"/>	truncation <input type="text" value="3,5-sigma"/>
	distribution <input type="text" value="truncated lognormal"/>	0.95-quantile <input type="text" value="100"/>	
ADM11:kor. na výšku směš. vrstvy	nom. value <input type="text" value="1"/>	left bound <input type="text" value="0.5"/>	
	distribution <input type="text" value="truncated lognormal"/>	right bound <input type="text" value="1.5"/>	

Standard input

Standard input - relative

Quantiles - 0,05 a 0,95 - abs.

Quantiles - 0,10 a 0,90 - abs.

✓ Quantiles - 0,05 a 0,95 - rel.

Quantiles - 0,10 a 0,90 - rel.

Correlation settings

Generate and Save

Save the panel

Load the panel

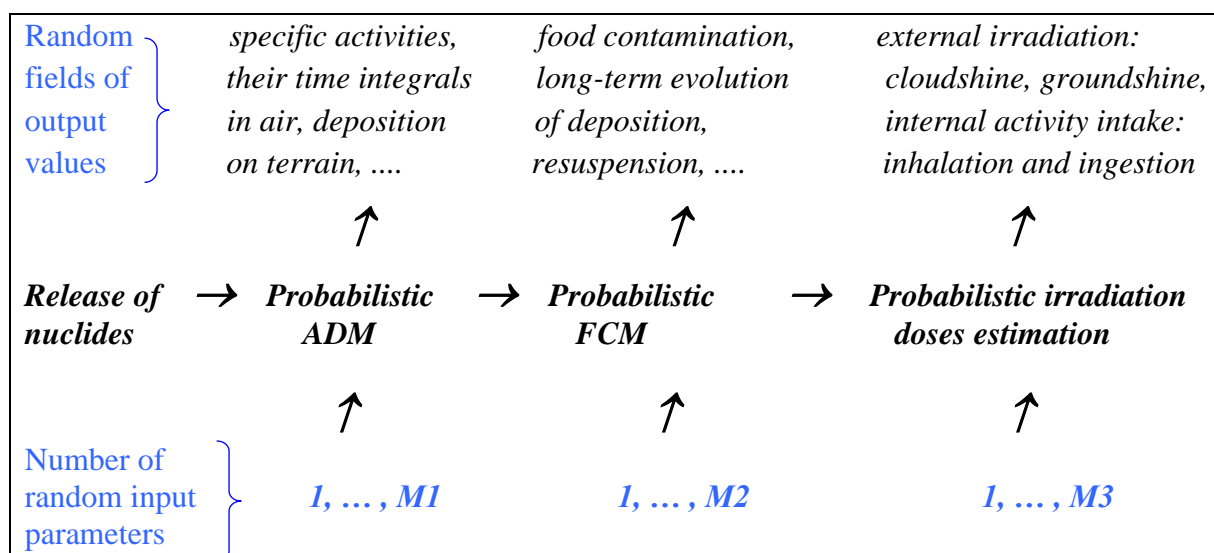
Reset

Cancel

2.2.3 Implicitní grupy neurčitostí řetězu transportu aktivity v životním prostředí

Šíření radioaktivity od zdroje úniku životním prostředí jsou modelovány jednotlivými submodely, u nichž je respektován náhodný charakter jejich parametrů. Situaci ilustruje následující schéma.

Schema 2: Řetězec submodelů simulujících šíření radioaktivity v jednotlivých komponentách



Na základě podrobné rešerše v [4] byly navrženy implicitní grupy vstupních náhodných parametrů jednotlivých submodelů. Jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Table 1. Default uncertainty group for dispersion and deposition model (ADM) of the HARP

param. id. and meaning	pdf_type	param. id. and meaning	pdf_type
ADM1: release intensity	lognormal ^(*)	ADM8: mean wind speed ^(***)	uniform
ADM2: σ_y - horizontal dispers.	lognormal ^(*)	ADM9: wind profile exp.	normal ^(*)
ADM3: horizontal wind fluct. ^(**)	normal ^(*) , discrete	ADM10: σ_z vertical dispersion	lognormal ^(*)
ADM4: dry depo-elem iodine	loguniform	ADM11: mixing height correction	triangular
ADM5: dry depo-aerosol	loguniform	ADM12: thermal energy correction	lognormal ^(*)
ADM6: scavenging coef.elem.iod.	loguniform	ADM13: precipitation intensity	uniform
ADM7: scavenging coef. aerosol	loguniform	ADM14: time shift of precipitation	uniform discrete

^(*) ... truncated ; ^(**) ... horizontal wind direction fluctuation $\Delta\phi = ADM3 * 2\pi/80$ (rad) ;

^(***) ... uncertain wind speed $u = (1 + 0.1 * ADM8) * u_{10} + 0.5 * ADM8$; u_{10} measured at 10 m

Table 2. Implicit group of input random parameters of food chain model FCM of the HARP

param. id. and meaning	pdf_type	param. id. and meaning	pdf_type
FCM1: Plant interception factor	normal-2 σ trunc	FCM9: : Transfer factor animal-meat for Cs	uniform

FCM2: Transfer factor soil-plant (Cs and Sr)	log-uniform	FCM10: Surface yield of crop	uniform
FCM3: Half-times of leaching and migration out of soil	log-uniform	FCM11: Time shift of harvest	uniform
FCM4: Weathering half-time – removal from plant surface	triangular	FCM12: Processing factor for flour	uniform
FCM5: Surface density of root zone [kg.m ⁻²]	uniform	FCM13: Processing factor for vegetables	uniform
FCM6: Transfer factor animal-milk for Cs	uniform	FCM14: Consumption rate for foodstuffs	triangular
FCM7: : Transfer factor animal-milk for Srs	uniform	FCM15: Feeding rates for cattle	uniform
FCM8: : Transfer factor animal-milk for iodine	uniform	FCM16: Delay to consumption for milk (storage and processing)	normal - 2σ trunc

Table 3. Implicit group of input random parameters of dose model DOS of the HARP

<i>param. id. and meaning</i>	<i>pdf_type</i>	<i>param. id. and meaning</i>	<i>pdf_type</i>
DOS1: Location factor (fraction of time spent in place)	uniform	DOS6: Filtration effect of building for calculation of inhalation dose	uniform
DOS2: Shielding factor of buildings	uniform	DOS7: Proportional coefficient for $k_{\text{RESUSP}}(t)$ (**)	uniform
DOS3: Proportional coefficient for ENV(t) (*)	uniform	DOS8: Half-time of $k_{\text{RESUSP}}(t)$ decrease with time (**)	uniform
DOS4: Half-time of fast decrease comp. of ENV(t) (*)	uniform	DOS9: uncertainty in inhalation volume (same for all age categories)	uniform
DOS5: Half-time of slow decrease comp. of ENV(t) (*)	uniform		

(*) Environmental correction ENV (t) due to soil shielding for groundshine (ECOSYS 87)

(**) Semi-empirical formula for time evolution of resuspension coefficient (RODOS – FDMT Model Description)

Při konkrétních bězích pravděpodobnostního modulu jsou náhodné výběry vstupů předem připraveny pomocí interaktivního generátoru LHS (Tab. LHS) ve vstupních souborech:

NAHADM.DAT náhodné výběry: M1-tice náhodných realizací submodelu ADM

NAHFCM.DAT náhodné výběry: M2-tice náhodných realizací submodelu FCM

NAHDOS.DAT náhodné výběry: M3-tice náhodných realizací submodelu DOS

Počet realizací byl volen 1000 až 5000 (doba výpočtu do 15 minut).

2.3 Popis náhodného charakteru výstupů

Hlavními výstupními veličinami jsou dávky záření v důsledku vnějšího a vnitřního ozáření, které se počítají na základě těchto hlavních řídicích veličin modelu:

- Koncentrace aktivity nuklidů ve vzduchu
- Časový integrál koncentrace aktivity v přízemní vrstvě vzduchu
- Depozice aktivity na zemském povrchu
- Časový integrál depozice aktivity na zemském povrchu

Z hlediska odhadu neurčitostí výsledných veličin jsou jejich základní náhodné fluktuace způsobené neurčitostmi atmosférického modelu. Na ně se potom postupně „nabalují“ další efekty způsobené neurčitostmi konverzních faktorů a jiných komponent dozimetrického modelu, dynamických parametrů ingesčního modelu apod. V práci [4] je provedena podrobná rešerše dostupné literatury. Poučným příkladem pro volbu strategie analýzy neurčitostí podává práce týkající se dánského lagrangeovského modelu NPK-PUFF v tom smyslu, že upřednostňuje pečlivý výběr několika nejdůležitějších parametrů před maximalistickým přístupem vlekcoucím sebou všechny myslitelné parametry.

2.4 Konvenční analýza neurčitosti a základní statistiky

Ucelená aplikace analýzy neurčitosti na hypotetický scénář úniku je podána v [5]. Jsou definovány výběry (implicitní grupy) náhodných parametrů jednotlivých submodelů. Současně je zde podán uživatelský návod pro interaktivní zadávání náhodných charakteristik vstupů s následujícím LHS generováním (viz. Tab. 1). Práce přechází k popisu zpracování výstupů modelování a organizaci výstupů z kódu. Je popsána programová podpora pro generování výběrových charakteristik cílových veličin a dílčích výsledků pro pravděpodobnostní model atmosférické disperze a depozice. Jsou zdokumentovány standardní výstupy pravděpodobnostního modelu pro implicitní grupy náhodných parametrů.

Zpracování výstupů řešila práce [5] jen v určitém omezeném rozsahu. Během výpočtu jsou pro jednotlivé realizace vstupů produkovány kompletní výstupy, které z pochopitelných důvodů nelze všechny ukládat pro pozdější statistické zpracování. Podle daného scénáře a oblasti zájmu dané rozsahem modelování se zvolí referenční body na terénu odpovídající výpočtové síti. Při výpočtech v blízkém okolí zdroje uvažovat 3 radiální vzdálenosti:

4.5 km ; 10.5 km ; 21 km

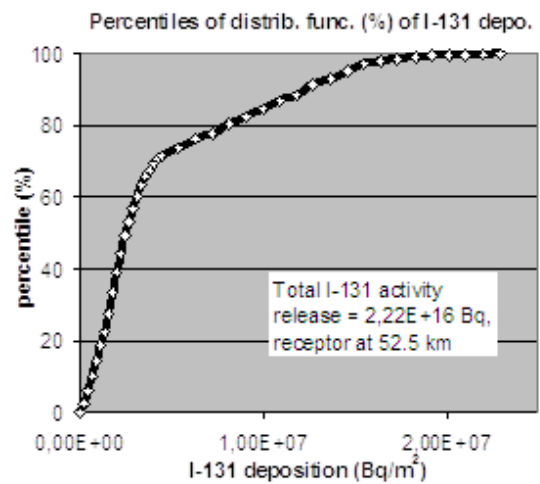
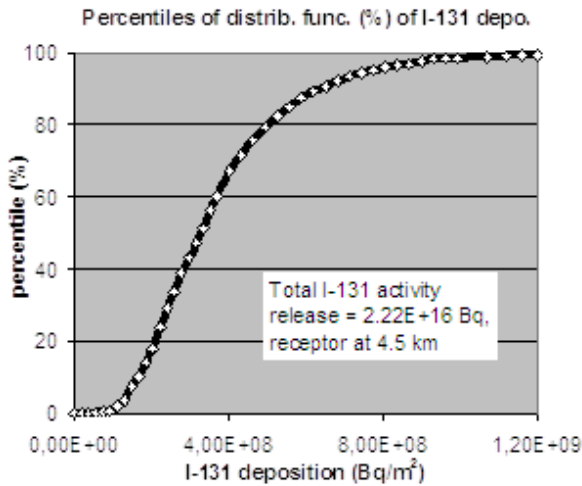
Pro střední vzdálenosti od zdroje lze zatím uvažovat pásma:

25 km; 52.5 km; 92.5 km

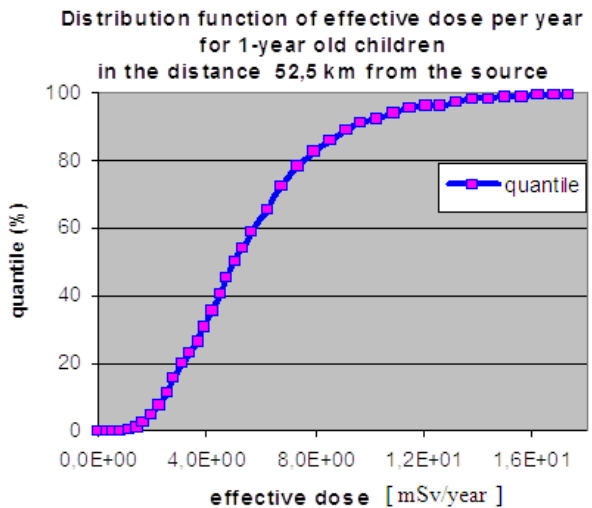
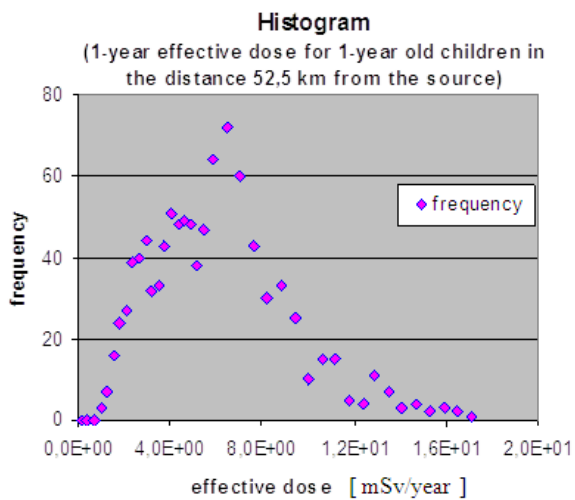
Referenční body jsou dány průsečíkem zmíněných pásem se základním směrem větru zadávaným do modelu šíření gaussovské vlečky.

