



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

**Využití prostředků leteckého monitorování radiční situace při
řešení radičních událostí v ČR**

**An Airborne Radiological Systems for Monitoring During Radiation
Situations in the Czech Republic**

Bakalářská práce

Studijní program: Ochrana obyvatelstva

Studijní obor: Plánování a řízení krizových situací

Vedoucí práce: Ing Lubomír Gryc

Ladislav Kojzar

Kladno, květen 2017

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: **Ladislav Kojzar**
Obor: Plánování a řízení krizových situací
Téma: **Využití prostředků leteckého monitorování radiační situace při řešení radiačních událostí v ČR**
Téma anglicky: An Airborne Radiological Systems for Monitoring During Radiation Situations in the Czech Republic

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


Cílem bakalářské práce je analýza systémů využívaných k vzdušnému monitorování radiační situace ČR, jejich výhod a omezení.

V teoretické části bakalářské práce bude pomocí rešerše dostupných informačních zdrojů (odborné literatury, zákonů, předpisů a nařízení) zpracována analýza prostředků a postupů při provádění vzdušného (leteckého) monitorování radiační situace nebo radiačního průzkumu. Budou zde shrnuty základní principy detekce, specifika tohoto druhu monitorování a popis detekčních systémů. V praktické části bude zpracován modelový příklad vhodného použití tohoto způsobu monitorování, včetně grafického výstupu vyhodnocení naměřených hodnot. V diskusi budou konfrontovány zásadní výhody a omezení.

Seznam odborné literatury:

- [1] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA, Detektory ionizujícího záření, ed. 2. přeprac., Praha: České vysoké učení technické, 2011, ISBN 978-80-01-04710-1
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration, Vienna: Internat. Atomic Energy Agency, 2013, ISBN 9789201290106
- [3] SÚJB, Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2015 [online], Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2015, Dostupné z: <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/vyrocní-zpravy/vyrocní-zpravy-sujb/>
- [4] PAVLÍK, Josef, Letecká gamaspektrometrie a monitorování radiační situace v podmínkách AČR, 2015, Vyškov. Disertační práce. Univerzita obrany. Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení

Zadání platné do: 11.09.2018
Vedoucí: Ing. Lubomír Gryc
Konzultant: pplk. Ing. Josef Pavlík, PhD.


vedoucí katedry / pracoviště


děkan

V Kladně dne 23.02.2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Využití prostředků leteckého monitorování radiační situace při řešení radiačních událostí v ČR vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne 10.05.2017

.....
podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Lubomíru Grycovi za vedení bakalářské práce, jeho rady, odbornou pomoc a vstřícnost při konzultacích. Dále děkuji podplukovníku. Ing. Josefu Pavlíkovi, Ph.D. za poskytnutí podkladů, odborné rady a důležité poznatky při psaní bakalářské práce. Také bych rád poděkoval všem kolegům a odborníkům, kteří mi vyšli vstříc, když jsem se na ně obracel s žádostmi o pomoc a kteří mě častovali konstruktivními připomínkami při psaní této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se uceleně zabývá specifickou problematikou detekce ionizujícího záření (IZ) s využitím leteckých prostředků při řešení radiačních událostí na území České republiky. Bakalářská práce obsahuje základní charakteristiku využitelných detektorů IZ a stručnou analýzu využitelných prostředků a systémů. Jsou v ní dále popsány specifika, základní principy a omezení při provádění vzdušného monitorování radiační situace. Jsou zde také uvedeny aktuální možnosti vybraných institucí České republiky v provádění tohoto typu monitorování. Cílem práce je zpracování souhrnného přehledu o možnostech a způsobech detekce IZ při řešení radiačních událostí na území České republiky s využitím leteckých prostředků. V práci jsou popsány používané prostředky Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i., Armády České republiky, a další využitelné prostředky a systémy. Je zde také uveden příklad postupu od aktivace dostupných sil a prostředků, přes provádění monitorování až po zpracování grafického výstupu. Pro tuto prezentaci byla použita reálná data z provedeného měření letecké skupiny a zpracován návrh metodiky k vizualizaci dat v aplikaci QGIS. Závěrem práce je zhodnocení aktuálního stavu využití prostředků vzdušného monitorování radiační situace a možnosti v oblasti vývoje a zdokonalování těchto systémů.

Klíčová slova

Radiační událost; letecký radiační průzkum; letecké monitorování; radiační situace; detekční systém; ionizující záření.

Abstract

Bachelor thesis comprehensively deals with the issue of ionizing radiation detection on the Czech Republic territory by the use of aerial detection means. This bachelor thesis contains brief characteristic of the ionizing radiation detectors and means or systems. There are described an airborne ionizing radiation monitoring specifics, basic principles and limitations. Thesis discusses actual possibilities of selected institutions from Czech Republic, reflecting this specific kind of monitoring. Aim of this thesis is to prepare complete overview of possibilities and methodology of the airborne radiation detection on Czech Republic territory during radiation incidents. In this document are described means used by State Office for Nuclear Safety, Armed Forces of the Czech Republic, and other means and systems. There are also described an example of process from activation accessible forces and assets, conducting monitoring and graphical output management. For this presentation were real measured data used and presented draft of methodology for results visualization in QGIS software. Conclusion provides an evaluation of existing means of airborne radiological monitoring usage and possible future trends in this field.

Keywords

Radiation incident; airborne radiological survey; airborne radiological monitoring; radiation situation; detection system; ionizing radiation.

Obsah

1 Úvod.....	11
1.1 Akademik František Běhounek	11
1.2 Potřeba leteckých detekčních systémů	12
2 Současný stav.....	15
2.1 Radiační situace na území ČR	15
2.2 Detekce ionizujícího záření	16
2.2.1 Ionizující záření (IZ)	16
2.2.2 Základní dozimetrické veličiny	18
2.2.3 Detektory.....	20
2.2.4 Specifika detekčních systémů pro leteckou gamaspektrometrii.....	23
2.2.5 Možnosti využití leteckého monitorování radiační situace.....	24
2.3 Analýza aktuálně používaných systémů pro letecké monitorování v ČR....	25
2.3.1 Integrovaný radiační informační systém.....	26
2.3.2 Unmanned Aerial Vehicle - dron.....	28
2.3.3 Aerologické sondy	31
2.4 Možnosti použití systémů pro letecké monitorování při řešení radiačních událostí v ČR.....	32
2.5 Analýza legislativního rámce leteckého monitorování.....	33
2.5.1 Legislativa monitorování radiační situace	33
2.5.2 Legislativa provozu leteckých prostředků	34
2.6 Konkrétní příklad použití leteckého prostředku	35
2.6.1 Zadání úkolu, stanovení parametrů monitorování	35

2.6.2	Příprava projektu	37
2.6.3	Provedení gamaspektrometrického měření	38
2.6.4	Vyhodnocení výsledků měření	39
3	Cíl práce	42
3.1	Souhrnný přehled prostředků	42
3.2	Porovnání možností a omezení	42
4	Metodika	44
5	Výsledky	45
6	Diskuze	46
6.1	Srovnání s vybranými systémy leteckého monitorování používanými v zahraničí	46
6.2	Porovnání metodik provádění monitorování	48
6.3	Výhody používaných systémů	50
6.4	Nevýhody a omezení při použití	51
6.4.1	Omezení legislativní	51
6.4.2	Technická omezení a nevýhody	52
6.4.3	Vliv prostředí	54
6.5	Možnosti dalšího vývoje	54
7	Závěr	58
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	59
9	Seznam použité literatury	61
10	Seznam použitých obrázků	64
11	Seznam použitých tabulek	65

12 Přílohy.....	66
12.1 Příloha 1 Metodika vizualizace dat v aplikaci Quantum GIS.....	66
12.1.1 Úprava dat před použitím.....	66
12.1.2 Vkládání dat do aplikace.....	67
12.1.3 Vizualizace bodových hodnot.....	69
12.1.4 Interpolace.....	72
12.1.5 Další možnosti vizualizace dat.....	76

1 ÚVOD

1.1 Akademik František Běhounek

Je to už mnoho let, kdy se mi poprvé do ruky dostala kniha od Františka Běhouneka Radium a paprsky X. Malý formát, zažloutlé listy ale již v úvodu mě udivila patrná nadčasovost a vizionářský přístup k tehdy novému, právě začínajícímu oboru jakým radioaktivita v té době byla.

Studium radioaktivity a paprsků X přivodilo netušený pokrok v odvěkém bádání lidském o složení hmoty a přiblížilo nám nejvyšš zajímavý obraz světa nejmenších rozměrů, atomu. Práce, vykonané v tomto směru v posledních dvaceti letech, mají dnes většinou jen theoretický význam, ale budoucí generace, které uplatní jejich praktické důsledky, získají jimi obrovské zásoby energie, jichž užití úplně změní toářnost světa.

Dr. František Běhounek V praze 7. září 1923 (1)

V celém díle je patrná vysoká míra nadšení a touhy objevovat a kriticky, ale s respektem se k práci vyjadřovat. Navíc jsou Běhounkovy odborné knihy psané srozumitelně a i dnes, při troše vzdělání v oblasti radiologie, lze snadno pochopit popisované principy a postupy. Ohromující je také úžasná otevřenost, kdy je vše uváděno popravdě, tak aby kdokoli mohl na dílo případně navázat, což dnes, až na výjimky, nemá obdoby. O radioaktivitě se dnes mezi laickou veřejností hovoří většinou v souvislosti s Hirošimou, Nagasaki, Černobylem, Fukušimou nebo rizikem při provozování úložišť jaderných odpadů. Média navíc dokáží strach ze záření, mnohdy přerůstající v radiofobii, podpořit

ilustračními záběry z testů jaderných zbraní nebo naaranžovanými fotografiemi panenek z mateřské školky v Pripjati.

