

Metodika schválená orgánem státní správy

On-line analýza spekter HPGe detektoru v síti MRS

Zpracovatel:

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i.

Bartošková 1450/28, 140 00 PRAHA 4 - Nusle

**Název programu, název a číslo projektu:**

MV ČR (kód VH20202021048): *Včasná identifikace nízkých koncentrací radioaktivního aerosolu na území České republiky.*

Autoři:

Ing. Miroslav Hýža

SÚRO, v.v.i.

Bc. Mahulena Kořistková

SÚRO, v.v.i.

Rok uplatnění metodiky 2022

<b>Metodika</b>	List: 2 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

## Obsah

<b>Pojmy, zkratky a symboly</b>	3
<b>Cíl metodiky</b>	3
<b>Princip metody</b>	3
<b>Požadavky na přístrojové vybavení</b>	4
Nastavení energetického rozsahu a energetická kalibrace	5
Účinnostní kalibrace	5
Stabilizace spektra	5
<b>On-line analýza</b>	5
Spektrometrický modul	6
Trajektoriový modul	6
Výstupní datový formát	7
Vizualizace	7
<b>Novost metody</b>	9
<b>Uplatnění metodiky</b>	9
<b>Navazující dokumentace</b>	9
<b>Přílohy</b>	10
<b>Literatura</b>	10
<b>Příloha 1 - Seznam parametrů zapisovaných do RTD souboru</b>	11

<b>Metodika</b>	List: 3 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

## Pojmy, zkratky a symboly

MRS	síť monitorování radiační situace
ROI	oblast zájmu (region of interest)
RTD	výstupní datový formát on-line analýzy (Real Time Data)
MCA	multikanálový analyzátor (multichannel analyzer)
HPGe	germaniový spektrometr
PCR	metoda odečtu přírodního pozadí (Principle Component Regression)
QA	kontrola kvality (quality assessment)
AC	aktivní chlazení (active cooling)
HDD	hard disk
CPU	centrální procesorová jednotka (procesor)
RAM	operační paměť
XML	rozšiřitelný značkovací jazyk (datový typ)
JSON	JavaScriptový objektový zápis (datový typ)

## Cíl metodiky

Cílem metodiky je poskytnout podklad pro vytvoření systému včasné detekce radioaktivního aerosolu v ovzduší pro potřeby sítě monitorování radiační situace (MRS). Je určena pro laboratoře vybavené velkoobjemovým zařízením pro odběr aerosolu s možností kontinuálního měření deponované aktivity na filtru prostřednictvím polovodičové spektrometrie záření gama. Metodika shrnuje základní požadavky na přístrojové vybavení a softwarové zpracování monitorovacích dat v on-line režimu. Popsána je základní logika analýzy s odkazy na programový manuál softwaru VIRA, kde je popsána konkrétní implementace algoritmů analýzy.

## Princip metody

Metoda popisuje způsob analýzy gama-spekter získávaných v online režimu prostřednictvím HPGe detektoru umístěného nad aerosolový filtr, přes který je kontinuálně prosávána vzdušina. Princip metody je založen na globální analýze spekter, která využívá spektrometrickou informaci z celého energetického rozsahu pro odečet příspěvku přírodního pozadí. Pro správnou funkci metody je nutné mít k dispozici reprezentativní soubor měření pozadí, který je dále využit pro dekonvoluci analyzovaného spektra. Výstupem je buď regresní koeficient pro vybrané umělé radionuklidy, nebo statistika odvozená z reziduální četnosti impulsů po odečtu pozadí.

Zároveň s analýzou spektra je kontinuálně prováděn výpočet zpětných trajektorií transportu aerosolu do místa měření prostřednictvím atmosférického modelu. Na závěr jsou spektrometrická, atmosférická a další potřebná metadata sloučena do výstupního souboru, na základě kterého je možné reprodukovat celý postup, případně výsledky analýzy vizualizovat.