Na následujícím obrázku 4 je ukázka výsledků úlohy pro hodinový únik tří radionuklidů (Bq/h):

SR90	1.11E+15
I131	2.22E+16
CS137	3.33E+17



Obr. 4a: Distribuce náhodného rozdělení výsledné deponované aktivity ^{131}I



Obr. 4b: Distribuce náhodného rozdělení výsledného úvazku efektivní dávky (uvažovány 3 radionuklidy ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs).

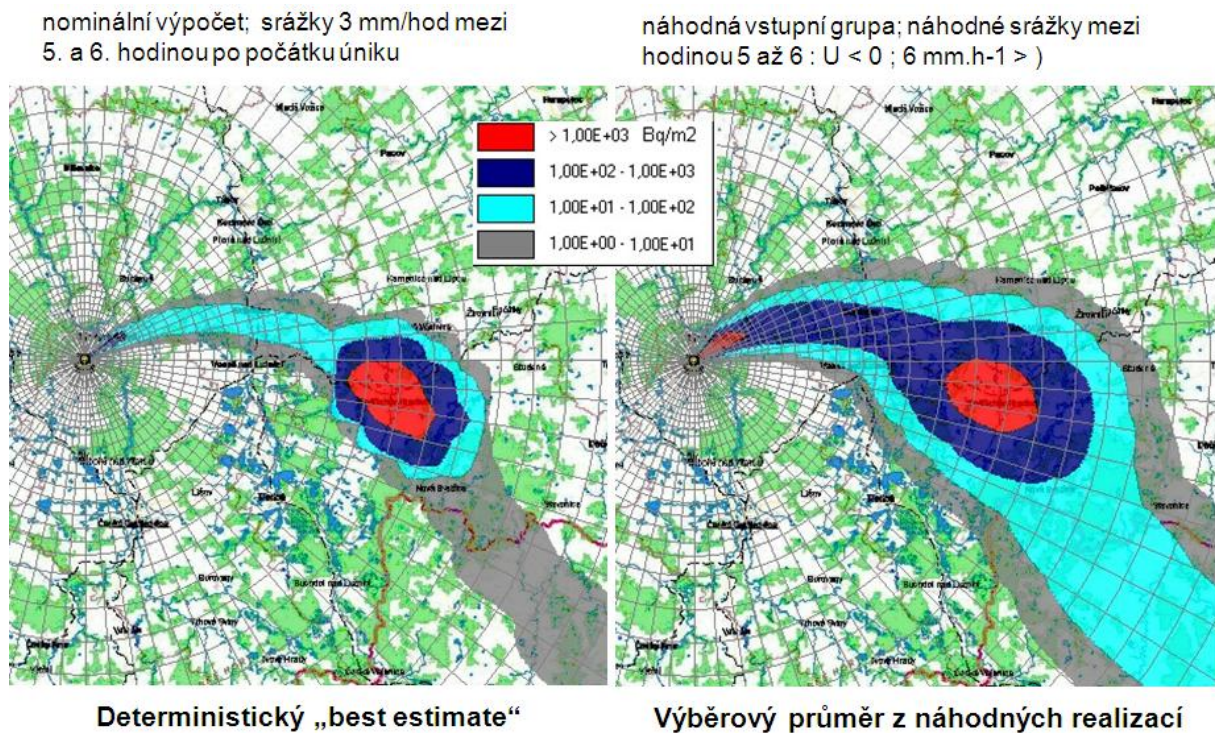
Pro účely statistického zpracování realizací datových bloků je vypracován samostatný **projekt CCDF**, který umožňuje vypočítávat výběrové střední hodnoty:

- výběrové rozptyly
- výběrové frekvenční a distribuční funkce
- výběrové komplementární distribuční funkce
- faktory neurčitosti
- referenční koeficienty neurčitosti.

2.5 Návrh alternativních zobrazování při pravděpodobnostním pohledu

K interpretaci výsledků hodnocení na pravděpodobnostním základě provedeme nejdříve následující simulační experiment.

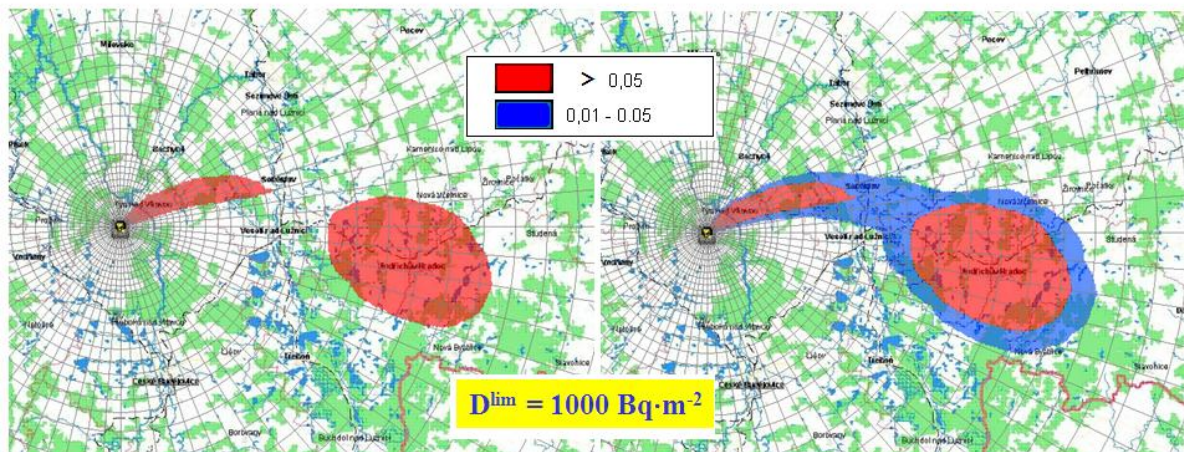
Uvažuje se hodinový únik $1.32E+12$ Bq radionuklidu ^{137}Cs . Pole větru se bere z 1. segmentu Case 2 definovaného pro původní výpočty pro Melkské cvičení se zdrojovým členem ST2 (z RODOS). Simulujeme náhodné srážky s uniformní distribucí $U < 0; 6 \text{ mm.h}^{-1} >$ s výskytem pouze mezi hodinou 5 a 6 od začátku úniku. Výška úniku je 60 m, použity disperzní formule SCK/CEN pro venkovský povrch střeoevropského typu. Celkem K realizací sledované výstupní veličiny aktivity ^{137}Cs deponované na zemském povrchu bylo generováno s náhodnými vstupy podle Tab. 1. Každá realizace k ($k=1, \dots, K$) představuje náhodnou 2-D trajektorii (stopu) ^{137}Cs representovanou maticí (růžicí) ve výpočtových bodech polární sítě (v 35×80 resp. v 42×80 bodech). Výběrové statistiky jsou potom generovány z těchto K vzorků.



Obr. 5: Simulace „dešťového oka“ v rámci náhodného modelování: Plošná distribuce usazeného ^{137}Cs na terénu [Bq/m^2]

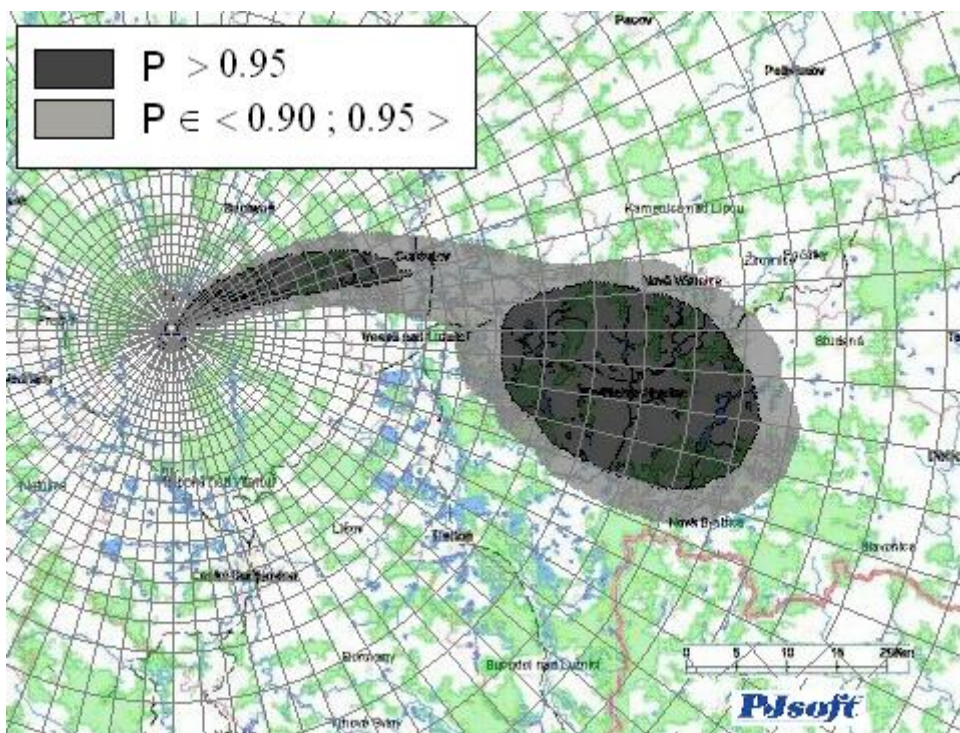
Deterministický „best estimate“ výpočet (jediná realizace modelu s nominálními hodnotami vstupních parametrů modelu) je znázorněn na Obr. 5 vlevo, vpravo je potom výběrový průměr z $K=5000$ realizací.

náhodné rozdělení srážek mezi hodinou 5 až 6 : $U < 0 ; 6 \text{ mm.h}^{-1} >$



Obr. 6: 2-D zobrazení pravděpodobnostních linií vyjadřujících s jakou pravděpodobností depozice ^{137}Cs v dané oblasti přestoupí limit D^{lim}

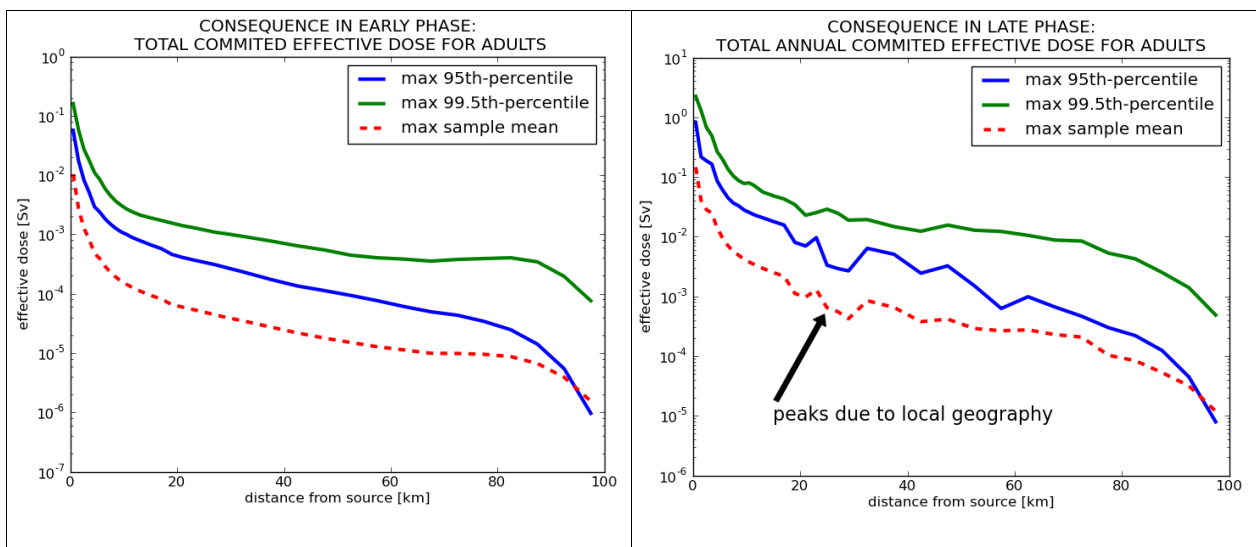
Zobrazení na Obr. 5 je provedeno v klasické formě izolinií (izodóz). Naopak Obr. 6 představuje určitý typ pravděpodobnostních linií. Podobnost se celkem zachovává, ale obsah i forma jsou jiné. Tento postup zobecníme podle schématu na obrázku 7. Pro obecnou sledovanou výstupní veličinu se tedy zobrazují pravděpodobnostní linie s definovaným významem.