V tomto přístupu ale rozhodně není snaha témata jako radioaktivita, dozimetrie nebo radiobiologie zobecňovat a zpřístupnit veřejnosti, jde pouze o tvorbu senzací k ohromení publika, které nemá dostatek relevantních informací. Díky rychlosti rozvoje v této oblasti je zde velmi znát prohlubující se propast mezi odborníky a laiky. Možná je právě čas tuto oblast trochu popularizovat a udělat ji alespoň trochu zajímavou, tak jak se o to snažil František Běhounek. A zajímavou třeba až do té míry, že se stane koníčkem nebo povoláním, tak jako jsem měl to štěstí já osobně.

1.2 Potřeba leteckých detekčních systémů

Nebudu se na tomto místě pouštět do spekulací, do jaké míry je jaderná energetika nebezpečná pro životní prostředí, zda se po severokorejských jaderných testech svět nachází na prahu jaderné války, nebo jestli je načase obávat se špinavých bomb v rukou sofistikovaných teroristů. Faktem zůstává, že jaderná energetika, jaderné zbraně, zdroje IZ pro průmyslové, medicínské i jiné komerční využití, stejně jako skladiště jaderného odpadu existují a jsou součástí lidského života. Aby se toto vše nestalo i součástí smrti a utrpení v případech, kdy se nakládání se zdroji IZ vymkne kontrole, je zásadní mít připravený fungující systém řízení rizik. Pilíři takového systému, jsou výkonný aparát, funkční legislativa a prostředky na úrovni umožněné zdrojovým rámcem. V oblasti radiační ochrany je základem dokonalý a kvalitně propracovaný systém detekce, identifikace a monitorování. Tato potřeba je také jeden z důvodů, proč je oblast výzkumu a vývoje detekčních systémů IZ

neustále v popředí zájmu. Nové technologie umožňují zdokonalovat, zmenšovat a zlevňovat způsob výroby detektorů již používaných, nebo do detektorů aplikovat nové materiály v nových strukturách se specifickými vlastnostmi. Moderními trendy ve vývoji neprocházejí jen detektory samotné, ale vyvíjí se také nové způsoby jejich použití.

Při uvážení základních principů radiační ochrany ve vztahu k člověku, kterou je čas, vzdálenost a stínění, dochází zde logicky k potřebě oddělit obsluhu od detektoru IZ. Jedním z nejčastěji použitých způsobů je fixní umístění detektoru a zabezpečení dálkového přenosu dat k obsluze. Informace může být předávána prostřednictvím kabelů, optických vláken, ale také bezdrátovým přenosem prostřednictvím Wi-Fi, sítěmi mobilních operátorů GSM nebo přes satelit. Zásadní omezení při využití tohoto principu monitorování je minimální zpětná vazba obsluhy směrem k detektoru a naprostá imobilita systému. Řešení je to většinou levné, zálohovatelné, spolehlivé a při nutnosti monitorování více míst současně velice vhodné. Jestliže je nutné provést detekci v oblasti, kde takovéto systémy nejsou, a aktuální radiační situace instalaci neumožňuje, řešením jsou pouze mobilní detekční systémy. Hovoříme-li pak o mobilních prostředcích, tak mezi ty nejvíce mobilní patří prostředky letecké. Monitorování, při kterém je prováděna detekce z výšky má svoje nesporné výhody, které jsou detailněji zpracované v kapitole 6.3. Při některých závažnějších radiačních mimořádných situacích nebo po jaderné havárii může být letecké monitorování jedinou aplikovatelnou metodou jak vůbec získat aktuální data o rozsahu události. Proto organizace, která zodpovídá za radiační ochranu a detekci IZ na úrovni státu takovým systémem disponuje a využívá jej.

Jelikož tento systém umožňuje poskytovat data i v případě vojenských hrozeb Armáda České republiky v roce 2006 rovněž zakoupila detekční systém (Integrated Radiation Information System - IRIS) pro leteckou gamaspektrometrii. Tento systém nahradil dříve používaný letecký rentgenometr RL-75, který byl již zastaralý. Do nedávna jsem byl jedním z operátorů systému IRIS, což ve finálním výčtu zahrnuje stovky hodin příprav, doplňování vzdělání, oprav systému a celkem 300 hodin strávených na palubě vrtulníku s možností pohledu na krajinu z ptačí perspektivy.

2 SOUČASNÝ STAV

2.1 Radiační situace na území ČR

Lidstvo a veškeré složky životního prostředí na Zemi jsou po celou dobu existence vystavovány ionizujícímu záření kosmického a terestriálního původu. Od počátku minulého století se díky výzkumům v oblasti radioaktivity k těmto zdrojům postupně přidávají i zdroje umělé. U člověka IZ způsobuje jednak ozáření zevní, a to případně, že je zdroj mimo lidské tělo, tak vnitřní, když je zdroj IZ přímo v lidském těle. Do lidského organismu se zdroje IZ v největší míře dostávají dýcháním (plyny, aerosoly, prach) a příjmem potravy. Míra rizika z vnitřního ozáření záleží na konkrétním zdroji, druhu emitovaného záření, energii záření, poločasu rozpadu, ale i zda je v těle přítomen v rozpustné nebo nerozpustné formě, rychlosti a rozsahu vstřebávání, ukládání a rychlosti vylučování. Soubor těchto vlastností pak udává radiotoxicitu konkrétního zdroje IZ. Z hlediska běžné radiační situace má největší podíl na ozáření člověka radon a produkty jeho přeměny. (2)

Po havárii jaderné elektrárny v Černobyli, která svým rozsahem kontaminace přesahovala hranice kontinentů, zahájilo v reakci na tuto událost mnoho států kontinuální monitorování radiační situace. Monitorování radiační situace na území ČR probíhá od dubna roku 1986 a aktuálně jej zajišťuje Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) dle § 149 zákona 263/2016 Sb., atomový zákon. Podstatná část oblasti leteckého monitorování je pak řešena péčí Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO, v.v.i.). Ve vybraných lokalitách je periodicky monitorováno ovzduší. Z umělých radionuklidů je v současnosti detekovatelný pouze izotop cesia s nukleonovým číslem 137 (^{137}Cs). Dále jsou ve

spektru identifikovatelné i přírodní radionuklidy jako ${}^7\text{Be}$, které je kosmogenního původu, a ${}^{210}\text{Pb}$, které je produktem přeměny přírodního ${}^{222}\text{Rn}$. Tyto přírodní radionuklidy jsou monitorovány především z důvodu ověřování správnosti měření laboratoří Radiální monitorovací sítě (RMS). Aby bylo vůbec možné velice nízké aktivity ${}^{137}\text{Cs}$ zaznamenat, měření se provádí na týdenních vzorcích kontinuálně odebíraných aerosolů odběrovým zařízením s průtokem $900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Na dalších monitorovacích místech, kde jsou instalována odběrová zařízení s menším průtokem, jsou hodnoty aktivity ${}^{137}\text{Cs}$ pod prahem detekce. (3)

2.2 Detekce ionizujícího záření

2.2.1 Ionizující záření (IZ)

Na přelomu 19. a 20. století došlo v oblasti fyziky záření k poměrně zásadnímu objevu přirozené radioaktivity. Zásluhy za tento objev byly připisány Antoine Henri Becquerelovi, narozen 15. prosince 1852 v Paříži. V roce 1903 byl za tento objev oceněn Nobelovou cenou za fyziku. V principu se jednalo o objev neviditelného záření emitovaného některými minerály, u kterých prováděl pokusy s fluorescencí. Na tento objev navazovala práce dalších vědců jako Marie Curie-Sklodovské se svým manželem Pierrem Curie. Tento jev byl nazván radioaktivita. (1)

Přirozená radioaktivita je způsobena samovolnou přeměnou atomového jádra. V přírodě lze nalézt mnoho radioaktivních látek včetně těch, které jsou vázané v těle živých organismů. Jakmile dochází k vnějšímu ovlivnění těchto procesů například v urychlovači částic nebo řetězovou reakcí jedná se o radioaktivitu umělou. Příkladem mohou být látky používané

v radiodiagnostice, jaderná energetika, ale také kontaminace po havárii jaderných elektráren nebo po prováděných testech jaderných zbraní.

IZ je charakterizováno jako proud hmotných částic nebo fotonů (elektromagnetického záření), které mají schopnost ionizovat atomy prostředí nebo excitovat jejich jádra. IZ je děleno na záření přímo ionizující, jehož kvanta nesou elektrický náboj a přímo tak ionizují atomy. Jedná se o záření α , β^+ , β^- , ale také protonové záření p^+ . Druhou skupinu tvoří záření nepřímo ionizující, jehož kvanta nejsou elektricky nabitá a při interakci s prostředím, kdy je energie předávána nejdříve nabytým částicím a ty pak sekundárně způsobují ionizaci. Sem patří záření neutronové, záření γ a rentgenové záření. Z fyzikálního hlediska se jedná o podobný typ záření, rozdíl je ve vlnové délce a v místě vzniku. Záření γ vzniká v atomovém jádře a rentgenové záření vzniká v elektronovém obalu atomu. (4)

Souhrn klíčových faktů o IZ (5):

- jedná se o typ energie uvolňované atomy ve formě elektromagnetického záření nebo částic;
- lidé jsou vystaveni přírodním zdrojům záření (půda, voda, vegetace), umělým zdrojům jako jsou rentgeny a případně další lékařská zařízení;
- má mnoho přínosných způsobů využití ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství nebo výzkumu;
- s nárůstem využití ionizujícího záření rostou možná rizika;
- v případě překročení určitých dávek ionizujícího záření, charakterizovaných specifickými hodnotami dozimetrických veličin, může dojít k účinkům poškozujícím lidský organismus.