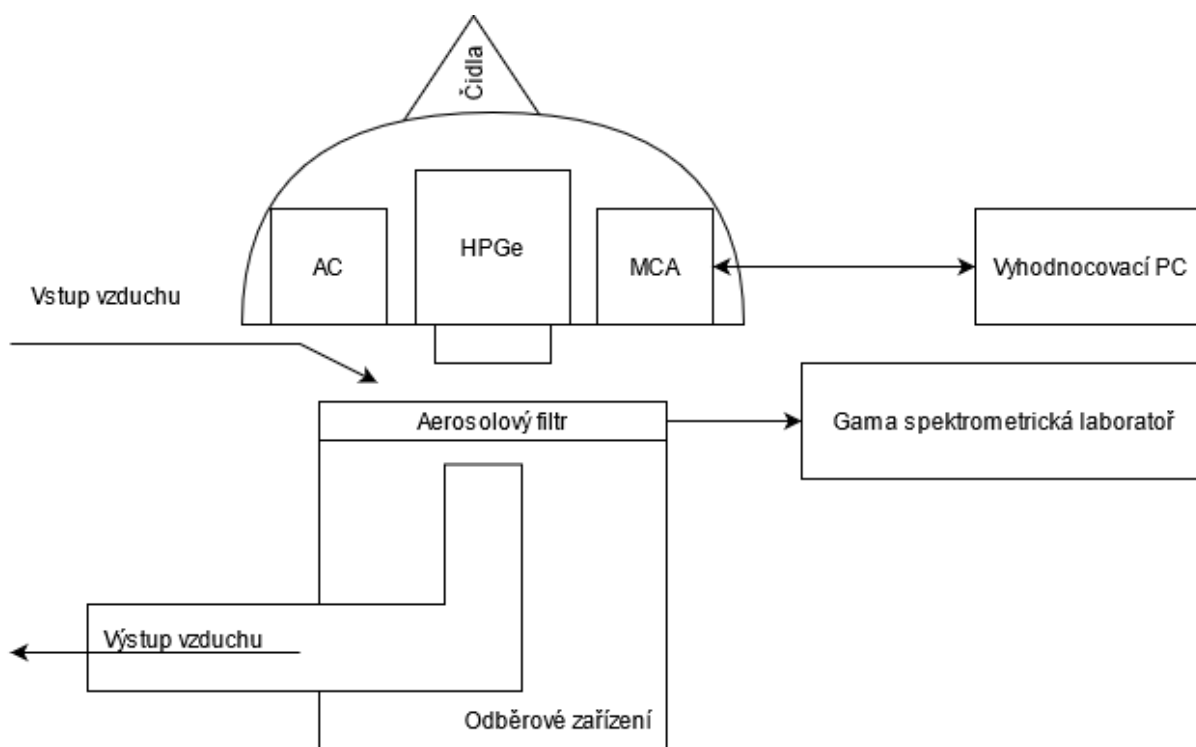
<b>Metodika</b>	List: 4 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

## Požadavky na přístrojové vybavení

Měřicí uspořádání je schematicky znázorněno na diagramu D 1. Nad kontinuálně prosávaný aerosolový filtr v odběrovém zařízení je umístěn spektrometrický modul obsahující citlivý HPGe detektor s obslužnou elektronikou a kontrolou vnitřního prostředí. Změřená spektra jsou přenášena na vyhodnocovací PC, kde probíhá samotná analýza včetně všech uživatelských operací.

On-line analýza slouží ke včasné detekci atmosférické kontaminace, nicméně v důsledku komplikovaného přírodního pozadí je její citlivost ve srovnání se standardním laboratorním postupem řádově nižší. Proto je vhodné instalovat on-line systémy do lokací již vybavených gama spektrometrickou laboratoří a provozovat je jako doplněk k citlivým stanovením umělých radionuklidů.