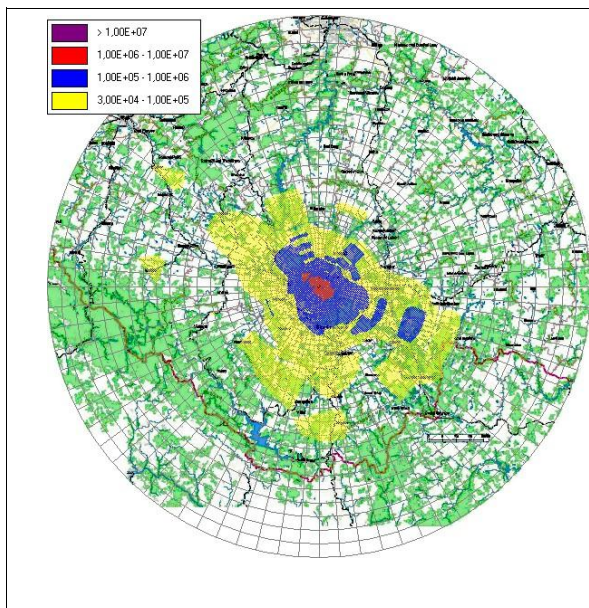
Obr. 7: Schématické zobrazení pravděpodobnosti, že určitá sledovaná veličina přestoupí daný limit

2.6 Pseudonáhodné PSA – Level 3 studie

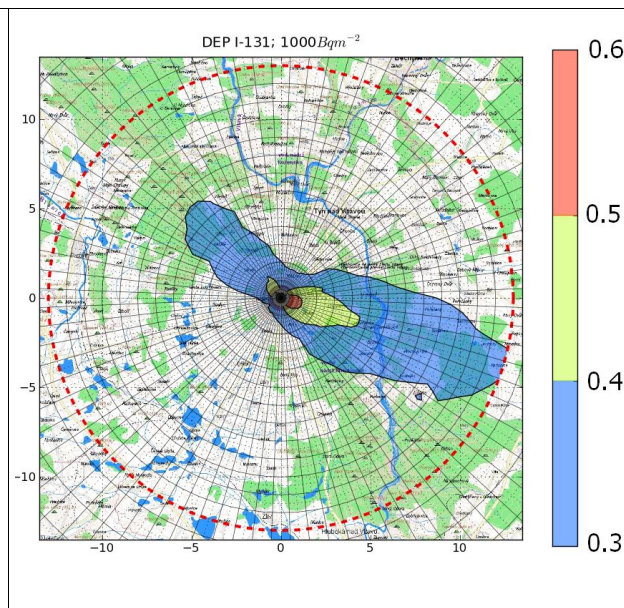
V předchozí části byla zmíněna konvenční analýza neurčitostí vztahující se na konkrétní scénář úniku za zcela konkrétních podmínek. V publikaci [8] byla představena další možnost deterministického jádra HARP produkovat výsledky v oblasti tzv. WVA analýzy (Weather Variability Assessment), která je řazena do oblasti PSA-Level 3 studií. Výsledky výpočetně náročné úlohy jsou potom hodnoceny statistickým matematickým aparátem – viz Obr. 8 (obdobně jako pravděpodobnostní běhy evropského kódu COSYMA). Termín „pravděpodobnost“ zde značí určitou míru statistické úrovně (poměr výskytu sledovaných případů k celkovému počtu realizací). V aplikační studii [5] jsou ilustrovány výsledky hodnocení dlouhodobého úniku materiálu. Byla realizována dílčí procedura PSA-Level 3 odhadu radiologického rizika v důsledku variability meteorologických vstupů reprezentovaných archivovanými sekvencemi (každá hodina z let 2008 až 2009 – celkem 17 500 hodin). Sekvencí takového velkého počtu hodinových úniků byl dokonce simulován dlouhodobý únik, který má charakter ročního uvolňování aktivity při normálním provozu jaderného zařízení. Tak lze metodikou WVA simulovat variabilitu charakteristik denní a noční atmosféry a změny v ročních obdobích. Každý hodinový únik (rozpočítaný z ročních bilancí) je podroben meteorologickým podmínkám archivovaným pro ten čas. Jedná se tedy o výpočetně náročnou MC proceduru, spočívající v mnohonásobném vyvolávání pravděpodobnostního jádra systému HARP. Vzhledem k efektivitě kódu HARP je možné zpracovat i několikaleté hodinové série počasí v rozumném časovém horizontu (několik málo desítek hodin).



Obr. 8: Výběrové průměry (modře) a 95 a 99.5 percentily pro celkové úvazky dávek v časné (1 den - vlevo) a pozdější (roční úvazky - vpravo) fázi radiální nehody. Pro každou radiální vzdálenost nanesena vždy maximální hodnota ze všech 80ti úhlových sektorů.



Obr. 9: Výběrový průměr depozice ^{131}I ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) v 2-D reprezentaci



Obr.10: 2-D vizualizace komplementární CCDF–pravděpodobnost přestoupení limitní hodnoty $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$

2.7 Univerzální 2-D zobrazování charakteristik náhodných realizací při pravděpodobnostních bězích.

Univerzální zobrazovací přístup vychází z následující úvahy. Jakkoliv jsou výpočty pravděpodobnostních odhadů komplikované, pomocí výběrových rutin mohou být výsledky transformovány do dílčích implicitních výstupů představujících mnohonásobné úložiště za sebou řazených K matic (růžic) výsledků pro jednotlivé realizace náhodného výběru vstupních parametrů (pro $K=5000$ výpočty trvají asi 15 minut). První řádek matice začíná identifikací #xxx, kde xxx může být TIC, DEP, CAP, DPT, DMP a podobně, značící identifikátor zvolené radiologické veličiny. Za prvním řádkem následuje 80 řádků pro každý úhlový sektor a v každém z nich je 42 resp. 35 hodnot pro jednotlivá radiální pásma. Z těchto souborů se provádí statistické vyhodnocování náhodných charakteristik radiologické veličiny #xxx.

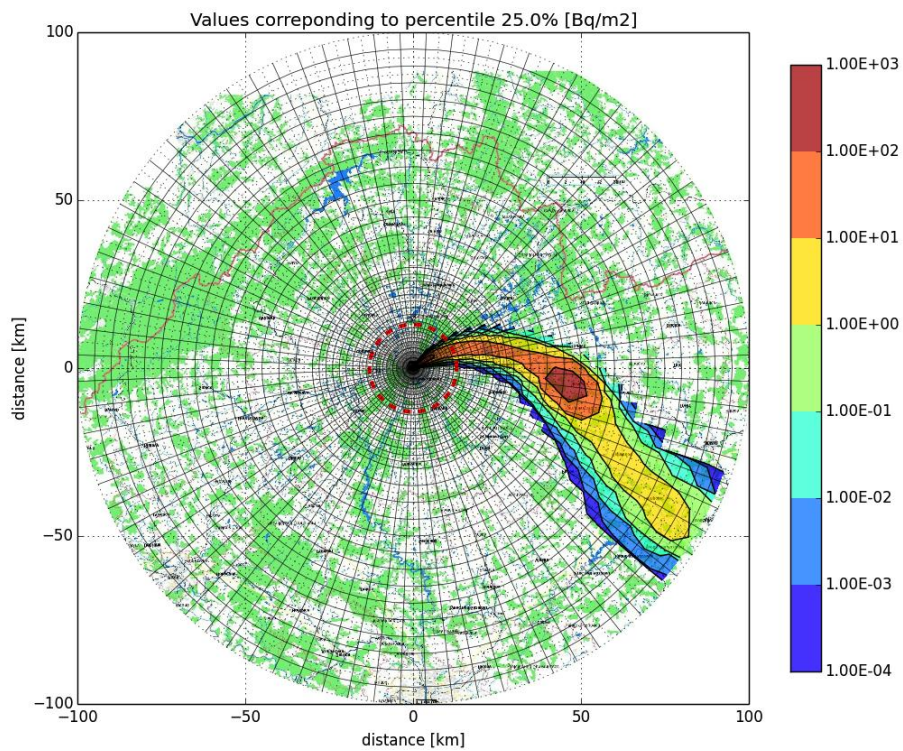
Podrobný popis zobrazovacího skriptu i s příklady je uveden v [D3]. Úvodní panel podle Obr. 11 nabízí volby:


```
=====
2D vizualization:
-----
0 - Mean
1 - Variance
2 - Standard deviation
3 - Median
-----
4 - Show rose
-----
5 - Histogram at a point
-----
6 - Probability of exceedance the threshold
8 - Contour of given probability level (percentile)
-----
9 - Exit
Choice: |
```

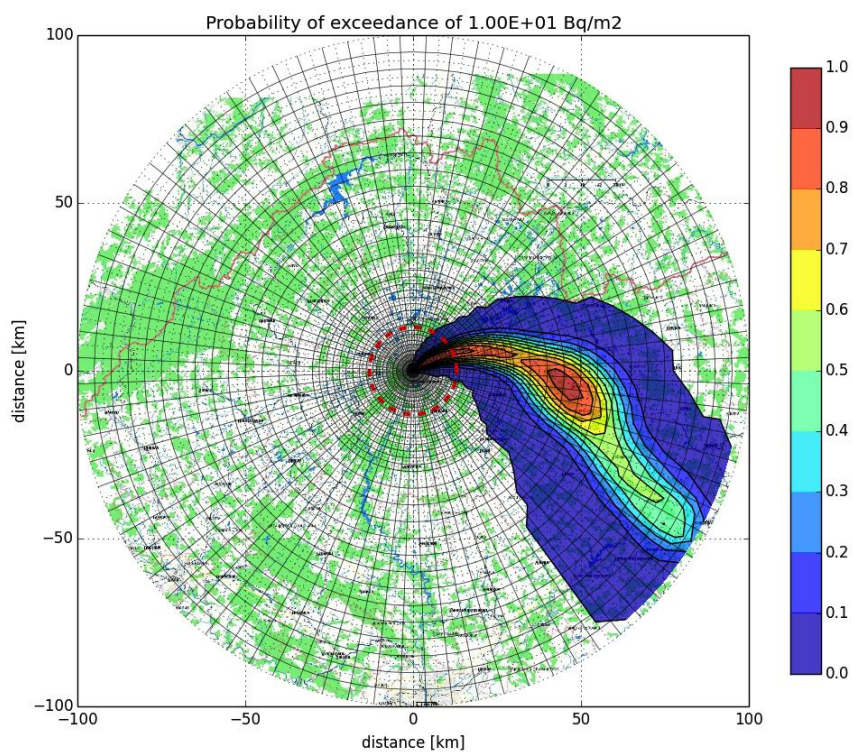
Obr. 11. Úvodní obrazovka konzolové aplikace pro zpracování a vizualizaci dat.

S odkazem na podrobný popis v [doplňku D3] zde uvedeme jen stručnou ukázkou pro dva případy:

- a) Pro scénář s „dešťovým okem“ pro hodinový únik $1.32E+12$ Bq radionuklidu ^{137}Cs bylo generováno 5000 realizací různých depozice ^{137}Cs s id. #DEP spočtených podle komponenty HDET 35 pro 35 radiálních vzdáleností. Na Obr. 12 je ukáзка výsledného statistického zpracování ve formě zobrazení percentilu. Na Obr. 13 jsou zobrazeny pravděpodobnostní linie pro přestoupení fixní hodnoty aktivity deponované na zemském povrchu.



Obr. 12: Obrisy pravděpodobnosti dané úrovně - percentil 25%.