2.2.2 Základní dozimetrické veličiny

Používané dozimetrické veličiny, jejichž základní přehled je uveden v Tabulce 1, jsou stanovovány s cílem přesněji charakterizovat (kvantifikovat) zdroj IZ, nebo účinek, který IZ vyvolává při interakci s jinými materiály včetně živé lidské tkáně. Z pohledu soustavy SI se jedná o odvozené veličiny, většinou se samostatným názvem spjatým s význačným objevitelem v oblasti radioaktivity.

Tabulka 1 Přehled základních používaných dozimetrických veličin (6)

Veličina	Jednotka		
	Název	Značka	Rozměr
Dávka (D)	gray	Gy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Dávkový příkon (DP)	gray/sekunda	$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
Dávkový ekvivalent (DE)	sievert	Sv	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Fotonový dávkový ekvivalent (FDE)	sievert	Sv	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Prostorový dávkový ekvivalent (PDE)	sievert	Sv	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Příkon dávkového ekvivalentu (PDE)	sievert/sekunda	$\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
Příkon fotonového dávkového ekvivalentu (PFDE)	sievert/sekunda	$\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
Příkon prostorového dávkového ekvivalentu (PPDE)	sievert/sekunda	$\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
Aktivita	becquerel	Bq	s^{-1}
Objemová aktivita	becquerel/l; becquerel/ m^3	Bq/l ; Bq/m^3	$\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^{-3}$ $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
Hmotnostní aktivita	becquerel/kg	Bq/kg	$\text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
Plošná aktivita	becquerel/ m^2	Bq/m^2	$\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

Aktivita A je v podstatě počet radioaktivních přeměn za jednotku času a **objemová aktivita A_v** pak podíl aktivity k celkovému objemu látky. **Hmotnostní aktivita A_m** je vyjádření aktivity k celkové hmotnosti látky a **plošná aktivita A_s** je aktivita z celkové plochy látky.

Dávka (nebo absorbovaná dávka) D je podíl sdělené energie a hmotnosti látky v daném prostoru, které byla tato energie předána a **dávkový příkon DP** je přírůstkem dávky v daném časovém intervalu. **Dávkový ekvivalent DE** je součinem dávky ve tkáni a jakostního činitele vyjadřujícího rozdílou biologickou účinnost různých druhů záření. Jestliže je dávkový ekvivalent způsobený jen fotony jedná se o **fotonový dávkový ekvivalent FDE** . Jedná-li se o přírůstek fotonového dávkového ekvivalentu v časovém intervalu je tato veličina **příkon fotonového dávkového ekvivalentu $PFDE$** . (6) (7)

Dále bych chtěl v souvislosti s praktickými aspekty monitorování IZ poukázat na jednotky a veličiny, které jsou sice mimo soustavu SI, ale s detekcí IZ jsou rovněž spojeny. První z nich je pulz nebo také impulz za jednotku času, většinou za sekundu, udávaný v tomto případě zkratkou cps (counts per second). Přeměna energie ionizujícího záření na elektrické pulsy je hlavní funkcí detektoru. Složkami integrovaného záchranného systému (IZS) je používáno několik dozimetrických přístrojů, které zobrazují hodnoty měření v cps, nebo se do tohoto režimu automaticky přepínají při připojení externí sondy jak je tomu například u přístroje RDS-120. V praxi jsem se setkal s chybami obsluh přístrojů, kdy zaměnily cps za rozpad za sekundu (becquerel) a následně chybně provedli výpočet příkonových dozimetrických veličin. Impulz jako reakce detektoru nemůže být synonymem aktivity, protože možná až na laboratorní výjimky, nelze detektorem zaznamenat odezvu 100 % rozpadů, navíc bez bližší identifikace měřeného zdroje IZ. Jako další veličina,

používaná především ve spektrometrii, je energie záření udávána v elektronvoltech nebo jejich násobcích (eV, keV, MeV). Jeden eV odpovídá energii $1,60217662 \times 10^{-19}$ J. Znalost energie záření je zásadní při práci se spektrem záření, ze kterého lze blíže identifikovat konkrétní izotop (např. energie 662 keV odpovídá ^{137}Cs).

2.2.3 Detektory

Jelikož IZ nelze přímo detekovat lidskými smysly, jsme odkázáni na zařízení, která dokáží detekci zprostředkovat. Obecně jsou nazývány jako detektory IZ. Ty, které jsou v praxi běžně používány lze rozdělit dle typu interakce záření s detektorem. Oblast detektorů, která je nejlépe využitelná pro monitorování radiační situace zahrnuje většinou ty, u kterých dochází k převodu interakce záření na elektrický signál. A to buď přímo, jako je tomu u ionizačních komor, Geiger-Müllerových (GM) detektorů, nebo nepřímo například scintilační detektory. Z pochopitelných důvodů lze jednoznačně z oblasti zájmu leteckého monitorování vyřadit detektory, kde dochází ke změnám, většinou materiálovým, a nelze tak jednoduše převést výstup do podoby elektronicky zpracovatelných dat. Konkrétně se jedná o mlžné, bublinkové nebo jiskrové komory, či stopové detektory. Rovněž nevhodné jsou integrační dozimetry.

Elektronické dozimetry lze dále rozdělovat podle mnoha kritérií. Jedním ze základních parametrů je, zda elektrický signál vyvolaný interakcí záření s detektorem nese informaci o energii záření, či nikoli. Jestliže ano, pak se jedná o detektor spektrometrický. Ostatní detektory, které tento parametr nespĺňují, lze označit jako nespektrometrické. Stále jsou sice schopné detekce ionizujícího záření, ale nejsou schopné poskytnout energetickou definici interagujících

fotonů nebo částic. Dalším hlediskem pro rozdělení je také typ použitého materiálu nebo spíše látkového prostředí detektoru, kde dochází k interakci částic. Pro charakteristiku systémů používaných v leteckém monitorování v ČR se zaměřím na tři základní typy. (8)

- Detektory s plynou náplní (plynové detektory);
- scintilační detektory;
- polovodičové detektory.

Detektory s plynou náplní obecně využívají k detekci IZ plynů, které jsou za normálních podmínek izolanty. Tato fyzikální vlastnost právě umožňuje sledovat interakci IZ s atomy plynu, které jsou ionizovány, čímž dochází ke změně vodivosti. Konstrukce detektoru, jeho geometrie, použité materiály a napětí dále charakterizují, jestli se jedná o:

- Geiger-Müllerův detektor (počítač);
- ionizační komoru;
- proporcionální detektor;
- koronový detektor.

Scintilační detektory se řadí mezi nejdéle používané detektory IZ. Obecným principem detektoru je interakce hmoty detektoru se zářením, kde se absorbovaná energie převede na viditelné krátkovlnné záření nebo záření v oblasti blízké ultrafialové části spektra. Již v počátcích dvacátého století se k detekci IZ používal spintariskop, u kterého se lidský okem v mikroskopu pozorovaly a počítaly jednotlivé záblesky vznikající na stínítku pokrytého sulfidem zinečnatým. Postupem času s objevem dalších vhodných scintilátorů se spektrometrickými vlastnostmi (například NaI(Tl) - jodid sodný s příměsí

thalia, organické materiály, kapalné scintilátory) a objevy v elektronice (fotokatoda) došlo k jejich masivnímu rozvoji a rozšířila se oblast jejich využití. Důkladněji lze fyzikální princip popsat následovně. V první fázi dochází k absorpci záření ve scintilátoru, kde dochází ke konverzi absorbované energie na emitované scintilační fotony. Tyto fotony jsou pak přes optický kontakt přeneseny na fotocitlivý prvek, kterým může být fotokatoda fotonásobiče, nebo fotocitlivá dioda. Tam dojde vlivem fotoelektrického jevu k emisi fotoelektronů nebo v případě diody k tvorbě elektron - děrových párů. Aby bylo možné výstupní signál vůbec zaznamenat, dochází ve fotonásobiči k jeho zesílení na speciálně upravených elektrodách, které se nazývají dynody. Výsledný signál je pak veden do vyhodnocovacího zařízení. Scintilační detektory lze použít tam, kde je nutný velký objem detekční jednotky pro zachycení IZ. Většina detektorů je specificky vyráběna pro již předem daný účel použití, s vhodně zvolenou konstrukcí, počtem detekčních jednotek, materiálem scintilátoru o konkrétní geometrii a přesném objemu. (8)

Polovodičové detektory se mechanismem přímého elektrického využití ionizačních účinků záření svým principem poněkud podobají ionizační komoře. Rozdíl je pouze v materiálu, kde dochází k interakci IZ, kterým v tomto případě není plyn, ale vhodný polovodičový materiál. Z elektronického hlediska je polovodičový krystal polovodičová součástka zapojená v elektrickém obvodu s vysokým napětím několika tisíc voltů přes velký odpor v tzv. závěrném (nevodivém) směru. V klidovém stavu, kdy nedochází k interakci s IZ, neprotéká obvodem elektrický proud. Na rozdíl od scintilačních detektorů popsaných výše mají polovodičové detektory výrazně lepší energetické rozlišení.