### D 1 Schéma měřicího uspořádání



Minimální podmínky kladené na hardware on-line systému:

1. odběrové zařízení aerosolu s průtokem vyšším než 100 m<sup>3</sup>/hod a filtry s vysokou účinností zachytu a záznamem průtoku
2. čidla teploty a tlaku prosávaného vzduchu pro případný přepočítání objemu na standardní podmínky
3. elektricky chlazený HPGe detektor s relativní detekční účinností nad 10 %; vzdálenost čela detektoru od filtru je nutné volit s ohledem na ovlivnění proudění vzduchu v okolí detektoru; vhodné uspořádání lze zjistit například analýzou nehomogenity depozice přírodního <sup>7</sup>Be na filtru pro různé vzdálenosti filtr – detektor
4. spektrometrická trasa s multikanálovým analyzátořem (MCA) disponujícím minimálně 16 tis. kanály

<b>Metodika</b>	List: 5 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

5. aktivní chlazení (AC) spektrometrické části, které umožní udržovat provozní podmínky elektricky chlazeného HPGe po celý rok
6. vyhodnocovací PC (minimální požadavky: RAM 16 GB, 4 jádrové CPU, 250 GB HDD) s připojením k internetu

### Nastavení energetického rozsahu a energetická kalibrace

Energetický rozsah detektoru je vhodné nastavit tak, aby pokrýval oblast 50 keV – 3000 keV s rozlišením 16 384 kanálů nebo více. Energetickou kalibraci lze vzhledem k vysokému přírodnímu pozadí provádět přímo na měřeném spektru s využitím píků přírodního pozadí. Není vhodné používat spektrometr s výraznou nelinearitou zesílení, která by mohla komplikovat navazující analýzu spektra.

### Účinnostní kalibrace

Účinnostní kalibraci detektoru pro kvantifikaci deponované aktivity na filtru lze provést prostřednictvím Monte Carlo simulace nebo experimentálním stanovením s využitím uměle kontaminovaného aerosolového filtru. Při přípravě kalibračního filtru je vhodné aplikovat aktivitu z roztoku na body v pravoúhlé mřížce dostatečné hustoty (typicky 1 bod na max. 10 cm<sup>2</sup>). Při konstrukci účinností křivky je postupováno standardními metodami spektrometrie gama s aplikací všech souvisejících korekcí.

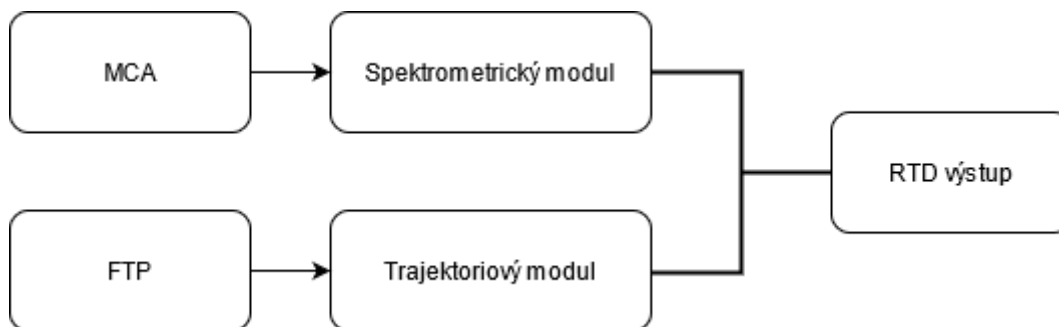
### Stabilizace spektra

Pokud to použitá elektronika dovoluje, je vhodné aplikovat stabilizační procedury, které do jisté míry eliminují velké výkyvy v zesílení detektoru. Pro tyto účely se využijí píky přírodního pozadí, které volíme s ohledem na jejich četnost impulsů. Typicky lze dobře použít 1460 keV (<sup>40</sup>K), nebo jiný prominentní pík nacházející se zhruba v polovině spektra.