Obr. 13: Úrovně pravděpodobnosti přestoupení daného limitu

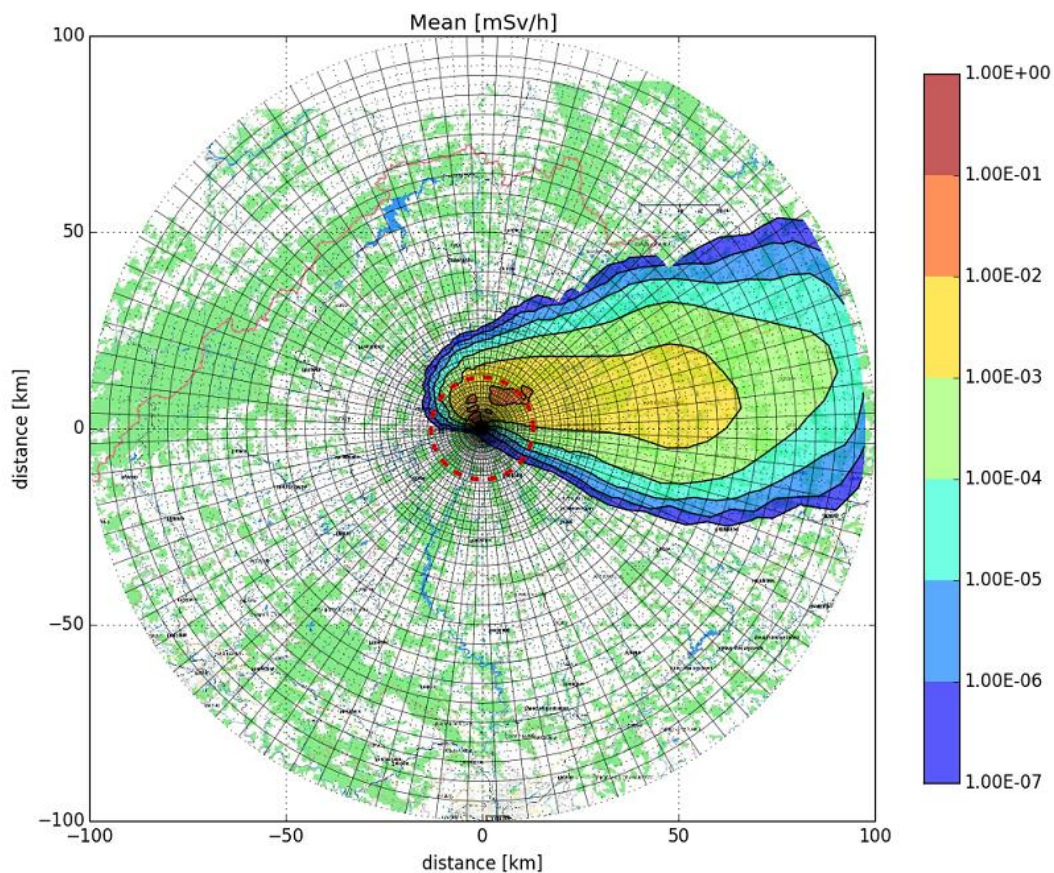
Generování náhodných realizací matic depozičních příkonů v projektu Balnahod_2013 pro jemnou výpočtovou síť. Jsou uvažovány 4 náhodné parametry podle Přílohy 3. Ve scénáři jsou uvažovány 3 nuklidy:

SR90, I131, CS137

Výpočty s FECZ, počasí:

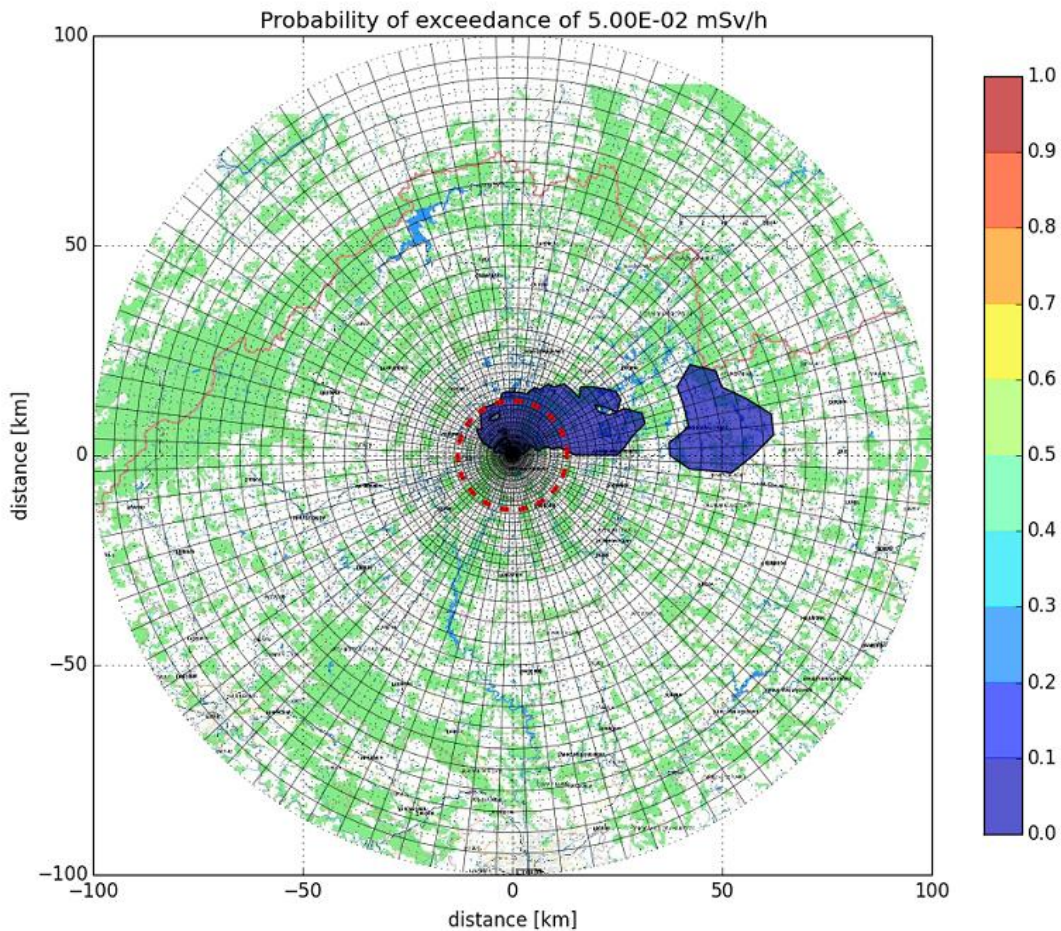
-s ETE -d 20120424-1400 -n 48 -f HRCFRC

1.00	.00	143.00	2.30	C	.00
1.00	1.00	220.00	1.50	B	.00
1.00	2.00	269.00	4.00	C	.71
1.00	3.00	272.00	6.60	D	1.66
1.00	4.00	276.00	3.70	D	2.82
1.00	5.00	253.00	3.20	D	.33
1.00	6.00	250.00	3.80	D	.00
1.00	7.00	248.00	3.40	D	.00
1.00	8.00	246.00	3.10	D	.00
1.00	9.00	251.00	3.10	D	.00



Obr. 14: Depoziční příkony - výběrové průměry.

Bylo spočteno 1000 realizací v projektu Balnahod_2013. Neurčitost uvolněné aktivity C1 z externího souboru NAHADM.DAT, jinak neurčitosti pro další tři náhodné parametry FI, U10, Sražky se generují uvnitř cyklu podle Přílohy 3. Ve výstupním souboru IMPLICIT_#DPT.OUT jsou za sebou matice depozičních příkonů přesně 24 hod po úniku (bylo zvoleno $T_{ref}=24$ hod).



Obr. 15: Pravděpodobnosti, že depoziční příkon přestoupení den po počátku úniku zvolený limit $5.00E-02$ mSv/h.

Podrobný popis zobrazovacího skriptu i s příklady je uveden v doplňku [D3].

3 Příloha č. 1: Popis algoritmu vývoje radiologické situace v terénu od samého počátku úniku

3.1 Poznámky k rozšířenému algoritmu SGPM (Segmented Gaussian Plume Model)

Jak již bylo řečeno skutečná dynamika úniku je formálně nahrazena rozdělením do $IINT$ segmentů úniku. Podle tvaru časové závislosti úniku je provedena nejvhodnější segmentace na po částech konstantní homogenní úniky $IINT = 1$ až $NINT$. Původní omezení bylo $NINT \leq 5$, celková doba trvání úniku MHOD (suma času trvání segmentů) byla maximálně 16 hodin. U komponenty HDET 42 bylo nyní provedeno podstatné rozšíření na $NINT \leq 12$ a $MHOD \leq 72$ hodin. Pro každý scénář jsou určeny:

- a) Doby trvání úniku v jednotlivých časových segmentech – obecně o velikosti desítky minut až několik hodin (nebo nyní i dní, podle charakteru dynamiky úniku a vhodnosti prováděné ekvivalentní homogenizace).
- b) Celkové úniky aktivity jednotlivých radionuklidů $n : A^n_{IINT}$ (Bq) v segmentu.
- c) Hodnoty uvolňovaného tepelného výkonu vzdušín QH_{IINT} (kW) vystředované v uvažovaném segmentu.
- d) Hodnoty průměrné vertikální rychlosti unikajících vzdušín VS_{IINT} (m/s) vystředované v uvažovaném segmentu.

V dalším postupu jsou původní intervaly úniku přerozděleny (ve shodě s dostupnými hodinovými předpověďmi meteorologické situace) na hodinové segmenty očíslované $ISEQ$, $ISEQ = 1$ až $NSEQ$ ($NSEQ$ může nyní označovat až 72 hodinových segmentů). V každém z těchto hodinových segmentů je provedena interpolace a z bilancí jsou určeny odpovídající nové přerozdělené hodnoty A^n_{ISEQ} , QH_{ISEQ} a VS_{ISEQ} . Původních $NINT$ homogenních segmentů je tedy nyní přetransformováno na $NSEQ$ ekvivalentních hodinových segmentů, čímž se podařilo synchronizovat dynamiku úniků s odpovídajícími hodinovými meteorologickými předpověďmi.

Transformovaná úloha spočívá v modelování pohybu všech hodinových segmentů. Postupně jsou brány jednotlivé hodinové segmenty $ISEQ$, přičemž pohyb každého z nich nad terénem je aproximován po částech přímočarým translačním pohybem v rámci každé následující hodinové fáze s respektováním měnící se meteorologie v každé následující hodině. Počet těchto fází $NFAZ(ISEQ)$ pro daný hodinový segment $ISEQ$ je implicitně 8, může se však dynamicky při výpočtu zadat tak, aby nově zadaný počet fází (maximálně 43) znamenal, že v poslední fázi celý segment (mrak) již by měl vystoupit z obrazovky (tzn. dostane se za hranici 100 km od zdroje).

Výsledky jsou uchovávány v takových detailech, že pro výsledné zpracování zůstávají k dispozici pole hodnot každého hodinového segmentu ve všech jeho dalších hodinových fázích pohybu ve všech bodech výpočtové polární sítě (i,k). Pro radiální pásma je $i=1$ až 42 do 100 km od zdroje, $k=1$ až 80 pro rovnoměrné úhlové rozdělení 2π radiánů na 80 rovnoměrných úhlových paprsků, každý s velikostí $360/80 = 4.5$ deg (číslování po směru hodin od severu). Radiální pásma jsou od zdroje vzdálena:

XREAL(42) v metrech: 50 150 250 400 600 850 1200 1650 2200 2850 3600 4500

.... atd. až do 97500 metrů

Jsou vypočteny základní řídicí veličiny časné fáze vztahující se k efektu konkrétního hodinového segmentu *ISEQ* při jeho pohybu během konkrétní jedné hodinové fáze *KFAZ*:

1. $CAPFAZ^n(i,k; ISEQ, KFAZ)$ Přízemní objemová aktivita nuklidu n nad místem (i,k) příslušná k hodinovému segmentu *ISEQ* při jeho pohybu během jeho hodinové fáze *KFAZ* (to znamená přesně v čase *KFAZ* hodin po počátku úniku segmentu *ISEQ* – ten přitom začal unikat v čase *ISEQ* hodin od samotného počátku úniku); v Bq.m⁻³
2. $TICFAZ^n(i,k; ISEQ, KFAZ)$ Časový integrál přízemní objemové aktivity nuklidu n příslušné ke konkrétnímu hodinovému segmentu *ISEQ* akumulované nad místem (i,k) při jeho pohybu během jeho hodinové fáze *KFAZ* (to znamená v čase *KFAZ* hodin po počátku úniku segmentu *ISEQ* – ten přitom začal unikat v čase *ISEQ* hodin od samotného počátku úniku); v Bq.s.m⁻³
3. $DEPFAZ^n(i,k; ISEQ, KFAZ)$ Měrná aktivita nuklidu n deponovaná za jednu hodinu na zemském povrchu v místě (i,k) příslušná ke konkrétnímu hodinovému segmentu *ISEQ* při jeho pohybu během jeho konkrétní hodinové fáze *KFAZ* (*KFAZ* hodin od počátku úniku segmentu *ISEQ* – ten přitom začal unikat v čase *ISEQ* hodin od samotného počátku úniku); v Bq.m⁻²
4. $TIDFAZ^n(i,k; ISEQ, KFAZ)$ Časový integrál deponované aktivity nuklidu n akumulovaný v místě (i,k) při pohybu hodinového segmentu *ISEQ* během jeho hodinové fáze *KFAZ* (*KFAZ* hodin po počátku úniku segmentu *ISEQ* – ten přitom začal unikat v čase *ISEQ* hodin od samotného počátku úniku); v Bq.s.m⁻²

Znovu zdůrazněme, že jde vždy o důsledek pohybu konkrétního hodinového segmentu *ISEQ* v jeho hodinové meteorologické fázi *KFAZ*. Pro následné zpracování časné fáze jsou tedy pro každý nuklid uchovávány matice (řekněme též *ružice*) hodnot *CAP*, *TIC*, *DEP* a *TID* dimenze rovné počtu uzlů výpočtové polární sítě (42 x 80 = 3360), přičemž jejich počet je roven součinu $NSEQ \times NFAZ$.

3.2 *Konverzační režim definice vstupů a zpracování výstupů*

Je zadán vícesegmentový scénář úniku. K jeho rychlé definici pomáhá vstupní interaktivní subsystém *DISPERZE* (viz Příloha 2 – zde kromě jiného uveden též průvodce výpočtem s využitím uživatelsky přívětivých interaktivních nástrojů pro definici vstupů, vlastní běh úlohy a zobrazení na konverzační bázi). Archivování a zpětné vyvolávání s případnými změnami umožňuje též rychlé variantní výpočty. Obdobné určení má vstupní subsystém *INGMODEL* pro vytvoření rozsáhlého souboru ingesčních vstupů. Výpočet je proveden, ale neskončí a zůstane s uživatelem v konverzačním módu. V dalším jsou popsány důležité výstupy, které jsou dále zpracovány. ***Uživatel je vyzván k zadání času T_{REF} v celých hodinách, ke kterému jsou pak vztaženy různé radiologické veličiny.*** Takto je umožněno sledovat změny radiologických veličin od samého počátku úniku s časovým krokem 1 hodina. V dalším popíšeme algoritmy zpracování rozsáhlých výstupních matic (*ružic*) pro jednotlivě volené výstupní radiologické veličiny.