U polovodičových detektorů je zapotřebí na vytvoření elektron-děrového páru přibližně 3 – 5 eV, zatímco u scintilačních detektorů je to 100 eV až 1 keV pro produkci jednoho fotoelektronu z fotokatody fotonásobiče. Běžně používanými jsou polovodičové detektory HPGe (High Purity Germanium) s nutností chlazení a nově se objevující krystaly CdZnTe (kadmium zinek telurid), jejichž výhodou je použitelnost za přirozené teploty okolí bez nutnosti chlazení. Prozatím jsou k dispozici v malých rozměrech kolem 1 cm³, ale právě díky absenci chlazení, které je u HPGe většinou zabezpečováno kapalným dusíkem nebo Stirlingovým chlazením jsou detektory kompaktnější a mnohem lehčí. (9)

(10)

2.2.4 Specifika detekčních systémů pro leteckou gamaspektrometrii

Rozhodovací proces řešící použití konkrétního prostředku potřebuje co nej přesnější technická data, která jsou dodávaná výrobcem, ale i data vycházející z reálného provozu. Jedním z takovýchto údajů pro gamaspektrometrické systémy je hodnota minimálních detekovatelných aktivit (MDA) pro vybrané radionuklidy jakožto výchozí parametr odhadu citlivosti kompletního (konkrétního) detekčního systému. V případě stanovení MDA u systému IRIS byla použita metoda, kde je počet detekovaných pulsů v energetickém okně radionuklidu úměrný jeho aktivitě.

Touto metodou a zohledněním stripping faktorů radionuklidů je možné vypočítat MDA pro radionuklidy, které se běžně v terénu vyskytují, ale i například ¹³⁷Cs. Stripping faktory zohledňují vzájemné příspěvky mezi energetickými kanály tří základních radioizotopů K, U, Th, způsobené charakterem interakce gama kvant v detektoru a ovlivňují tak následné

vyhodnocení zaznamenaných signálů. Konkrétně se tato interakce projevuje příspěvkem detekovaného Th a jeho dceřiných produktů do energetických oken U a K. Obdobně pak U a jeho dceřiné produkty do energetického okna K. Příspěvek jednotlivých radioizotopů do energeticky vyšších kanálů (např. U do Th, K do Th) je výrazně slabší. (11)

Při výpočtech se vychází z aktuálních hodnot většinou získaných za ideálních nebo laboratorních podmínek. Při praktickém měření v terénu nelze opakovat jediné měření za stejných podmínek dvakrát. Nejjednodušším způsobem, jak prakticky ověřovat detekční limity systému je provádění opakovaných testů za různých podmínek s využitím certifikovaných zdrojů IZ. Pro testování měření hodnot přírodního pozadí lze trénovat na volném terénu, kde bylo provedeno referenční pozemní měření jedním nebo současně více totožnými systémy.

2.2.5 Možnosti využití leteckého monitorování radiační situace

Letecké monitorování lze využít za normální radiační situace při periodickém monitorování a průzkumu zájmových oblastí s dřívější kontaminací. V České republice je to například Šumava nebo oblast Jeseníků se zátěží ^{137}Cs pocházejícího ze spadu po havárii černobylské jaderné elektrárny. Lze monitorovat okolí provozů, kde dochází lidskou činností ke změnám koncentrací radionuklidů nad běžné hodnoty. Sem lze zařadit odkaliště po těžbě uranové rudy nebo skládky hlušiny a popela. Způsobem použití, při kterém lze plně využít veškeré jeho benefity, včetně radiační ochrany, je nasazení leteckého monitorování za mimořádné radiační situace při havarijním monitorování. Letecké monitorování radiační situace je rovněž využíváno jako

součást geofyzikálního průzkumu zemského povrchu, kde jsou společně s dalšími detektory např. magnetometrem vyhledávány zdroje nerostných surovin. (12) (13)

2.3 Analýza aktuálně používaných systémů pro letecké monitorování v ČR

Systémem používaným v ČR je letecký gamaspektrometr IRIS, který byl v devadesátých letech pořízen SÚRO a provozován ve spolupráci s AČR, která vyčleňuje pro leteckou skupinu vrtulník. V roce 2006 byl téměř identický systém pořízen do AČR pro její vlastní potřebu. I nadále však probíhá úzká spolupráce a společné výcviky, které jsou mnohem efektivnější a dochází tak na mezirezortní úrovni k získávání a výměně poznatků a zkušeností. Tyto výcviky jsou organizovány minimálně dvakrát ročně a vždy je vybrána jedna zájmová lokalita, kde je provedeno monitorování. Protože u některých lokalit je toto monitorování prováděno opakovaně s odstupem několika let lze porovnávat změny.

Menším, levnějším a dostupnějším prostředkem jsou pak bezpilotní letecké prostředky, UAV (Unmanned Aerial Vehicle, nebo často používaný termín dron), které jsou ve vlastnictví mimo jiné i dvou institucí zřizovaných SÚJB.

Další využitelný a zároveň nejmenší, nejlehčí a nejlevnější prostředek, není-li brána v potaz základnová stanice, je radiosonda RS92-SGPD, čidlem radioaktivity NSS921, kterou má k dispozici ČHMÚ a AČR.

2.3.1 Integrovaný radiační informační systém

Integrovaný radiační informační systém (IRIS) je moderní, plně integrovaný systém detekce záření gama, který obsahuje veškeré komponenty pro detekci a vyhodnocení zvýšených úrovní radioaktivní kontaminace. Hlavní komponentou systému IRIS je gama spektrometr GRS10 (Gamma Ray Spectrometer) s rozšířením o sondu MDG-03, satelitní navigační systém GPS a radarový výškoměr. Systém vyhodnocuje veškerá data v reálném čase. Data jsou zpracovávána, ukládána a zobrazována na palubě vrtulníku na pracovní stanici operátora v předem připravené mapě. Aktuální letové parametry předem naplánovaného projektu jsou zobrazovány na displeji pilota v kokpitu vrtulníku. K tomuto účelu je využíván software dodaný přímo výrobcem zařízení. Zařízení je konstruováno primárně pro vestavbu do vrtulníku, lze je však použít i s jiným vhodným typem letounu nebo pro pozemní radiační průzkum. Spektrometr GRS10 je sestavou čtyřech scintilačních detektorů NaI(Tl) s jednotlivým objemem 4 dm³ uložených po dvou kusech v jednom přepravním obalu s hmotností přibližně 50 kg. Energetický rozsah detektoru je 35-3000 keV ve spektru rozděleném do 512 kanálů, maximální počet pulzů na krystal je 60 000.

Sonda MDG-03 je standardní GM detektor, který rozsahem měření 10 µGy/h až 10 Gy/h poskytuje systému zachování možnosti měření dávkového příkonu v případě překročení maximálního počtu pulzů spektrometru GRS10. Energetický rozsah GM je 80-1500 keV. Pro zabezpečení georeferenčních údajů je systém vybaven standardní, dnes již zastaralou, dvanáctikanálovou GPS s externí anténou a režimem poskytujícím data v protokolu NMEA 0183. Pro získávání dat o reálné výšce nad terénem je připojen radarový výškoměr

s rozsahem měření výšky 12 až 750 m. Tento prvek poskytuje zásadní vstup k provádění online kalkulací hodnot příkonu dávkového ekvivalentu vztažených k 1 m nad terénem. Protože je systém použitelný i pro vyhledávání ztraceného zdroje IZ, byl dodatečně doplněn o kameru se záznamem terénu pod helikoptérou, k ověření konkrétní situace, když probíhalo reálné měření. Toto zařízení s názvem GeoImage je tvořeno kamerou, počítačem s aplikačním programovým vybavením, napájecí jednotkou a GPS s externí anténou. Původně bylo dodáno jako plně autonomní, bez fyzického propojení na IRIS. Po úpravách došlo k redukci zařízení pouze na kameru, která byla propojena k řídicí počítačové jednotce IRIS, kde dochází k načítání dat z GPS a rovněž ukládání záznamu v podobě fotografií opatřených georeferenčními údaji.