### On-line analýza

On-line analýza spekter je složena ze spektrometrického a trajektoriového modulu, které pracují paralelně a jejichž výstupy se následně slučují do výsledných RTD výstupů (viz diagram D 2). Vstupem spektrometrického modulu je MCA, ze kterého jsou v zadaných intervalech přenášena spektra. Vstupem trajektoriového modulu jsou meteorologická data, na základě kterých atmosférický model vypočítá zpětné trajektorie transportu aerosolu do místa odběru. Meteorologická data jsou typicky uložena na vzdáleném serveru, odkud jsou v zadaném časovém schématu stahována na výpočetní PC.

#### D 2 Modulové schéma on-line analýzy spekter

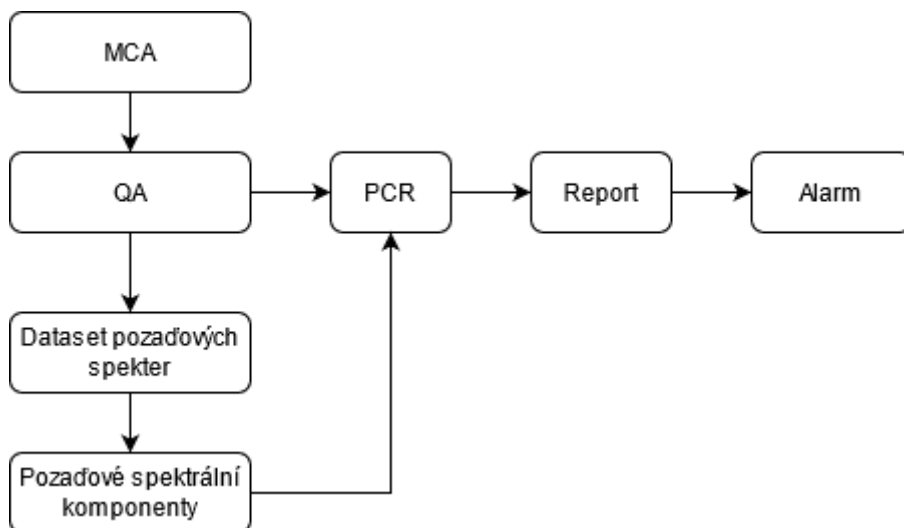


<b>Metodika</b>	List: 6 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

## Spektrometrický modul

Na diagramu D 3 je schematicky znázorněn postup analýzy spektra

### D 3 Analýza spekter



Posloupnost činností spektrometrického modulu:

1. Změřené spektrum je s periodou 1 až 10 minut z MCA převáděno na vyhodnocovací PC, kde je nejprve provedena jeho kvalitativní kontrola. Posuzuje se, zda soubor spektra není poškozen, obsahuje všechny potřebné informace a je provedena numerická kompenzace zesílení spektrometru (blíže viz popis modulu **SpecQA** v programovém manuálu VIRA). Metoda je založena na auto-kalibraci spektra, pro niž jsou využity prominentní píky přírodního pozadí, zejména: 1461 keV ( $^{40}\text{K}$ ), 239 keV ( $^{212}\text{Pb}$ ), 352 keV, 295 keV, 242 keV ( $^{214}\text{Pb}$ ), 609 keV, 1764 keV, 1120 keV, 1238 keV ( $^{214}\text{Bi}$ ), 2614 keV, 583 keV, 861 keV ( $^{208}\text{Tl}$ ).
2. Spektrum je uloženo do souboru požadových spekter, ze kterých jsou metodami faktorizace matic získány spektrální komponenty pozadí. Faktorizaci je možné provádět jak na surových spektrech, tak na jejich plovoucích součtech. V praxi se osvědčují hodinové plovoucí součty. Výpočet spektrálních komponent pozadí je výpočetně náročná operace, kterou ale není nutné provádět s každým novým spektrem. Aktualizaci postačuje provádět v delších intervalech odpovídající časovému měřítku významných změn radiačního pozadí (stavební práce v okolí zařízení, změna ročního období apod.).
3. Metodami založenými na výpočetním schématu Principle Component Regression (PCR) je provedena dekonvoluce měřeného spektra pro odečet přírodního pozadí. Bližší popis faktorizačních metod je uveden v programovém manuálu VIRA v popisu modulu **SpecAnalysis**.
4. Výsledky analýzy jsou zapsány do reportu a iniciován alarm (SMS, email) v případě překročení nastavené úrovně.