3.3 Depozice aktivity, dávkové příkony a dávky od aktivity deponované na zemském povrchu

Aktivita radionuklidu n deponovaná na terénu v uzlech polární sítě ($i=1,\dots,42$; $k=1,\dots,80$) během konkrétní hodinové fáze $KFAZ$ konkrétního hodinového segmentu $ISEQ$ (je to depozice od sekvence ($ISEQ, KFAZ$) v čase $ISEQ+KFAZ-1$ od začátku celkového úniku) je vyjádřena vypočtenou různicí:

$$DEPFAZ^n(i,k; ISEQ, KFAZ) \text{ v } [\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}], \quad (1)$$

radiální pásma $i=1,\dots,42$; úhlové sektory polární růžice $k=1,\dots,80$.

Zadaná hodnota T_{REF} musí korespondovat s čísly segmentů a jejich meteofázemi. Popis radiologické situace na terénu vztažené ke zvolenému okamžiku T_{REF} se vypočte sumací všech konkrétních různic pro fixní $ISEQ, KFAZ(ISEQ)$, pro které platí $ISEQ + KFAZ(ISEQ) - 1 \leq T_{REF}$. Stopa na terénu od konkrétní jedné předchozí sekvence $iseq, kfaz(iseq)$ bude mít v čase T_{REF} hodnoty modifikované radioaktivním rozpadem:

$$DEPFAZ^n(T_{REF}; i,k; iseq, kfaz(iseq)) = DEPFAZ^n(i,k; iseq, kfaz(iseq)) * \exp[-\lambda_r^n * \{T_{REF} - (iseq + kfaz(iseq) - 1) * 3600.0\}] \quad (2)$$

Označíme $ipuf(iseq) = iseq + kfaz(iseq) - 1$. Celková depozice aktivity radionuklidu n v místě (i,k) za čas T_{REF} od počátku kontinuálního úniku a vztažená k tomuto okamžiku T_{REF} se pak počítá podle schématu:

$$DEPTOT^n(T_{REF}; i,k) = \sum_{ipuf=1}^{ipuf=T_{REF}} \{DEPFAZ^n(T_{REF}; i,k; ipuf(iseq))\} \quad (3)$$

Neboli výsledná depozice za dobu T_{REF} přesně v okamžiku T_{REF} je dána superpozicí výsledkových různic ($iseq, kfaz$) pro ty segmenty $iseq$ a jejich příslušné meteofáze $kfaz(iseq)$, pro něž platí $iseq + kfaz(iseq) - 1 \leq T_{REF}$. Hodnoty jsou přitom modifikovány radioaktivním rozpadem podle (2).

Pokud by byla volena dlouhodobá hodnota T_{REF} (řádově léta), lze k radioaktivnímu rozpadu přidat další environmentální vlivy na snižování aktivity (migrace, resuspenze, odvoz kontaminovaných komponent a pod.).

Depoziční dávkový příkon \hat{H}^n od radionuklidu n [$\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1}$] v uzlech polární sítě (i,k) v okamžiku T_{REF} je počítán s využitím vztahu (3) podle:

$$\hat{H}^n(T_{REF}; i,k) = R_{povrch}^n * DEPTOT^n(T_{REF}; i,k) \quad (4)$$

R^n_{povrch} je tabelovaný dávkový faktor ozáření pro nuklid n od kontaminovaného povrchu ($\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$). Celkový depoziční příkon od všech nuklidů je vyjádřen podle:

$$\hat{H}^{TOTAL}(T_{REF}; i, k) = \sum_{(n)} \hat{H}^n(T_{REF}; i, k) \quad (5)$$

Schéma $DEPFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ ze vztahu (1) je konkrétně representováno výstupním souborem SEGDEP.OUT, který je vytvářen při vlastním výpočtu časné fáze uvažovaného scénáře. Struktura souboru je taková, že vždy za hlavičkou (1. textová řádka souboru) následuje růžice s 80ti řádky (úhlové sektory), každá řádka má 42 hodnot (definovaných vztahem (1)) pro radiální pásma 1 až 42 (t. zn. od 50ti metrů do 97 500 metrů). Hlavička má tvar:

(6)

#DEP:I131 Měrná depozice aktivity na zemském povrchu Bq/m2 ISEQ,FAZE= 1 1 NTYP, XLAMN= 2
9.966E-07 RS(eff,I131)= 3.76E-16 [(Sv/s)/(Bq/m2)]

Zde NTYP je fyzikálně-chemická forma radionuklidu v mraku (0-nobel gas, 1-aerosol, 2-elementární jód, organický). XLAMN je rozpadová konstanta (s^{-1}). Pro první fázi $KFAZ=1$ každého segmentu $ISEQ$ je hlavička rozšířena o hodnotu konverzního faktoru R^n_{povrch} pro efektivní dávku od příslušného nuklidu. Neboli v souboru SEGDEP.OUT jsou za sebou růžice, kdy v cyklu na nuklidy pro každý nuklid následuje cyklus na hodinové segmenty $ISEQ$ a v tomto cyklu $ISEQ$ je cyklus na $KFAZ$. Za každým řádkem s identifikací (**nuklid, ISEQ, KFAZ**) pak následuje příslušná matice (růžice).

Konečně uvedeme vztahy pro výpočet dávky z ozáření z depozice, a sice od samého počátku úniku do zvoleného okamžiku T_{REF} . Depozice radionuklidu n v čase $iseq + kfaz - 1$ od nějaké sekvence ($iseq, kfaz$) je dána podle (1) výrazem $DEPFAZ^n(i, k; iseq, kfaz)$. Znamená to, že odpovídající depoziční příkon v čase $iseq + kfaz - 1$ je dán výrazem:

$$\hat{H}^n(i, k; iseq, kfaz) = R^n_{povrch} * DEPFAZ^n(i, k; iseq, kfaz) \quad (7)$$

Tento depoziční příkon s časem klesá podle $\exp[-\lambda_r^n \cdot \Delta t]$. Hledáme příspěvek k dávce z ozáření z depozice v (i, k) od sekvence ($iseq, kfaz$) usazené v čase $iseq + kfaz(iseq) - 1$, a sice za časový interval od $iseq + kfaz(iseq) - 1$ do času T_{REF} . Platí vztahy:

$$HF_{DEP}^n(T_{REF}; i, k; iseq, kfaz) = \int_{iseq+kpuf-1}^{T_{REF}} \hat{H}^n(i, k; iseq, kfaz) \cdot \exp(-\lambda_r^n \cdot t) \cdot dt = \quad (8)$$

$$R^n_{povrch} \cdot DEPFAZ^n(i, k; iseq, kfaz) \cdot \int_0^{T_{REF}-(iseq+kfaz-1)} \exp(-\lambda_r^n \cdot t) \cdot dt =$$

$$= R^n_{povrch} \cdot DEPFAZ^n(i, k; iseq, kfaz) \cdot \frac{1}{\lambda_r^n} \cdot [1 - \exp\{-\lambda_r^n(T_{REF} - (iseq + kfaz - 1))\}]$$

Celkové ozáření z depozice radionuklidu n od samého počátku úniku až do okamžiku T_{REF} je dána součtem příspěvků od všech relevantních hodinových sekvencí ($iseq, kfaz$)

$$H_{DEP}^n(T_{REF}; i, k) = \sum_{ipuf=1}^{ipuf=T_{REF}} \{HFAZ_{DEP}^n(T_{REF}; i, k; ipuf(iseq, kfaz))\} \quad (9)$$

Zde je opět zavedeno označení $ipuf = iseq + kfaz - 1$. Neboli výsledná dávka z depozice za dobu T_{REF} přesně v okamžiku T_{REF} je dána superpozicí výsledkových růžic ($iseq, kfaz$) pro ty segmenty $iseq$ příslušné meteofáze $kfaz(ISEQ)$, pro něž platí $iseq + kfaz - 1 \leq T_{REF}$. Hodnoty jsou přitom modifikovány radioaktivním rozpadem.

Celkovou dávku z depozice aktivity všech radionuklidů n místě (i, k) za čas T_{REF} od počátku kontinuálního úniku a vztažená k tomuto okamžiku T_{REF} se pak počítá podle schématu:

$$H_{DEP}(T_{REF}; i, k) = \sum_{(n)} H_{DEP}^n(T_{REF}; i, k) \quad (10)$$

Konkrétní určování dávek z depozice vychází ze stejného schématu $DEPFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ popsaném podle (1), které je konkrétně representováno výstupním souborem SEGDEP.OUT. Jeho struktura je popsána výše u vztahu (6). Dávky z depozice v čase T_{REF} se dostanou výběrem hodnot z výstupního souboru SEGDEP.OUT počínaje vnějším cyklem na nuklidy a pro každý nuklid následuje vnořený cyklus na hodinové segmenty $ISEQ$ a pro každý hodinový segment $ISEQ$ následuje vnořený cyklus na $KFAZ$. Každé trojici indexů ($n, ISEQ, KFAZ$) odpovídá depoziční růžice, což jsou hodnoty v uzlových prostorových bodech polární výpočtové sítě (i, k) pro radiální pásma $i=1, \dots, 42$ a úhlové sektory růžice $k=1, \dots, 80$.

3.4 Objemová aktivita radionuklidů v přízemní vrstvě vzduchu a její časový integrál pro výpočty interního ozáření z inhalační cesty a ozáření z mraku

3.4.1 Cesta inhalace

V analogii se shora uvedenými fakty je definována veličina $TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$, nyní jako časový integrál přízemní objemové aktivity nuklidu n příslušné ke konkrétnímu hodinovému segmentu $ISEQ$ a akumulované těsně nad místem (i, k) při jeho pohybu během jeho hodinové fáze $KFAZ$ (to znamená v čase $KFAZ$ hodin po počátku úniku segmentu $ISEQ$ – ten přitom začal unikat v čase $ISEQ-1$ hodin od samotného počátku úniku) v $Bq.s.m^{-3}$. Schéma $TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ je konkrétně representováno výstupním souborem SEG TIC.OUT, který je vytvářen při vlastním výpočtu časné fáze uvažovaného scénáře. Struktura souboru je taková, že vždy za hlavičkou (1. textová řádka souboru) následuje růžice s 80ti řádky (úhlové sektory), každá řádka má 42 hodnot pro radiální pásma 1 až 42 (t. zn. od 50ti metrů do 97 500 metrů). Hlavička má (např. pro I131) tvar:

#TIC:I131 Integrální přízemní objemová aktivita vzduchu Bq.s/m³ ISEQ,FAZE= 1 1pokračuje.....:

$$\begin{aligned} \text{RA}(\text{eff}, \text{I131}) &= 1.82\text{E-}14 \text{ [(Sv/s)/(Bq/m}^3\text{)] GIN}(\text{eff}, \text{dospělí}, \text{I131}) = 2.00\text{E-}08 \text{ [Sv/Bq]} \text{pokračuje} \\ &\dots\dots\dots \text{GIN}(\text{eff}, \text{kojenci}, \text{I131}) = 1.70\text{E-}07 \text{ [Sv/Bq]} \end{aligned} \quad (11)$$

Neboli v souboru SEG.TIC.OUT jsou za sebou růžice, kdy v cyklu na nuklidy pro každý nuklid následuje cyklus na hodinové segmenty *ISEQ* a v tomto cyklu *ISEQ* je cyklus na *KFAZ*. Za každým řádkem s identifikací (**nuklid, ISEQ, KFAZ**) pak následuje příslušná matice (růžice). Pro první fázi *KFAZ*=1 pouze prvního segmentu *ISEQ*=1 hlavička pokračuje. Následuje konverzní faktor pro ozáření z mraku, který se použije dále - viz vztah (19) v Krok 1 proceduře pro výpočet ozáření z mraku, tentokrát pomocí modelu polonekonečného modelu mraku. Dále je hlavička rozšířena o hodnotu konverzního faktoru pro inhalaci $\text{GIN}(\text{eff}, \text{dospělí}, \text{nuklid})$ a za ní bezprostředně následuje hodnota konverzního faktoru pro inhalaci pro kojence $\text{GIN}(\text{eff}, \text{kojenci}, \text{nuklid})$ – viz (11). To umožní výpočet úvazků dávkového příkonu a efektivní dávky pro dospělé a kojence z inhalace od hodinové sekvence (*ISEQ, KFAZ*) tak, že se zpracují pouze předem napočítané výsledky ze souboru SEG.TIC.OUT. Příkon \hat{H}_{inh}^n v [Sv/s] efektivní dávky z inhalace dospělých v čase *iseq + kfaz* - 1 v místě (*i, k*) je dán výrazem

$$\hat{H}_{inh}^n(i, k; \text{iseq}, \text{kfaz}) = \text{GIN}(\text{eff}, \text{dospělí}, n) * \hat{E}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) \quad (12)$$

zde \hat{E}^n je vteřinový příjem radionuklidu dýcháním, který je daný součinem přízemní objemové aktivity v místě a rychlostí dýchání (pro dospělého vezmi hodnotu $u_{dospeli} = 2.70\text{E-}04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Je zřejmé, že v rámci přímočarého šíření hodinové sekvence (*ISEQ, KFAZ*) lze přízemní objemovou aktivitu nahradit výrazem $\text{TICFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) / 3600$ (tudíž nemusíme v této fázi do výpočtů zavlékat další výsledky pro přízemní objemovou aktivitu vyjadřovanou schématem $\text{CAPFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ})$ a konkrétním souborem SEG.CAP.OUT). Výraz (12) přechází do tvaru:

$$\hat{H}_{inh}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) = \text{GIN}(\text{eff}, \text{dospělí}, n) * u_{dospeli} \cdot \text{TICFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) / 3600 \quad (13)$$