Obrázek 1 - Systém IRIS na palubě vrtulníku Mi-17 - vlastní zdroj



Obrázek 2 - Montáž zařízení IRIS do vrtulníku policie ČR - vlastní zdroj

2.3.2 Unmanned Aerial Vehicle - dron

V roce 2015 si Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany., v.v.i (SÚJCHBO, v.v.i.) zakoupil bezpilotní letadlo, vrtulník ROBODRONE KING FISHER R 01.1 pro potřeby výzkumu a expertizních činností. Činnost s využitím tohoto UAV byla ústavu povolena Úřadem pro civilní letectví. Tento

dron má přidělenou poznávací značkou OK-X006U a je vybaven GM detektorem. SÚJCHBO, v.v.i. je veřejnou výzkumnou institucí zřízenou SÚJB dle zákona č. 341/2005 Sb., za účelem výzkumné a vývojové činnosti v oblasti chemických, biologických a radioaktivních látek a zabezpečení technické podpory dozorové a inspekční činnosti prováděné tímto Úřadem v radiační ochraně a při kontrole zákazu chemických a biologických zbraní. (14) (15)

Průkopnickou organizací v oblasti využití UAV k tomuto způsobu monitorování je SÚRO, v.v.i., které má již od roku 2014 obdobné zařízení od stejné dodavatelské firmy a navíc spolupracovalo na jeho vývoji. Systém byl vybrán pro jeho univerzálnost, snadný transport a odpovídající ceně. Jedná se o typ RO1.1 Robodrone Kingfisher s přidělenou poznávací značkou OK-X005 s přípevňovacím prvkem, kam lze připevnit různé typy detektorů v držení SÚRO, v.v.i, například detektory NaI(TI) velikosti 2"x2". Systém disponuje kamerou, která poskytuje kontinuální obraz situace v okolí. K dronu lze snadno připevnit do podvěsu zařízení do hmotnosti 4 kg a může být automaticky řízen pomocí SW podél předem stanovené trasy. Spolehlivost a odolnost vůči rušení je zabezpečena dvěma nezávislými anténami, které jsou spárované s přijímačem, a systém samostatně vyhodnocuje kvalitu signálu a vybere nejlepší variantu. Pro případ selhání řídicí komunikace je vybaven funkcí Fail Safe, která automaticky spouští přednastavený letový režim. (16)



Obrázek 3 - Dron používaný k monitorování radiační situace – zdroj SÚRO, v.v.i

Jeden z příkladů použití dronů je z října 2015, kdy proběhlo v areálu odkaliště o. z. TÚU DIAMO, s. p., Stráž pod Ralskem gamaspektrometrické měření in situ. Tohoto měření se zúčastnili zástupci Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze (FJFI), členové mobilní jednotky Státního ústavu radiační ochrany (SÚRO, v. v. i.), Státního ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO, v. v. i.) a zástupce brněnské firmy Georadis, která vyvinula, vyrobila a poskytla pro toto měření speciálně upravený scintilační detekční systém. Cílem měření bylo otestovat a ověřit měření pomocí UAV při monitorování území kontaminovaného radioaktivními látkami. Výsledkem těchto měření jsou mapy koncentrací přírodních radionuklidů a mapa dávkového příkonu gama ve výšce 1 m nad povrchem. Provedená měření a jejich výsledky splnily očekávání a umožnily získat řadu zkušeností

pro urychlení zavádění této moderní techniky pro sledování kontaminací radioaktivními látkami do běžné praxe. (17)

2.3.3 Aerologické sondy

Pro měření prováděná ČHMÚ na území ČR se používá aerologický systém, který je tvořen radiosondou, přijímacím a vyhodnocovacím pozemním zařízením s aplikačním programovým vybavením. Standardní radiosonda obsahuje čidla, která umožňují měřit tlak, teplotu a vlhkost. Jednou z variant používaných sond je sonda RS92-SGPD, která je doplněna o sadu dvou Geiger-Müllerových detektorů. Jeden registruje pouze gama záření, druhý pak gama a beta. Data jsou předávána frekvenčně modulovanými radiovými vlnami v pásmu 400 až 406 MHz. Z těchto dat je počítána výška a teplota rosného bodu. Směr a rychlost větru počítá pozemní zařízení z informací o poloze radiosondy, k jejíž lokalizaci během letu je využíván družicový navigační systém GPS. Radiosonda umožňuje retranslaci navigačních pomocných signálů, přijímaných z navigačních systémů, do pozemního zařízení. Přesnost měření vektoru větru je 0,15 m/s při intervalu měření 10 s. (18)

Aerologická stanice Praha - Libuš měří v koordinaci s AČR přibližně jednou ročně vertikální profily atmosféry včetně záření beta a gama systémem firmy VAISALA, tvořeným radiosondou RS92-SGPD, čidlem radioaktivity NSS921 a pozemním zařízením VAISALA DigiCORA MW 21. Radiosondy jsou vypouštěny na meteorologických balonech TOTEX TA800. ČHMÚ je připraven v případě mimořádné události provést měření na vyžádání Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. (18)



Obrázek 4 - Radiosonda VAISALA doplněná čidlem radioaktivity - zdroj (18)

2.4 Možnosti použití systémů pro letecké monitorování při řešení radičních událostí v ČR

Konkrétní nasazení těchto systémů při řešení radičních událostí je spjato s normami a je možné pouze v rámci národní a částečně i mezinárodní legislativy. Jako první zásadní je zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon. Mimo jiné definuje radiční mimořádnou událost jako událost, která vede nebo může vést k překročení limitů ozáření, a která vyžaduje opatření, jež by zabránila jejich překročení nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiční ochrany. Zákon dále události dělí na události prvního stupně, radiční nehody a radiční havárie. **Událost prvního stupně** je zvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiční mimořádná událost vznikla. **Radiační nehoda** je radiční mimořádná událost nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků vykonávajících práci v aktuální směně osoby, při jejíž činnosti radiční mimořádná událost vznikla nebo vzniklá v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje, která nevyžaduje zavedení neodkladných

ochranných opatření pro obyvatelstvo. Poslední a nejzávažnější je **radiační havárie**, která na rozdíl od nehody vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. Všechny v úvahu připadající okolnosti vedoucí k neplánovanému vystavení fyzické osoby nebo životního prostředí ionizujícímu záření je ze zákona **nehodová expoziční situace**, která může nastat při plánované expoziční situaci nebo být vyvolána svévolným činem a vyžaduje přijetí okamžitých opatření k odvrácení nebo omezení důsledků. Nebo se jedná o **existující expoziční situaci**, která již existuje v době, kdy se rozhoduje o její regulaci, včetně dlouhodobě trvajících následků nehodové expoziční situace nebo ukončené činnosti v rámci plánované expoziční situace. Z výše uvedeného lze vyvodit, že letecké monitorování má opodstatnění při radiačních nehodách, radiačních haváriích s cílem zamezit vzniku nehodové expoziční situace.

2.5 Analýza legislativního rámce leteckého monitorování

Oblast aktuálně platné legislativy, která se vztahuje k leteckému monitorování radiační situace, je možné rozdělit do dvou částí. První se zabývá monitorováním radiační situace a radiační ochranou. Druhá část souvisí s použitými leteckými prostředky. Obě části obsahují ustanovení, která zásadním způsobem regulují použití jednotlivých prostředků.

2.5.1 Legislativa monitorování radiační situace

Státní správu a dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření, v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, chemické a biologické ochrany vykonává ze zákona SÚJB. V oblasti související legislativy došlo od 1. 1. 2017 k zásadní změně s platností zákona číslo 263/2016 Sb., atomový zákon a 264/2016 Sb., kterým se mění některé zákony v souvislosti s přijetím nového

atomového zákona. Ve Sbírce zákonů byly rovněž publikovány další prováděcí právní předpisy. V oblasti řešené problematiky je důležitá Vyhláška 360/2016 Sb., o monitorování radiační situace a Vyhláška 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události. Oblast radiační ochrany je obsahem Vyhlášky 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. V té je například stanovena povinnost zasahujících osob, jejíž vyslání k zásahu se předem předpokládá, v rámci svého pravidelného vzdělávání obdržet obecné a pravidelně aktualizované informace o účincích ionizujícího záření a s tím spojených možných zdravotních rizicích a preventivních opatřeních radiační ochrany k odvrácení nebo snížení ozáření. Dále je zde i povinnost pro osoby vysílající zasahující osobu k zásahu, že ji musí před zásahem informovat o aktuální radiační situaci a odhadech efektivní dávky, kterou může zasahující osoba během zásahu obdržet, a o všech ochranných opatřeních, která je v průběhu zásahu nutné dodržet. (19)

2.5.2 Legislativa provozu leteckých prostředků

Letecké předpisy jsou v České republice uveřejňovány Ministerstvem dopravy ČR prostřednictvím Letecké informační služby (LIS) státního podniku Řízení letového provozu ČR (ŘLP ČR, s.p.). Úřad pro civilní letectví připravuje návrhy jejich znění, a to převážně na základě standardů a doporučených postupů ICAO nebo na základě dokumentů uveřejňovaných Sdruženými leteckými úřady JAAT. Konkrétní závazná ustanovení leteckých předpisů jsou svázána s použitým leteckým prostředkem. Jiná omezení jsou při použití vrtulníku s posádkou, UAV, nebo při použití aerologické sondy s heliem plněným balónem. (20)

V současnosti, kdy došlo k poklesu cen dronů pro komerční i rekreační použití, je nejvíce propagovanou částí letecké legislativy právě část s těmito prostředky spojená. Drony používané pro monitorování mají přísnější pravidla pro jejich používání, protože je nelze zařadit do „rekreační“ kategorie. Musí třeba umožňovat, v případě ztráty spojení se základnou, spuštění automatického režimu umožňujícího bezpečné ukončení letu. V průběhu vzletu a přistání je zakázáno přiblížit se k osobě na méně než 50 metrů horizontálně (kromě pilota nebo doprovázejících osob). Pro drony do 7 kg platí, že minimální vzdálenost od osob a staveb musí být bezpečná. Dále je zakázáno létat blíže oblačnosti než 1500 m v horizontálním směru a 300 m vertikálně. Pro studium oblasti létání v ČR se používá letecká mapa ICAO nebo webový portál AisView. Je nutné prostudovat předem oblasti, kde jsou lety omezené nebo přímo zakázané. Mimo letiště mohou drony létat jen do výšky 300 metrů nad zemí a v oblasti letišť maximálně do výšky 100 m. V ČR zakázán let pouze podle obrazu vysílaného z kamery dronu, nebo létání mimo dohled pilota za pomoci GPS. (21)