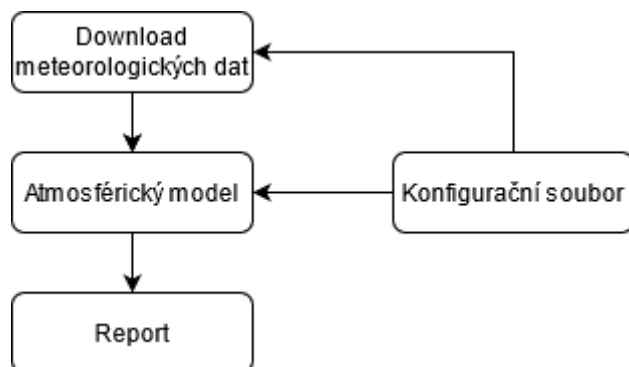
## Trajektoriový modul

Pro výpočet zpětných trajektorií do místa odběru lze využít libovolný atmosférický model, který poskytuje tento typ výstupu a ke kterému jsou k dispozici aktuální meteorologická data. Vzhledem

<b>Metodika</b>	List: 7 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

k tomu, že se trajektorie rovněž generují v on-line režimu, je nutné mít přístup k předpovědním meteorologickým datům. To umožňuje například registrovaná verze modelu HYSPLIT<sup>1</sup>, ke kterému jsou k dispozici globální meteorologická data s rozlišením 0.25°. Obsahuje i konverzní nástroje, které ve výsledku dovolují počítat i na ECMWF<sup>2</sup> datech.

#### **D 4 Schéma výpočtu zpětných trajektorií do místa odběru**



Posloupnost činností trajektoriového modulu

1. Postup výpočtu zpětných trajektorií je založený na konfiguračním souboru, který obsahuje informace o:
  - požadované periodě stahování meteorologických dat,
  - specifikaci adresářové struktury na vyhodnocovacím PC a
  - nastavení atmosférického modelu.
2. Výstup modelu (trajektorie), spolu s vybranými položkami konfiguračního souboru je uložen do výstupního reportu.

#### **Výstupní datový formát**

Výstup spektrometrického i trajektoriového modulu je sloučen do výsledného RTD souboru. Kromě výsledků analýzy obsahuje veškerá metadata potřebná pro rekonstrukci analýzy. Je žádoucí, aby se byl RTD zapisován do člověkem čitelného datového typu, který lze snadno prohlížet, konvertovat. Vhodné jsou formáty odvozené od XML, JSON apod. Seznam základních parametrů, které je vhodné zapisovat do RTD výstupu je pro konfiguraci využívající model Hysplit uvedena v **příloze 1**. Ukázka konkrétní implementace je k dispozici v programovém manuálu VIRA.

#### **Vizualizace**

Pro uživatelskou kontrolu je žádoucí vizualizovat výstupy analýzy. Výsledné RTD soubory obsahují všechny potřebné informace pro konstrukci vhodných grafických výstupů. Vzhledem k tomu, že je nutné zachytit jak energetickou, tak časovou složku spekter, nabízí se pro jejich zobrazení využít tzv. *waterfall* graf, viz **Obrázek 1**. Vzhledem k tomu, že jsou spektra nabírána v rozsahu minimálně 16 tisíc kanálů, může jejich zobrazení na PC působit potíže spojené s velkým objemem dat. Řešením tohoto problému může být zobrazení pouze určité ROI a nebo využití dedikovaných programových knihoven

<sup>1</sup> Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory [1]