$\text{TICFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ})$ se vybírají přímo ze souboru SEG.TIC.OUT se strukturou podle (11). Pokud bude požadavek, lze použít přepočtení: \hat{H}_{inh}^n v [Sv/s] = \hat{H}_{inh}^n * 3600 * 1000 v [mSv/hod]

Úvazky dávek z inhalace [Sv] za jednu hodinu během hodinové sekvence (*ISEQ, KFAZ*) vyjádříme s využitím (12) podle:

$$H_{inh}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) = \text{GIN}(\text{eff}, \text{dospělí}, n) * E^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) = \quad (14)$$

$$= \text{GIN}(\text{eff}, \text{dospělí}, n) * u_{\text{dospeli}} \cdot \text{TICFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ})$$

kde E^n je aktivita nadýchaná za 1 hodinu dospělým jedincem na otevřeném prostranství v místě (i, k) počínaje časem $\text{ISEQ} + \text{KFAZ} - 1$ do $\text{ISEQ} + \text{KFAZ}$, neboli od hodiny $T_{\text{REF}} - 1$ do T_{REF} .

Konečně přikročíme k vyjádření sumárních hodnot pro cestu inhalace přes všechny relevantní hodinové sekvence $(iseq, kfaz)$. **Rozložení dávkového příkonu** od inhalace na terénu v (i, k) od radionuklidu n přesně v okamžiku zvoleného času T_{REF} od počátku kontinuálního úniku se počítá podle schématu:

$$\hat{H}_{inh, \text{TOT}}^n(T_{\text{REF}}; i, k) = \sum_{iseq+kfaz-1=T_{\text{REF}}} \left\{ \hat{H}_{inh}^n(i, k; iseq, kfaz) \right\} \quad (15)$$

Relevantní sekvence jsou určeny vztahem $\text{ISEQ} + \text{KFAZ} - 1 = T_{\text{REF}}$. Celkový dávkový příkon od všech nuklidů je

$$\hat{H}_{inh, \text{TOT}}(T_{\text{REF}}; i, k) = \sum_{(n)} \hat{H}_{inh, \text{TOT}}^n(T_{\text{REF}}; i, k) \quad (16)$$

Rozložení úvazku efektivní dávky dospělých z inhalace [Sv] na terénu (i, k) od radionuklidu n od počátku úniku do uživatelem zvoleného času T_{REF} se počítá opět přes relevantní sekvence $(iseq, kfaz)$ a s využitím (14) jako:

$$H_{inh, \text{TOT}}^n(T_{\text{REF}}; i, k) = \sum_{ipuf=1}^{ipuf=T_{\text{REF}}} \left\{ H_{inh}^n(i, k; iseq, kfaz) \right\} \quad (17)$$

Zde $ipuf = iseq + kfaz - 1$. Pro výběr relevantních různých odpovídajících sekvencím $(iseq, kfaz)$ platí $iseq + kfaz - 1 \leq T_{\text{REF}}$. Celkový úvazek dávky od všech nuklidů je dán:

$$H_{inh, \text{TOT}}(T_{\text{REF}}; i, k) = \sum_{(n)} H_{inh, \text{TOT}}^n(T_{\text{REF}}; i, k) \quad (18)$$

3.4.2 Externí ozáření z mraku

Dávkový příkon z mraku: Krok 1: Pro všechny vzdálenosti kromě blízké oblasti definované hodinovými sekvencemi (ISEQ, KFAZ=1) (tedy první hodinové fáze každého hodinového segmentu úniku) je použit polonekonečný model ozáření z mraku.

První možností je využít výsledky pro přízemní objemovou aktivitu vyjadřovanou schématem $\text{CAPFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ})$ a konkrétním souborem SEGCAP.OUT). Jak bylo řečeno výše, v rámci přímočarého šíření hodinové sekvence $(\text{ISEQ}, \text{KFAZ})$ lze přízemní objemovou aktivitu nahradit výrazem $\text{TICFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ}) / 3600$ (tudíž nemusíme v této fázi do výpočtů zavlékat další data CAPFAZ^n). Hodnoty $\text{TICFAZ}^n(i, k; \text{ISEQ}, \text{KFAZ})$ se vybírají přímo ze

souboru SEGTIC.OUT se strukturou podle (11). V analogii se vztahem (13) zavedeme dávkový příkon z ozáření z mraku v důsledku hodinové sekvence ($ISEQ, KFAZ$) podle:

$$\hat{H}_{mrak}^n(i, k; ISEQ, KFAZ) = R_{mrak}^n(\text{eff, dospělí}) \cdot TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ) / 3600 \quad (19)$$

Konverzní faktor $R_{mrak}^n(\text{eff, dospělí})$ je uveden ve výsledkových různých podle (11). Rozložení dávkového příkonu od ozáření z mraku na terénu od radionuklidu n od počátku úniku do okamžiku T_{REF} od všech relevantních hodinových sekvencí (pro něž platí $iseq + kfaz - 1 = T_{REF}$) počítáme podle:

$$\hat{H}_{mrak, TOT}^n(T_{REF}; i, k) = \sum_{iseq+kfaz-1=T_{REF}} \left\{ \hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz) \right\} \quad (20)$$

Celkový dávkový příkon z ozáření z mraku od všech nuklidů v okamžiku T_{REF} od počátku úniku je pak dán:

$$\hat{H}_{mrak, TOT}(T_{REF}; i, k) = \sum_{(n)} \hat{H}_{mrak, TOT}^n(T_{REF}; i, k) \quad (21)$$

Dávkový příkon z mraku: Krok 2: Oprava hodnot pro případ **stabilního atmosférického zvrstvení** v blízké vzdálenosti od místa úniku. **Pro hodinové sekvence ($ISEQ, KFAZ=1$)** (tedy první hodinové fáze každého hodinového segmentu úniku) **je použita oprava na konečný rozměr mraku.**

Jedná se o postup uvedený v sekci 11 v [2]. Počítá se dávkový příkon v ose mraku v efektivní výšce úniku. Příslušný příkon v přízemní vrstvě se počítá z této hodnoty v ose mraku přenásobením opravným faktorem. To vše je provedeno uvnitř programu a je produkován výsledek ve formě pole SEGMRK.OUT. První řádek souboru je hlavička:

$$\#MRK:KR85M \text{ Příkon efektivní dávky z mraku Sv/s } ISEQ,FAZE= 1 \quad (22)$$

Pro každý nuklid z úniku následuje různice s 80ti řádky (úhlové sektory), každá řádka má 42 hodnot pro radiální pásma 1 až 42 (t. zn. od 50ti metrů do 97 500 metrů). V této různici jsou opravené dávkové příkony z mraku jen pro 1. hodinovou meteofázi $NFAZ=1$ (!!!) každého hodinového segmentu úniku NSEQ. Tyto hodnoty jsou schematicky označené jako

$\overset{OPRAVA}{\hat{H}_{mrak}^n}(i, k; iseq, kfaz = 1)$ a jsou konkrétně zapsané v souboru SEGMRK.OUT a bereme

je odtud přímo. Hodnoty $\hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz > 1)$ jsou z Krok1 a počítáme je podle (19), kde $TICFAZ^n(i, k; ISEQ, KFAZ)$ se vybírají přímo ze souboru SEGTIC.OUT se strukturou podle (11). Potom dávkové příkony v okamžiku T_{REF} jsou dány součtem:

$$\begin{aligned}
{}^{OPRAVA} \hat{H}_{mrak,TOT}^n(T_{REF}; i, k) &= \sum_{\{iseq+kfaz-1=T_{REF}\}, kfaz>1} \left\{ \hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz > 1) \right\} + \\
&+ \sum_{\{iseq+kfaz-1=T_{REF}\}, kfaz=1} \left\{ {}^{OPRAVA} \hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz = 1) \right\}
\end{aligned} \quad (23)$$

Je zřejmé, že celkový dávkový příkon z ozáření z mraku od všech nuklidů v okamžiku T_{REF} od počátku úniku je dán součtem přes všechny nuklidy analogicky s (21). Při interpretaci výsledků je třeba mít na paměti, že klasický přístup užívající tuto přibližnou metodiku korekčních faktorů má celou řadu omezení (kontinuální šíření konečného mraku pro $x \rightarrow \infty$, jediná energie fotonů a řada dalších). Dnes již tento problém máme vyřešen zavedením nového algoritmu, který bude implementován do rutinního užití. Ukazuje se, že pro stabilní zvrstvení je nezbytné uvažovat korekci na konečný rozměr mraku. Pro vysoké úniky jsou výrazné vlivy i pro neutrální situaci D až do vzdáleností několika kilometrů (existují dílčí studie k této problematice).

Výpočty dávek z externího ozáření z mraku: Zpracování bude jednodušší, pokud si znovu uvědomíme, že máme vypočtené dávkové příkony od hodinových sekvencí ($iseq, kfaz$). Dávku z ozáření z mraku akumulovanou na terénu (i, k) za jednu hodinu během hodinové sekvence ($iseq, kfaz$) jednoduše vyjádříme jako $\hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz > 1) \times 3600$ resp. ${}^{OPRAVA} \hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz = 1) \times 3600$. Příslušné dávkové příkony jsou tedy přenásobeny konstantou 3600. Dávka z ozáření z mraku radionuklidem n od počátku úniku do uživatelem zvoleného času T_{REF} se počítá opět přes relevantní sekvence ($iseq, kfaz$) jako:

$$\begin{aligned}
H_{mrak,TOT}^n(T_{REF}; i, k) &= \sum_{\{iseq+kfaz-1 \leq T_{REF}\}, kfaz>1} \left\{ \hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz > 1) \right\} \times 3600 + \\
&+ \sum_{\{iseq+kfaz-1 \leq T_{REF}\}, kfaz=1} \left\{ {}^{OPRAVA} \hat{H}_{mrak}^n(i, k; iseq, kfaz = 1) \right\} \times 3600
\end{aligned} \quad (24)$$

Pro výběr relevantních různých odpovídajících sekvencím ($iseq, kfaz$) platí $iseq + kfaz - 1 \leq T_{REF}$.

3.5 Simulace protiopatření

Dále jsou uvedeny možnosti simulace protiopatření implementované v uživatelském rozhraní k segmentovaným výstupům ze softwarové komponenty HDET 42 systému HARP. Konkrétní podrobnosti jsou uvedeny v doplňku [D1] tohoto reportu: „Textové uživatelské rozhraní k segmentovaným výstupům z disperzního modelu“. Zde jsou také popsány možnosti zadávání kombinací různých protiopatření.

3.5.1 Jódová profylaxe

Předpoklady: Jódové tablety distribuovány s dostatečným předstihem, takže korekční faktor uspořené inhalační dávky $a = 0$ (max efektivita tablet, $a=a(t)$ až v příštím roce).

Provádíme první odhad snížení úvazku příkonu ekvivalentní dávky resp úvazku ekvivalentní dávky na štítnou žlázu z inhalace. Úvazky budou sníženy o odvrácenou dávku danou sumou podle (16), kde se sčítá pouze přes izotopy jódu I131, I132, ... , I135 (případně přes všechny jejich fyzikálně-chemické formy). Odvrácená dávka (full thyroid blocking) je pak dána sumou (16), kde se nyní dosazují

$$\hat{H}_{inh}^n(i,k; iseq, kfaz) \dots \text{ze vztahu (13)}$$

$$H_{inh}^n(i,k; iseq, kfaz) \dots \text{ze vztahu (14)}$$

ale pouze pro $n = I131, \dots, I135$

Pro dospělé se dosazuje $GIN(\text{thyro}, \text{dospělí}, n) * u_{dospeli}$, pro kojence se nahrazuje výrazem

$$GIN(\text{thyro}, \text{kojenci}, n) * u_{kojenci}.$$

$$\text{Intenzita dýchání } u_{kojenci} = 3.17E-05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_{dospeli} = 2.70E-04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Tato redukce ekvivalentních úvazků na štítnou žlázu vede ke snížení úvazků efektivní dávky z inhalace (po přenásobení váhovým faktorem pro thyroid w_{TH}).