2.6 Konkrétní příklad použití leteckého prostředku

2.6.1 Zadání úkolu, stanovení parametrů monitorování

Při zadávání konkrétního úkolu spojeného s využitím prostředků leteckého monitorování je vždy nutné vycházet z aktuálních podmínek a možností dostupných a použitelných systémů. Důležité je ujasnit si, co má být výstupem měření, komu mají být výstupy prezentovány, případně jaká opatření mají být na základě získaných informací aplikována nebo jimi budou ovlivněna. Je důležité co nejpřesněji definovat prostor měření (monitorovací polygon)

a v závislosti na jeho rozměrech stanovit způsob provedení monitorování. Standardně se polygon monitoruje po letových linkách, které mají zpravidla symetrický rozestup. Linky se stanovují ve dvou typech. Linky průzkumné (Survey Lines), které jsou rovnoběžné s delší hranou polygonu a tzv. svazovací linky (Tie Lines) které jsou ve vztahu k průzkumným linkám kolmé, nebo téměř kolmé. Mohou mít rovněž větší rozestup než linky průzkumné, a v podstatě slouží pro doplnění statistických dat post-letového vyhodnocování s využitím vhodných interpolačních metod. Při stanovování azimutu průzkumných linek se v praxi osvědčilo prověřit aktuální meteorologickou situaci a předpověď, především směr a rychlost větru. Při silnějším větru 20 km.h^{-1} a více je výhodnější nekopírovat hranu polygonu, ale upravit azimut průzkumných linek rovnoběžně se směrem větru. Při silném bočním větru je komplikovanější technika pilotáže, zbytečně dochází ke skluzu vrtulníku a častému vybočování z osy linky. Rozteč linek je nutné zvolit především s ohledem na plněný úkol. Dalším parametrem je pak čas průzkumu, vzdálenost k místu, kde lze vrtulník dotankovat a požadovaná hustota bodů pro reprezentativní výstup. Vyplatí se zohlednit i plánovanou rychlost průzkumu, ke stanovení minimálního poloměru otáčení vrtulníku. Například při rychlosti 100 km.h^{-1} je při otáčecím náklonu 15° minimální poloměr otáčky o 180° 294 m. Obvod půlkruhu zatáčky je 922 m a obrat trvá 33 sekund s přetížením 1,04 G. Ideální je proto zvolit vzdálenost mezi linkami 300 m, aby bylo otáčení maximálně ekonomické a komfortní pro zařízení i operátora. Graficky je profil používaného způsobu letu při provádění monitorování znázorněn na Obrázku 8 a.

2.6.2 Příprava projektu

Letecké monitorování stejně jako jakákoli činnost v oblasti krizového řízení musí být řádně plánována. Důsledné plánování pak směřuje k tomu, aby činnost byla provedena efektivně, bezpečně, kvalitně a včas. Základní plánovací proces musí probíhat již při přípravě projektu, ve kterém se jednoznačně stanoví:

1. informace o aktuální situaci (v případě radiační mimořádné situace);
2. kdo monitorování provede a případná součinnost;
3. kdy bude monitorování zahájeno a plánovaný čas ukončení;
4. použitý detekční systém a parametry monitorování;
5. bezpečnostní opatření s důrazem na radiační ochranu;
6. další důležité informace.

Konkrétní příklad zadání je výňatkem z Nařízení Náčelníka generálního štábu AČR k aktivaci Letecké skupiny Armádní radiační monitorovací sítě vydaného v souvislosti se cvičením Zóna 2013, kde bylo nařízeno:

Veliteli 31. brchbo provést aktivaci Letecké skupiny (LeS) ARMS dne 26. 3. 2013 do 18:00 a vyčlenit jednoho příslušníka 314. cv ZHN do funkce velitele LeS. **Veliteli 24. zDL** vyčlenit jeden vrtulník Mi-17 s posádkou od 24.zDL Praha – Kbely, a zabezpečit jeho přelet do areálu 314. cv ZHN dne 27. 3. 2013 do 07:00 hod.

Letecká skupina bude doplněna o specialisty SÚJB (SÚRO) s potřebným přístrojovým vybavením.

Úkoly pro leteckou skupinu:

1. Dne 27. 3. 2013 od 07:00 do 08:00 provést přípravu k plnění odborného úkolu (dle upřesnění SÚJB) a předletovou přípravu s osádkou vrtulníku MI-17.
2. Od 08:00 do 17:00 plnit odborný úkol ve stanoveném prostoru a předat výsledky měření.
3. V 17:00 ukončit aktivaci a pohotovost.
4. Dosažení připravenosti k plnění odborného úkolu leteckou skupinou hlásit stále směně SOC MO cestou dozorců.
5. Při plnění úkolů se důsledně řídit ustanoveními NV MO č. 75/2010 a nařízeními ÚARMS.

Zásady zabezpečení radiální ochrany:

1. Všichni příslušníci AČR plnící úkoly v zóně havarijního plánování a členové dekontaminačních odřadů musí být vybaveni osobními dozimetry.
2. Limit osobní dávky ozáření je stanoven na hodnotu 200 mSv (v případě dosažení, resp. překročení této hodnoty je nezbytné vyřadit příslušníka AČR z dalšího kontaktu s ionizujícím zářením).
3. Po splnění odborného úkolu provede velitel skupiny odečet a vyhodnocení obdržných osobních dávek a hodnoty těchto dávek zaeviduje v „Záznamníku ozářených osob“ viz Příloha 1. (není součástí práce, pozn. autora)
4. Po ukončení cvičení se vyplněné záznamníky archivují u mateřského útvaru a jejich kopie se v případě překročení 1 mSv osobní dávky předloží k posouzení cestou spádových vojenských zdravotnických zařízení Hlavnímu hygienikovi MO.
5. Další opatření v oblasti radiální ochrany jako například jodovou profylaxi a kontrolu zevního ozáření nasazených sil a prostředků AČR v tomto případě nerealizovat.

2.6.3 Provedení gamaspektrometrického měření

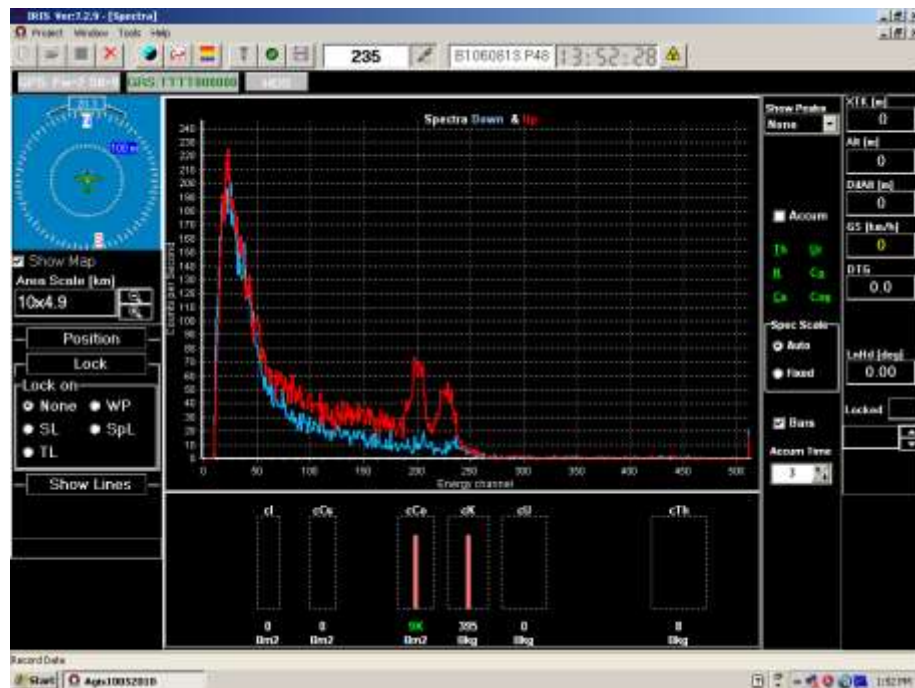
Těsně před samotným monitorováním se provádí předletová příprava pilotů a operátora nebo operátorů. Po předletové přípravě se do Mi-17 instaluje zařízení IRIS. Doba potřebná k instalaci je maximálně 1 hodina. Již při startu a vzletu vrtulníku, v místě, kde se provádí montáž IRIS na palubu, se zařízení

spouští a operátor kontroluje funkci detektoru a připojených periferií. Důležitá je kontrola funkce GPS, radarového výškoměru a kamery zařízení GeoImage. Operátor dále kontroluje, zda probíhá ukládání dat a fotografií. Samotné měření začíná již při letu k definovanému polygonu, kde se bude monitorování provádět. Během tohoto přesunu je vyžádán let ve výšce 500-600 m, ve které je za normální radiační situace eliminován příspěvek fotonů z terestriální složky. Data se načítají po dobu minimálně 10 minut a používají se ke korekci příspěvku pozadí vrtulníku a kosmického záření ve výpočtech po provedeném měření. Při monitorování polygonu operátor sleduje trasu monitorování a dohlíží nad aktuálně měřenými hodnotami. V případě překročení stanovených limitních norem dávkového příkonu, předá informaci pilotovi s návrhem konkrétního opatření (například změna směru, rychlosti nebo výšky letu). Po dokončení měření operátor ukončí nahrávání dat a soubor uloží na externí disk. Následuje přesun do prostoru, kde je provedena kontrola případné kontaminace a dojde k demontáži zařízení. (22)