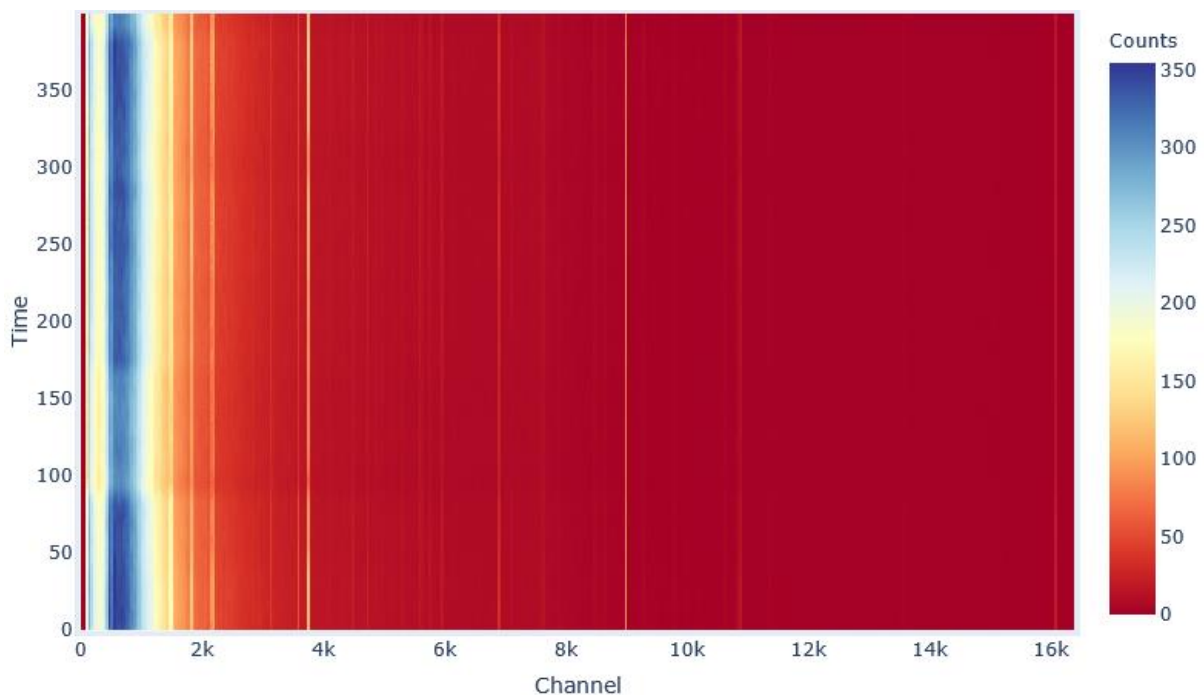
<sup>2</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<b>Metodika</b>	List: 8 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

jako je např. Datashader [2] umožňující zobrazení rozsáhlých data-setů (například pomocí rasterizace vstupního data-setu a jeho následné zobrazení v požadovaném obrazovém formátu).