Poznámka: V modulu EMERSIM systému RODOS pro simulaci protiopatření je zaveden faktor a zohledňující metabolismus vstřebávání jódu ve štítné žláze v závislosti na čase podání tablet vzhledem k příchodu mraku. Potom efektivní dávka resp. její příkon z inhalace bude snížena o odvrácenou dávku:

$$w_{thyro} (1-a) * \hat{H}_{inh}^n(i,k; iseq, kfaz) \dots \text{ze vztahu (13)}$$

$$* H_{inh}^n(i,k; iseq, kfaz) \dots \text{ze vztahu (14)}$$

Pro případ podání tablet v dostatečně dlouhé době před příchodem mraku (zhruba poločas 4 hodiny) je $a=0$. w_{thyro} je váhový faktor pro štítnou žlázu, $w_{thyro} = 0.05$.

3.5.2 Ukrytí

Předpoklady: Posuzujeme vliv ukrytí v časovém intervalu $\langle T1 ; T2 \rangle$ (případně v prostorové doméně G)

Použijí se lokační úkrytové faktory F^{cesta} (intenzita) z RODOS: podle hustoty osídlení P osob/km²

Osoby/km ²	open air	< 100	100 – 250	>250
Intenzita stínění	žádná	nízká	střední	vysoká
Ozáření z mraku	1.0	0.8	0.5	0.2
Ozáření z depozice	1.0	0.5	0.1	0.01
Inhalace	1.0	0.5	0.5	0.5

Jsou možné varianty ukrytí:

1. Ukrytí před příchodem mraku a výpočet odvrácených dávek
2. Obecněji: Ukrytí obyvatel: začátek po T_1 hodinách od počátku úniku až do času T_2 hodin; potom bez ukrytí.

Zatím je prováděna aplikace na celou oblast. Alternativou by mohly být scénáře ukrytí podle počtu obyvatel na dlaždici (možná podle polohy měst) s vyjádřením pomocí kolektivních dávek.

Algoritmus pro dávky za 2 (nebo 7) dny podle bodu 2:

$$\begin{aligned} \text{Dávka } H^{\text{tot}} (0 \rightarrow T_1-1) &= H^{\text{tot}}_{\text{mrak}} (0 \rightarrow T_1-1) + H^{\text{tot}}_{\text{depo}} (0 \rightarrow T_1-1) + H^{\text{tot}}_{\text{inhal}} (0 \rightarrow T_1-1) \\ &= \text{rov.}(24) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_1-1 + \text{rov.}(9) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_1-1 + \text{rov.}(17) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_1-1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dávka } H^{\text{tot}} (T_1 \rightarrow T_2) &= F^{\text{mrak}}(\text{intenzita}) * H^{\text{tot}}_{\text{mrak}} (T_1 \rightarrow T_2) + \\ &\quad \text{rov.}(24) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_2 \text{ minus rov.}(24) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_1-1 \\ &\quad + F^{\text{depo}}(\text{intenzita}) * H^{\text{tot}}_{\text{depo}} (T_1 \rightarrow T_2) + \\ &\quad \text{rov.}(9) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_2 \text{ minus rov.}(9) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_1-1 \\ &\quad + F^{\text{inhal}}(\text{intenzita}) * H^{\text{tot}}_{\text{inhal}} (T_1 \rightarrow T_2) \\ &\quad \text{rov.}(17) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_2 \text{ minus rov.}(17) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_1-1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dávka } H^{\text{tot}} (T_2+1 \rightarrow T) &= H^{\text{tot}}_{\text{mrak}} (T_2+1 \rightarrow T) + \\ &\quad \text{rov.}(24) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T \text{ minus rov.}(24) \text{ pro } T_{\text{REF}}=T_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + H_{\text{depo}}^{\text{tot}} (T2+1 \rightarrow T) \quad + \\
& \text{rov. (9) pro } T_{\text{REF}}=T \quad \text{minus} \quad \text{rov. (9) pro } T_{\text{REF}}=T2 \\
& + H_{\text{inhal}}^{\text{tot}} (T2+1 \rightarrow T) \\
& \text{rov. (17) pro } T_{\text{REF}}=T \quad \text{minus} \quad \text{rov. (17) pro } T_{\text{REF}}=T2
\end{aligned}$$

3.5.3 Evakuace

Nechť v čase T hodin po začátku úniku provedena evakuace obyvatel. Do té doby obdrží jedinec úvazky dávek:

$$\begin{aligned}
\text{Dávka } H^{\text{tot}} (0 \rightarrow T-1) &= H_{\text{mrak}}^{\text{tot}} (0 \rightarrow T-1) + H_{\text{depo}}^{\text{tot}} (0 \rightarrow T-1) + H_{\text{inhal}}^{\text{tot}} (0 \rightarrow T-1) \\
&= \text{rov. (24) pro } T_{\text{REF}}=T + \text{rov. (9) pro } T_{\text{REF}}=T + \text{rov. (17) pro } T_{\text{REF}}=T
\end{aligned}$$

Pak ušetřená (například) 7denní efektivní dávka:

$$\begin{aligned}
H^{\text{tot,eff}}(\text{ušetřená}) &= [\text{rov. (24) pro } T_{\text{REF}}=T_{7d} + \text{rov. (9) pro } T_{\text{REF}}=T_{7d} + \text{rov. (17) pro } T_{\text{REF}}=T_{7d}] - \\
&- [H^{\text{tot}} (0 \rightarrow T-1)]
\end{aligned}$$

4 Příloha č. 2: TWIN experiment: Praktické návody pro scénář přípravy „simulovaných měření“ TWIN.OUT .

Schéma sekvenční asimilační procedury pro případ minimalizačního přístupu je popsáno v [1] v APPENDIX A: STEPWISE RECURSIVE SEQUENTIAL ASSIMILATION SCHEME. Měřené údaje přicházející ze sítě měřících čidel z terénu v jednotlivých časových intervalech (hodinách) jsou ty reálné hodnoty, ke kterým minimalizační algoritmus v procesu mnohonásobného vyvolávání disperzního modelu hledá optimální sadu asimilovaných parametrů modelu (uvolňovaná aktivita, směr a rychlost větru v dané hodině) tak, aby předpovědi modelu pro uvažovanou hodinu se co nejlépe přikláněly k měřením. Problém je v tom, že nejsou k dispozici celá data z reálného úniku. Proto pro verifikaci navržených postupů a případně dále pro cvičné praktické výukové běhy se použije technika „umělého“ generování, kterou nazýváme TWIN experiment. Ideální by bylo, kdyby byly k dispozici výsledky spočítané pomocí nějakého jiného disperzního modelu. My se omezíme na případ, kdy musíme využít stávající model, ve kterém zavedeme fixní porušené hodnoty zvolené sady parametrů modelu. Konkrétně je zvolen multiplikační faktor 7.77 pro uvolňovanou aktivitu. Aby se předešlo identickému experimentu, směr a rychlost větru v jednotlivých hodinách se pro TWIN měření bere podle bodové meteorologické předpovědi FECZ. Disperzní model naopak vychází z HIRLAM předpovědi a postupně by se měl blížit k TWIN hodnotám. V následujícím textu je podán návod, jak zkonstruovat umělou růžici „měření“ v případě, že uživatel nemá lepší možnost, jak simulovat naměřené hodnoty.

Byl vytvořen projekt HAP2013. Zde na začátku je volba FECZ | HIRLAM. Projekt HAP2013 poskytuje SEGMRK.OUT, SEGDEP.OUT, SEGTIC.OUT, SEGCAP.OUT soubory, ze kterých se automaticky konstruují TWIN růžice dávkových příkonů (MRAK + DEPO) v jednotlivých hodinách. Předpovědní model HARP generuje růžice s mřížovou meteorologií HIRL=7. Následující postup je současně podrobným návodem na využití nových interaktivních panelů pro definici vstupů scénáře, běh úlohy a zobrazování výsledků.

Pro experiment je připravena struktura adresářů a typy vstupních dat:

- a) 2012_UTIA_SURO\Vstupni_PANEL_disperze\dist\havar.exe... spuštění vstup panelu: zde si interaktivně vyeditují vstupní soubory
 - b) \VYPOCET\ vstupní soubory, databáze, spouštění EXE : spuštění úlohy
 - c) \Zobrazeni_Vysledku_DUKO\run.bat ... start zobrazování (na mapách DUKO)
 \Zobrazeni_Vysledku_ETE\run.batstart zobrazování (na mapách ETE)
-

Pro uživatele jsou připraveny ilustrativní výpočty v
d:\2012_UTIA_SURO\VYPOCET\RUN_TWIN\ :

TWIN scénář: hodinový únik 3 nuklidů. Hypotetický únik z lokality ETE:

KR88

1.00E17

I131	1.00E15
CS137	1.00E15

Další parametry scénáře lze zkontrolovat a případně měnit v desktopové aplikaci popsané níže.

V separátním adresáři\\VYPOCET\RUN_TWING\..... jsou obsaženy předem připravené kompletní vstupní soubory. Vstupní soubory jsou pojmenovány:

- HIN00_jenStaceni.dat : hlavní disperzní a depoziční vstupy. K vytváření resp modifikaci doporučujeme využít nabízený vstupní panel disperze.
- HAVDB00.DAT : vstupní databáze nuklidů, konverzních faktorů apod. Zde předpřipravena, bez dceřiných produktů.
- Lokální databáze: FOREST.DAT, HLOK00.DAT : typ zemského povrchu, drsnosti, orografie, obyvatelstvo na dlaždicích apod. Připraveno pro obě lokality ETE a EDU, pro 42 radiálních vzdáleností, netřeba měnit.
- METEO.WEA : Bodová meteorologická předpověď na dalších 48 hodin.
- ZASEBOU.TXT : Meteorologická předpověď na dalších 48 hodin – 2D polární mříž pro okolí 200 x 200 km kolem jaderného zdroje.
- Ingesční data: SUROING.DAT, SURO2.DAT. Zde připravena konzervativní data (lokální koš apod.). Zatím neměnit, při budoucích testech ingesce je připraveno interaktivní zadávání přes obrazovkové panely.
- NAHADM.DAT, NAHDOS.DAT, NAHFCEM.DAT : neměnit, teď se nepoužívají, jsou předpřipraveny pro pravděpodobnostní výpočty.
- Spuštění vlastního výpočtu: HARP2013.exe

Postup analýzy scénáře TWIN

- Veškeré modifikace vstupů, vlastní výpočet a prohlížení výstupů probíhají uvnitř:

d:\2012_UTIA_SURO\VYPOCET\RUN_TWING\.....

Prohlížení a případná modifikace vstupních dat „hin00_jenStaceni.dat“ resp „METEO.WEA“ doporučujeme opět užít interaktivního subsystému disperzních vstupů, který je adresáři „Vstupni_PANEL_disperze“:

- Spustí se: d:\2012_UTIA_SURO\Vstupni_PANEL_disperze\panely_cesky.bat

Zobrazí se vstupní disperzní panel. Nyní si chci prohlédnout, co vlastně vstupovalo do předchozího výpočtu, konkrétně zmíněné „hin00_jenStaceni.dat“ resp „METEO.WEA“ . V panelu kliknu na ikonku „otevři z archivu“ a načti

d:\2012_UTIA_SURO\VYPOCET\RUN_TWING\ hin00_jenStaceni.dat .

Zde je možno zobrazit PANEL1, PANEL2 (segmenty a grupa nuklidů) a PANEL3 – meteo.wea:

PANEL1: Základní parametry

PANEL2: Segmenty a grupy nuklidů

MODELY PROHLÍZENÍ VÝSLEDKŮ

DISPERZNÍ MODEL INGESČNÍ MODEL

ZÁKLADNÍ PARAMETRY OCHUZOVÁNÍ VLEČKY BLÍZKÉ OBJEKTY **SEGMENTY ÚNIKŮ A GRUPY NUKLIDŮ** METEOROLOGICKÉ SEKVENCE

Dostupné nuklidy

- H3
- BE7
- C14
- F18
- NA22
- NA24
- CL38
- AR41
- K42
- CR51
- MN54
- MN56
- FE55

➔

➔

Vybrané nuklidy

- KR88
- I131
- CS137

Název zdrojového členu

Popis zdrojového členu

Počet segmentů 1

Vlastnosti jednotlivých segmentů

	1
doba úniku [hod]	1.0000
tepelná vydatnost [kW]	0.0
vertikální rychlost [m/s]	0.0
výška zdroje úniku [m]	44.0

Zdrojový člen v jednotlivých hodinách

	1
KR88	1.00E+17
I131	1.00E+15
CS137	1.00E+15

Aktuální meteo máme dále na následujícím PANEL 3 - opět zobrazeno přes lištu „Meteorologické sekvence“ načtením METEO.WEA z aktuálního výpočtu d:\2012_UTIA_SURO\VYPOCET\RUN_TWING\METEO.WEA .