2.6.4 Vyhodnocení výsledků měření

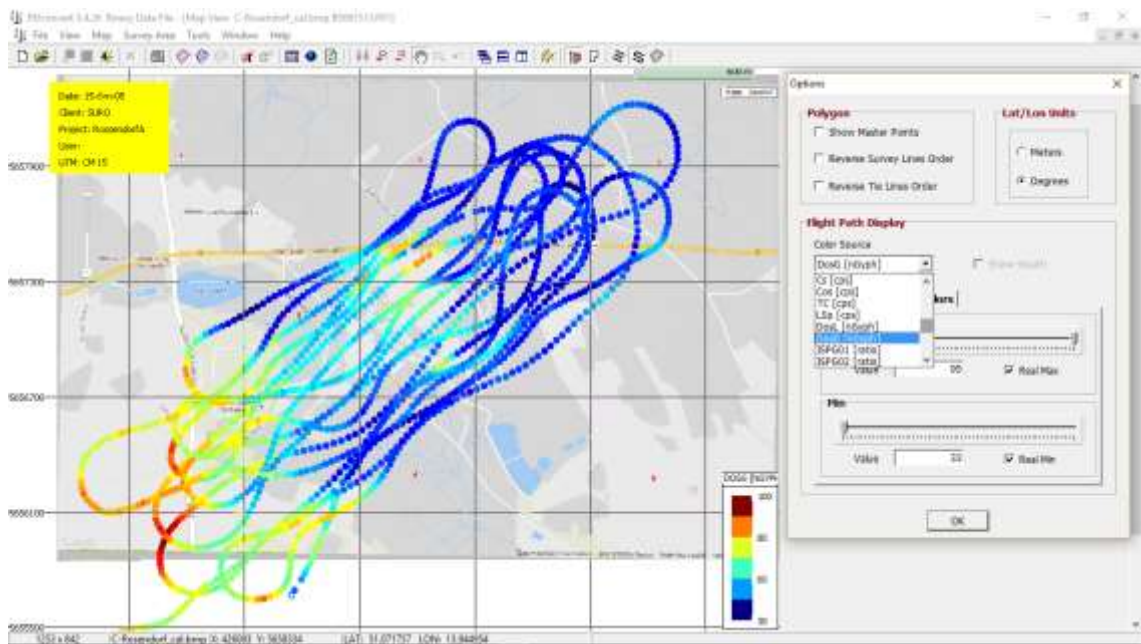
Proces zpracování dat získaných ze zařízení IRIS lze rozdělit do tří částí. V první části se jedná o kalkulace, probíhající již v průběhu měření v programu AGIS, například výpočet hodnot dávkového příkonu k 1 m nad terénem nebo kalkulace plošných aktivit vybraných izotopů. Omezené množství informací je za letu možné zobrazit na displeji operátora viz Obrázek 5. U zásadních veličin lze nastavit hodnoty pro alarm a operátor rovněž může volitelně nastavit požadované údaje pro zobrazení, které jsou prioritou při plnění konkrétního úkolu. Při měření je pak možné tyto hodnoty, včetně jejich vývoje, sledovat.

Důležité pro operátora je věnovat pozornost monitorovanému polygonu a pohybu po jednotlivých letových linkách.



Obrázek 5 - Palubní displej operátora IRIS se zobrazením spekter GRS10 v průběhu měření- vlastní zdroj

Druhým způsobem zpracování, které lze provést až po přistání, je využití aplikačního programového vybavení, které je dodáváno výrobcem systému. Program PEIconvert, umožňuje zobrazit si celkový náhled na mapu monitorovaného polygonu, vždy s jednou zvolenou, již zalkulovanou veličinou viz Obrázek 6. Toto náhledové zobrazení je využíváno především při hledání ztraceného bodového zdroje IZ s velkou aktivitou, kdy lze snadno odhadnout jeho pozici. Dalším využitím je také zpětná vazba operátora směrem k pilotovi vrtulníku, o tom jak přesně dodržuje letové linky a výšku nad terénem.



Obrázek 6 - Grafické zobrazení hodnot dávkového příkonu v programu PEIconvert - vlastní zdroj

Poslední, nejpřesnější, ale nejnáročnější je zpracování dat, které se zabývá výpočty z již naměřených dat po ukončeném měření. Zpravidla probíhá na výkonnějším počítači a výstupem jsou grafické vrstvy v mapě monitorovaného polygonu. Aby bylo možné zpracování a zobrazení dat s využitím běžně dostupných geografických aplikací jako je MapInfo, ArcGIS nebo freeware QGIS, lze data exportovat do souboru CSV (Comma-separated Values). V těchto programech lze data dále zpracovávat, například provádět statistické výpočty, včetně interpolací hodnot, a ty pak zobrazit nad vrstvou mapy monitorovaného polygonu. V programu dodaném výrobcem PRAGA 3, je možné provádět korekce měřených dat. Jedná se především o korekce na pozadí vrtulníku včetně kosmického záření a korekce na atmosférický radon, což nelze provádět přímo při měření. (22)

3 CÍL PRÁCE

Z dostupných zdrojů, kontaktem s odborníky v této oblasti a z vlastní zkušenosti je v práci zpracován přehled prostředků leteckého monitorování, jejich možnosti a odkazy na organizace, které jimi disponují. Tento přehled je doplněn o porovnání se systémy používanými dalšími státy v diskusi následován výčtem možností, výhod a omezení. Analýza legislativního rámce poskytuje přehled závazných norem pro tuto oblast s důrazem na zásadní omezení.

3.1 Souhrnný přehled prostředků

V případě mimořádné radiační situace nebo havárie spojené s únikem radioaktivních látek do životního prostředí je v některých fázích praktické využít leteckého monitorování k získání prvotních dat o rozsahu kontaminace. Jelikož vlastníkem prostředků použitelných k leteckému monitorování radiační situace není pouze jediný subjekt (SÚRO, v.v.i.; SÚJCHBO, v.v.i.; ČHMÚ, AČR, ...) je v této práci zpracován přehled jednotlivých prostředků a možnosti jejich použití. V práci je dále uveden základní přehled legislativy, informací a faktů potřebných k získání komplexního náhledu do problematiky leteckého monitorování. Tyto přehledy usnadní orientaci operátorům těchto systémů, a poskytnou celkový přehled bezpečnostním a krizovým manažerům, kteří o použití těchto systémů rozhodují.

3.2 Porovnání možností a omezení

V porovnání detekčních systémů používaných v ČR s aktuálně používanými systémy v zahraničí je uvedeno několik příkladů používaných systémů a jejich

parametrů. Sledovaným výstupem porovnání bylo zhodnocení konkurenceschopnosti prostředků používaných v ČR v některých klíčových parametrech.

4 METODIKA

Teoretická část bakalářské práce je založena na rešerši dostupných informačních zdrojů literatury v oblasti legislativy, detekčních systémů a leteckého monitorování radiační situace, včetně elektronických zdrojů, které byly získány v odborných knihovnách. V práci je shrnuto základní penzum informací pro komplexní pochopení problematiky.

Praktická část v popisu současného stavu je zaměřena na konkrétní příklad použití detekčního systému. Byly použity praktické výstupy a zkušenosti získané ze společných výcviků odborníků SÚRO v. v. i. a Armády České republiky. V příloze je zpracován návrh metodiky rychlého zpracování a grafického zobrazení dat z monitorování.

5 VÝSLEDKY

Rešerší získaných podkladů informací jsem identifikoval celkem tři prostředky leteckého monitorování radiační situace použitelné s vrtulníkem, UAV, nebo jako neřízená aerologická sonda. Tyto prostředky jsou připraveny a mohou být nasazeny v případě potřeby řešit mimořádnou událost spojenou s únikem radioaktivních látek. Z výstupů porovnání s vybranými prostředky leteckého monitorování používanými v zahraničí vyplývá, že ty používané v ČR, jsou na srovnatelné úrovni. Při porovnání byla konfrontována základní technická data systémů, ale nebyla hodnocena úroveň obsluhy a množství nasaditelných prostředků.

V práci je shrnut přehled základních parametrů používaných systémů včetně jejich výhod, nevýhod a omezení. Praktický způsob použití je prezentován na konkrétním příkladu. Část práce zabývající se oblastí výstupů monitorování je podpořena samostatnou přílohou s metodikou vizualizace dat v jedné z bezplatných GIS aplikací.

Práce je souhrnem informací v oblasti leteckého monitorování radiační situace vhodných jako studijní podklad pro operátory těchto systémů, nebo pro personál, který rozhoduje o nasazení těchto prostředků, případně adresáti výstupů monitorování.