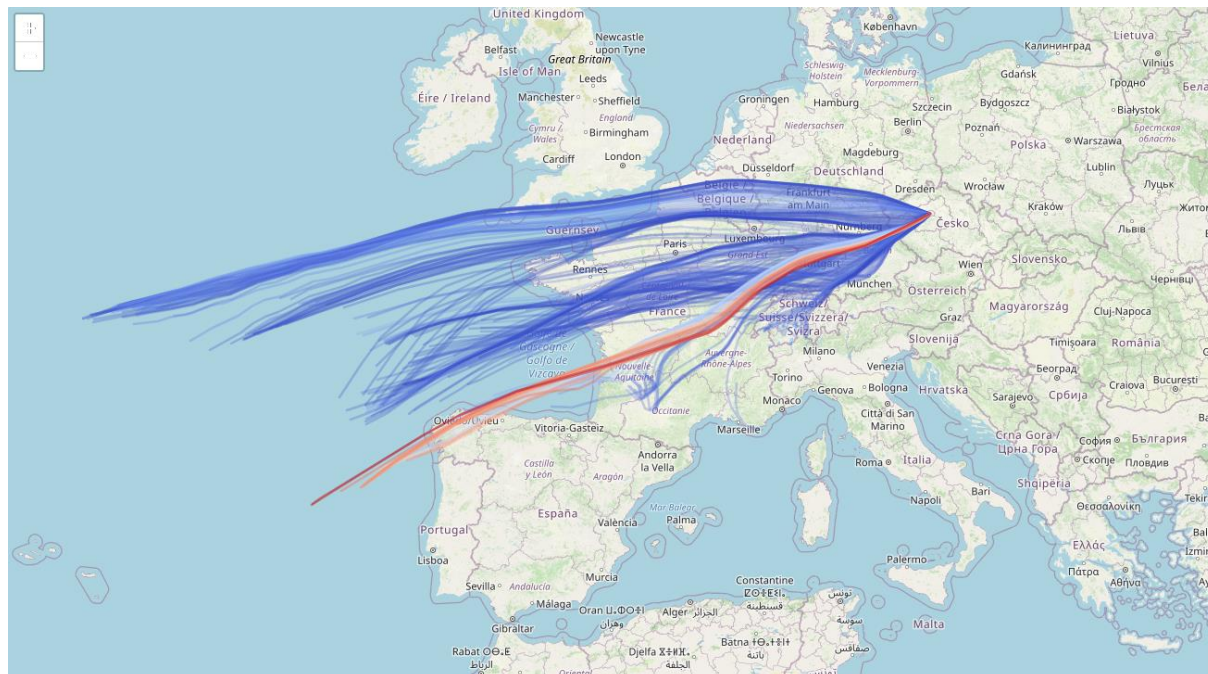
Vizualizaci trajektorií je doporučeno provádět na vhodném mapovém podkladu, který dovoluje snadnou uživatelskou orientaci. Barevné kódování trajektorií pak usnadňuje identifikaci dominantních směrů šíření případné kontaminace. Ilustrační příklad je zobrazen na **Obrázku 2**. Konkrétní implementace vizualizačních procedur je popsána v programovém manuálu VIRA v popisu modulu **RTDViz**.

**Obrázek 1** Ukázka waterfall-plot znázornění analyzovaných spekter. Horizontální osa představuje energii (číslo kanálu spektra), vertikální čas (pořadové číslo spektra) a barevnou škálou je znázorněn počet impulsů v daném kanálu MCA.



<b>Metodika</b>	List: 9 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hyža

**Obrázek 2** Zobrazení zpětných trajektorií na mapovém podkladu OpenStreetMap [3]



## Novost metody

Analýza dat získaných on-line systémy pro detekci radioaktivního aerosolu je velmi specifická oblast monitorování na kterou nelze aplikovat standardní laboratorní postupy. Hlavním rozdílem a novostí je numerický způsob odečtu přírodního pozadí, který využívá spektrální komponenty pozadí získané PCR metodou. Standardní metoda odečtu pozadí není v on-line režimu možná z důvodu jeho vysoké variability i během krátkých odběrů. Standardní metody založené na pikové analýze spekter se navíc obtížně vypořádávají se spektrálními interferencemi, které naopak PCR metoda dokáže spolehlivě odlišit. Propojení spektrometrické analýzy s výstupem atmosférického modelu do jednoho výsledného souboru je pak zcela unikátní řešení, které v MRS dosud neexistovalo.

## Uplatnění metodiky

Metoda je určena pro laboratoře MRS vybavené on-line systémy pro detekci radioaktivního aerosolu. Vzhledem k její obecné povaze slouží jako podkladový materiál pro zavedení on-line analýzy spekter.