PANEL 3:

DISPERZNÍ MODEL INGESČNÍ MODEL

ZÁKLADNÍ PARAMETRY OCHUZOVÁNÍ VLEČKY BLÍZKÉ OBJEKTY SEGMENTY ÚNIKŮ A GRUPY NUKLIDŮ METEOROLOGICKÉ SEKvence

Typ meteorologických dat

Stáčení segmentu podle bodových hodinových meteosekvencí

Stáčení segmentu podle hodinových bodových předpovědí

Načíst meteo z archivu Uložit meteo do archivu

Titulní řádka

TIMESTAMP=2009090323 hodina v roce=5903.00 smer=280.00, dano 270.00

Počasí v jednotlivých segmentech

	Trvání [hod]	Počatek [hod]	Směr větru [deg]	Rychlost větru [m/s]	Kat. počasí (A-F)	Srážky [mm/h]
1	1.00	5903.00	270.0	2.30	E	0.00
2	1.00	5904.00	238.0	2.70	D	0.00
3	1.00	5905.00	230.0	2.10	D	0.00
4	1.00	5906.00	224.0	1.50	D	0.00
5	1.00	5907.00	225.0	1.10	D	0.00
6	1.00	5908.00	195.0	1.10	D	0.00
7	1.00	5909.00	185.0	1.50	D	0.00
8	1.00	5910.00	188.0	2.50	D	0.57
9	1.00	5911.00	184.0	2.70	D	0.89
10	1.00	5912.00	166.0	2.40	D	0.71
11	1.00	5913.00	148.0	2.30	C	0.47
12	1.00	5914.00	155.0	2.70	C	1.04
13	1.00	5915.00	144.0	3.20	C	0.91
14	1.00	5916.00	169.0	3.30	C	0.00
15	1.00	5917.00	176.0	3.50	C	0.00
16	1.00	5918.00	169.0	3.60	D	0.11
17	1.00	5919.00	166.0	3.40	C	0.08
18	1.00	5920.00	167.0	3.30	D	0.00
19	1.00	5921.00	161.0	3.90	D	0.00
20	1.00	5922.00	176.0	3.80	D	0.00

Takto zobrazíme, co se aktuálně počítá. Při tomto zobrazování lze měnit i hodnoty v panelech pro další výpočty (popřípadě si ještě archivovat varianty).

- Po skončení shora popsaného editování vstupů se spustí běh úlohy:

d:\2012_UTIA_SURO\VYPOCET\RUN_TWIn\HARP2013.exe

Po zahájení se program zeptá na ověření varianty a dále na to, jaká meteorologická předpovědní data použít:

- ' Default meteodata: bodova FECZ '
- ' Zmenit na 3-D metepredpovedi HIRLAM? :',
- ' ano (ENTER) | ne (n) '

FECZ: jsou bodové předpovědi pro místo JE na příštích 48 hodin – pro každou hodinu zadávány 4 hodnoty: směr větru, rychlost větru, kategorie stability atmosféry a hodinové srážkové intenzity.

HIRLAM: hodinové předpovědi vždy na celé polární výpočetní mříži – pro každou hodinu různě směru větru, rychlosti větru, kategorií stability atmosféry a srážkové pole.

Doporučení: Neměnit a počítat TWIn.OUT s default meteodaty FECZ.

- Prohlížení výsledků pomocí spuštění :
\Zobrazeni_Vysledku_DUKO\run.bat ... start zobrazování (na mapách DUKO)

\\Zobrazeni_Vysledku_ETE\run.batstart zobrazování (na mapách ETE)

!!! Předtím musí být soubory SEGCAP.OUT, SEGTIC.OUT, SEGDEP.OUT, SEGMRK.OUT, SEGTID.OUT překopírovány do:

d:\2012_UTIA_SURO\Zobrazeni_Vysledku_ETE\vstupy\

(Bude též prováděno automaticky, zatím ručně.)

ZÁVĚR:

V implicitních výstupech HARP2013 **nejso** výsledné růžice depozičních příkonů (MRAK + DEPO) pro jednotlivé hodiny. Jsou zde jen růžice dávkových příkonů #DPT vztažené k okamžiku TOBSER (například pro 24 hodin). To se ale pro TWIN experiment v časné fázi nedá využít. Nicméně jsou k dispozici detailní hodinové soubory SEGCAP.OUT, SEGTIC.OUT, SEGDEP.OUT, SEGMRK.OUT, SEGTID.OUT. Je připraven interaktivní konverzační skript zmíněný zde v sekci 1.2.1 s volbami na Obr. 1. Volby 85 a 86 jsou zaměřeny přímo na interaktivní podporu TWIN experimentu. Po těchto volbách jsou automaticky generovány růžice #DPT pro jednotlivé hodiny TWIN=1,2,...,NFAZ a uloženy do nového souboru TWIN.OUT.

Pro to, aby provedení TWIN experimentu mohlo být dokončeno, jsou prováděny další kroky:

- 1) Definice prostorové sítě senzorů kolem jaderného zdroje: Načtení vhodné konfigurace do Editoru Senzorů (ES – podrobný popis je v doplňku [D2]) na příslušné mapové pozadí, rozšíření/redukce počtu čidel, uložení nové konfigurace čidel, konverze hodnot v TWIN.OUT z hodnot v uzlových výpočetních bodech do hodnot v nově vyeditované konfiguraci senzorů pomocí operátoru pozorování (minimálně bilineární interpolace), zápis rekonfigurované TWIN.OUT (rozměr roven počtu senzorů v síti).
- 2) Běh asimilační úlohy minimalizačního přístupu popsaného v [1] v APPENDIX A: STEPWISE RECURSIVE SEQUENTIAL ASSIMILATION SCHEME, APPENDIX B: Detailed description of the stepwise nonlinear minimisation algorithm in the early phase of a radiation accident.

5 Příloha č. 3: Generování náhodných realizací matic depozičních příkonů v projektu Balnahod_2013.

Uvažujme jako základní scénář hodinový únik Cs137 s uvolněnou aktivitou 1.10^{12} Bq/hod

Alternativně lze zvolit předpovědi počasí podle:

1. FECZ bodové, stáčení v každé hodinové fázi f (v celém prostoru náraz) podle bodové předpovědi v hodině f **pro místo úniku**. Provádí se v projektu BalNAHOD_FECZ2013.
2. HIRLAM gridové, stáčení pro jednotlivou hodinovou fázi f podle HIRLAM_{nom} předpovědi **pro konkrétní střed gauss kapky** (XBOD($f-1$), YBOD($f-1$)) v předchozí fázi $f-1$ (t. zn. kam se až rozšířila předchozí kapka v hodině f). Provádí se v projektu BalNAHOD_HIRL2013.

(V 1. kroku proveden výpočet pro JREAL=1 \Rightarrow 1. realizace \equiv nominální)

SMYČKA VÝPOČTU:

LABEL1:

JREAL=JREAL+1- generování náhodných faktorů pro zvolené parametry modelu:

- 1) Globální parametry – neurčitosti ovlivňují náraz celou oblast, například :
 - C1RAT: únik=únik(nom)*C1RAT; C1RAT \in relativně: LogUni <1;100>, median=1
 - C2RAT: horizontální disperse SIGMA: ořezané lognormální
 - C3RAT: tento parameter rezervován pro HMIX – zatím 1.0
 - C4RAT: multiplikátor rychlosti suché depozice Vg
- 2) Daná realizace se pohybuje až 24 hodin po terénu, tedy pro jednotlivé hodinové faze postupu $f=1, \dots, 24$ jsou generovány trojice:

Náhodný směr v 10 m nad zemí – další unášení hodinové fáze (kapky) v další fázi (hodině) f :

- SMERY(f)= SMERN(f) + CSMERY(f)

SMERN(f) nominal směr pro fázi f :

- Pro BalNAHOD_FECZ2013 = směr předpovídaný z FECZ **pro místo uniku** v hodině f
- Pro BalNAHOD_HIRL2013 = směr předpovědi z HIRLAM **pro bod středu gauss kapky (XBOD($f-1$), YBOD($f-1$))** hodině $f-1$

CSMERY(f) \in N(SMERN(f)); SIG=13.5°, 3xSIG omezené

Náhodná rychlost v 10 m nad zemí – další unášení hodinové fáze (kapky) v další fázi (hodině) f :

- U10AR(f)=U10ARN(f) * (1.0+0.1*CU10AR(f)) + 0.5*CU10AR(f);

U10ARN(f) nominal rychlost pro fázi f :

- Pro BalNAHOD_FECZ2013 = rychlosti předpovídané z FECZ **pro místo uniku** v hodině f

-Pro BalNAHOD_HIRL2013 = směr předpovědi z HIRLAM **pro bod středu gaus kapky (XBOD(f-1),YBOD(f-1))** hodině f-1
Faktor neurčitosti rychlosti vlečky ve výšce 10 metrů:
CU10AR(f) ∈ UNIFORM <-1, +1>, median=0

Náhodné srážky: prší ve fázi f (mm/hod):

• SRAZK(f) = SRAZKN(f)*CSRAZK(f) ;

SRAZKN(f) = nominal srážky předpovězené pro fázi f ;

- Pro BalNAHOD_FECZ2013 = srážky předpovídané z FECZ **pro místo uniku** v hodině f – aplikace **na celou oblast!**

- Pro BalNAHOD_HIRL2013 = srážky podle předpovědi z HIRLAM **pro bod středu gaus kapky (XBOD(f-1),YBOD(f-1))** v hodině f-1: aplikovány **pouze** na hodinový pohyb jediné gauss kapky při jejím pohybu v hodinové fázi f

CSRAZK(f) generovány z UNIFORM <0, +2>, takže náhodné srážky SRAZK(f) jsou z UNIFORM <0, 2 SRAZKN(f) >, median= SRAZKN(f)

Pokračování: Komplettní provedení výpočtu náhodné trajektorie JREAL, zápis růžice #DPT na konec souboru IMPLICIT.OUT

GO TO LABEL1

=====

6 Literatura

- [1] V. Šmídl, R. Hofman, P. Pecha: Data assimilation methods used in the ASIM module. UTIA research report 2333, listopad 2013
- [2] P. Pecha, E. Pechová: Validace a aplikace environmentálního modelu HARP. UTIA research report 2335, listopad 2013
- [3] P. Pecha: Návrh metodiky generování pravděpodobnostních charakteristik cílových veličin v modelech šíření radionuklidů životním prostředím. Dokumentace k Etapě E 01 g) projektu 6/2003. Praha, červen 2004
- [4] P. Pecha: Analýza neurčitostí charakteristik vstupních parametrů do modelů šíření radionuklidů při únicích do životního prostředí. Dokumentace k Etapě E 01 f) projektu 6/2003. Praha, květen 2004
- [5] P. Pecha, E. Pechová: Pravděpodobnostní přístup k predikci důsledků úniku radioaktivity do životního prostředí. Závěrečná zpráva projektu 6/2003 k etapám E 02 b), c), d). Praha, prosinec 2004
- [6] M.R.Beychok: Error propagation in Air Dispersion modeling. Newport Beach, California, USA. <http://WWW.air-dispersion.com/feature.html>. Český překlad z Dokumentace k Etapě E 01 f) projektu 6/2003. Praha, červen 2004
- [7] P. Pecha, L. Housa: Od deterministických odhadů k pravděpodobnostnímu hodnocení. BJE 15 [53], 3/4, 2007, str.115-127

- [8] Hofman Radek, Pecha Petr : Application of regional environmental code HARP in the field of off-site consequence assessment, International Topical Meeting on Probability Safety Assessment and Analysis, Probability Safety Assessment 2011, (Wilmington, NC, US, 13.03.2011-17.03.2011) [2011]
- [9] Pecha P., Pechová E.: Popis metodiky programu HAVAR-DET, publikace grantu MV – VG20102013018, Praha, březen 2011. *Online na webu: asim.utia.cas.cz, kategorie Vystupy 2011 citace [15]*
- [10] Pecha P., Pechová E., Hofman R.: Uživatelský manuál programu HAVAR-DET, publikace grantu MV – VG20102013018, Praha, březen 2011. *Online na webu: asim.utia.cas.cz, kategorie Vystupy 2011, citace [16]*
- [11] R. Hofman, P. Pecha, J. Hošek: Comparison of numerical weather prediction models for purposes of atmospheric dispersion modeling within the grant project MV ČR VG20102013018, Research report UTIA, No. 2313, Prague, December 2011 *Online*
- [12] R. Hofman, P. Kuča, P. Pecha: Problémy s predikcí šíření radioaktivního znečištění při specifických meteorologických podmínkách, XXXII. Dny radiační ochrany - sborník abstraktů, XXXII. Dny radiační ochrany, (Třeboň, CZ, 08.11.2010-12.11.2010)
- [13] R. Hofman, P. Kuča, P. Pecha: Vliv variability meteorologických podmínek na odhady důsledků dlouhodobých úniků radioaktivity, XXXII. Dny radiační ochrany - sborník abstraktů, XXXII. Dny radiační ochrany, (Třeboň, CZ, 08.11.2010-12.11.2010)
- [14] Pecha Petr, Hofman Radek, Kuča P., Zemánková K. : Development of software tools for consequence assessment of aerial radioactive discharges , Bezpečnost jaderné energie, p. 147-157 [2010]

Doplňky: Popis skriptů samostatně uvedených na webu ASIM:

- [D1] Textové uživatelské rozhraní k segmentovaným výstupům z disperzního modelu.
- [D2] Interaktivní editor monitorovací sítě kolem ETE nebo EDU.
- [D3] Zobrazovací modul k 2-D výstupům z pravděpodobnostních běhů.