## Navazující dokumentace

- Programový manuál VIRA

<b>Metodika</b>	List: 10 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

## Přílohy

Příloha 1 - Seznam parametrů zapisovaných do RTD souboru

## Literatura

[1] Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, Bull. Amer. Meteor. Soc., **96**, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

[2] James A. Bednar, Jim Crist, Joseph Cottam, and Peter Wang (2016). "Datashader: Revealing the Structure of Genuinely Big Data", 15th Python in Science Conference (SciPy 2016).

[3] OpenStreetMap contributors. (2017). Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org> . Opgehaal van <https://www.openstreetmap.org>

<b>Metodika</b>	List: 11 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

## Příloha 1 - Seznam parametrů zapisovaných do RTD souboru

Seznam parametrů zapisovaných do RTD souboru pro konfiguraci využívající atmosférický model Hysplit. Názvy parametrů odpovídají implementaci SW VIRA (viz programový manuál) a jsou rozděleny do 4 skupin:

1. META – parametry obsahující relevantní metadata, která ale nejsou bezprostředně využita pro analýzu
2. HW – parametry popisující hardware (detektor a spektrometrickou trasu) a jeho nastavení
3. SPEC – základní parametry analýzy spekter a její výstupy
4. ATM – parametry popisující nastavení atmosférického modelu (zde konkrétně Hysplit); zapisovány jsou pouze vybrané parametry důležité pro snadnou reprodukovatelnost výstupu.

<b>Struktura a parametry RTD souboru</b>		
	Parametr	Popis
META	Site	Označení monitorovacího místa
	SpecStartUTC	datum a čas začátku nabírání spektra v UTC
	LiveTime	živá doba měření
	RealTime	skutečná doba měření
	TemperatureCelsius	teplota venkovního vzduchu v °C
	RelativeHumidity	relativní vlhkost venkovního vzduchu
	HW	Sampler
FlowRate		průtok vzduchu odběrovým zařízením
Det		označení a typ HPGe detektoru
MCA		označení a typ multikanálového analyzátoru
Nchannel		počet kanálů MCA
RiseTime		Rise time parametr digitální spektrometrické trasy
FlatTop		Flat top parametr digitální spektrometrické trasy
GainCoarse		Hrubé zesílení zesilovače
GainFine		Jemné zesílení zesilovače
PCR	ALARM	Status alarmového hlášení
	ROI_stats	Statistiky odvozené z reziduálního spektra
	ResidualIndex	Škálovaný reziduální počet impulsů ve spektru
	SpecRaw	Původní spektrum
	SpecFit	Fitované spektrum
	Algorithm	Označení algoritmu analýzy
	Ncomp	Počet komponent
	RegressionBlocks	Definice regresních bloků
BackgroundMatrixFile	Název souboru s komponentami pozadí	
ATM	AtmosphericModel	Označení a typ atmosférického modelu
	MeteoData	Označení a typ meteorologických dat

<b>Metodika</b>	List: 12 z 12
Rychlá metoda analýzy radioaktivních aerosolů	Datum účinnosti: 01.01.2022 Schválil: Ing. M. Hýža

MeteoDataGridResolution	Geografické rozlišení meteorologických dat
MeteoDataTimeResolution	Časové rozlišení meteorologických dat
MeteoDataVerticalLevels	Počet vertikálních úrovní atmosférických dat
MeteoDataRegion	Region pokrytí meteorologických dat
TrajLen	Délka zpětné trajektorie
TrajLat	Vektor zeměpisných šířek vypočítané zpětné trajektorie
TrajLon	Vektor zeměpisných délek vypočítané zpětné trajektorie
TrajHeigh	Vektor výšky vypočítané zpětné trajektorie
StartLat	Zeměpisná šířka odběrového místa
StartLon	Zeměpisná délka odběrového místa
StartAlt	Nadmořská výška odběrového místa
ATMPParams <sup>1)</sup>	Nastavení parametrů atmosférického modelu

<sup>1)</sup> Pro model Hysplit se jedná například o parametry obsažené v souboru TRAJ.CFG na základě kterého byl proveden výpočet trajektorií transportu aerosolu do místa měření.