6 DISKUZE

6.1 Srovnání s vybranými systémy leteckého monitorování používanými v zahraničí

Z dostupných zdrojů jsem získal informace a technická data o několika systémech používaných v zahraničí, které dále porovnám s těmi, které jsou používané v ČR. První z nich byl používán japonským ministerstvem vzdělávání, kultury, sportu, vědy a technologie společně s americkým oddělením energetiky těsně po havárii jaderné elektrárny Fukushima Daiichi. Byl používán pro letecké monitorování radiační situace v okruhu 80 km od epicentra události. Použitý systém monitorování byl tvořen dvěma scintilačními detekčními jednotkami. První z nich byl plastický scintilátor 270 x 300 x 20 mm a druhý spektrometrický scintilátor byl LaBr₃(Ce) (bromid lantanitý s příměsí ceru) o průměru 38,1 mm a délce 38,1 mm se spektrem rozděleným do 1024 kanálů. Leteckým prostředkem byla automatická dálkově ovladatelná helikoptéra RMAX G1s, vyráběná firmou Yamaha Motor Co., Ltd (Shizuoka, Japonsko). Hmotnost helikoptéry je 94 kg, nosnost 10 kg, maximální doba letu 1,5 hodiny a rychlost 72 km.h⁻¹. Rychlost většiny prováděných monitorovacích letů byla 8 m/s ve výšce mezi 50 až 80 m se vzdáleností letových linek 50 až 80 m s frekvencí načítání a ukládání spektra po 1 s. Systém byl osazen GPS, s matematicky vypočítávanou výškou nad terénem pomocí odečtu dat z digitálního výškopisného modelu (DEM). Uvedený systém je podobný dronům, které jsou používány SÚRO, v.v.i. a SÚJCHBO, v.v.i. v ČR. Díky větší nosnosti je ale umožněna montáž dvou detektorů s větším objemem. Větší hmotnost detekční části japonského systému však omezuje dobu letu a tím také maximální letovou vzdálenost. (23)

Ve Švýcarsku je oblast monitorování radiační situace v zodpovědnosti National Emergency Operational Centre (NEOC), který je připraven řešit mimořádné situace 24 hodin denně 7 dní v týdnu. Letecká gamaspektrometrie je součástí této instituce od roku 1986. Aktuálně používaný systém je RSX4 dodaný firmou Radiation Solutions. Základem je detekční jednotka NaI(Tl) o celkovém objemu 16.8 dm³ se spektrem rozděleným do 1024 kanálů. Systém je opatřen autonomní GPS a při měření transportován v přepravní části helikoptéry Super Puma. Pracovní skupina se pravidelně účastní výcviku a provádí monitorování v oblastech Švýcarska, které bylo kontaminované ¹³⁷Cs po černobylské havárii, například v jižní části Bellinzona. (24)

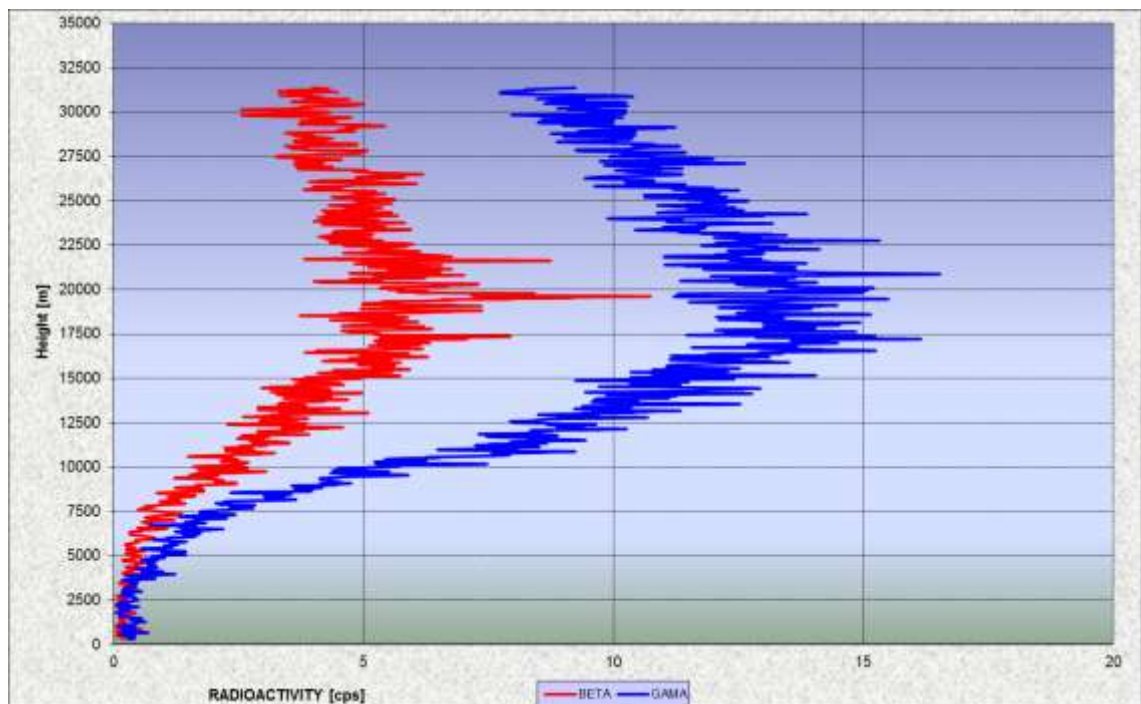
Ve Francii je zodpovědnou složkou Institute de Radioprotection et Surete Nucleaire (IRSN) Od roku 2012 je pro letecké monitorování používán systém ULYSSE. Jedná se o modulární systém, kde na základě řešené situace lze modulárně připojit detekční jednotky NaI(Tl) o dílčím objemu 3 in³, 2 dm³ nebo 4 dm³ nebo LaBr₃(Ce) s objemy 1,5 in³, GPS využívající digitální výškopisná data k výpočtu výšky nad terénem. První monitorování s tímto systémem byly provedeny v roce 2013, kdy byla detekční část zamontována do letadla. (25)

Ze souhrnu výše uvedených informací o systémech používaných ve Švýcarsku a Francii je evidentní, že jsou velmi podobné systému IRIS používanému v ČR. Srovnatelné jsou jak v oblasti detekční části, tak i použitím pilotovaného leteckého prostředku. U používaného transportního prostředku je pak zřetelný rozdíl u francouzského systému, který používá letadlo s pevnými křídly, což neumožňuje vis nebo pomalý let nad polygonem. U vrtulníku Super Puma je z hlediska radiační ochrany výhodnější dvojčlenná posádka, na rozdíl od Mi-17, kde jsou v posádce dva piloti a palubní technik. Jistou nevýhodou mají

systemy, které nedisponují vlastním výškoměrem a používají při výpočtu údajů z GPS a DEM.

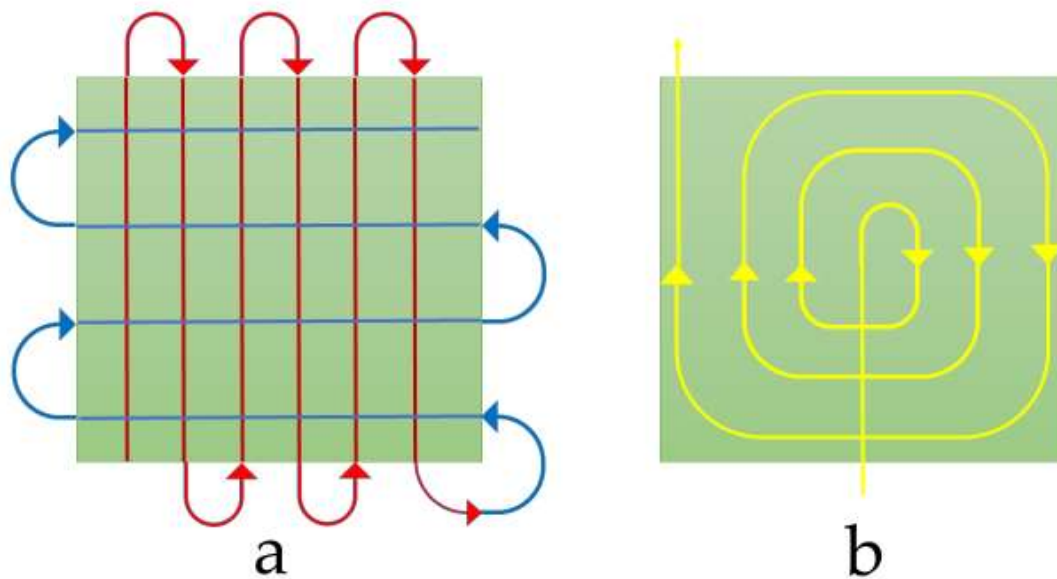
6.2 Porovnání metodik provádění monitorování

Diskuze k metodikám provádění leteckého monitorování je více zaměřená na pilotované a bezpilotní prostředky. Při použití aerologické sondy je metodika relativně stručná, jelikož lze stanovit pouze čas a místo jejího vypuštění. Samotný let je ovlivněn z větší části pouze směrem a rychlostí větru. Měření sondy fakticky končí v okamžiku, kdy exploduje balón, který sondu unáší, a sonda spadne na zem. Maximální dosaženou výšku nelze předvídat ani ovlivnit. Výstupem aerologického měření jsou data z detektorů záření β a γ pro příklad zobrazená v grafu viz Obrázek 7.



Obrázek 7 - Grafický výstup aerologického monitorování se sondou pro detekci záření β a γ - vlastní zdroj

Metodika provádění průzkumu stanoveného polygonu pilotovaným prostředkem spočívá ve stanovení trasy monitorování, která po jejím absolvování poskytne dostatek reprezentativních údajů ke statistickým výpočtům. Trasa musí být jasně definovaná souřadnicemi a směrem, aby bylo možné kdykoli po přerušení monitorování nebo ztrátě orientace plynule pokračovat. V praxi jsou používány dvě varianty způsobu letu při provádění monitorování, viz Obrázek 8. Varianta **a**, po letových linkách, je jednodušší na plánování, snazší pro orientaci pilotů a operátora. Protože je anténa radarového výškoměru u zařízení IRIS namontována fixně k trupu vrtulníku, dochází při jeho obrazech nebo zvětšení náklonu k exponenciálnímu nárůstu chyby v údajích o výšce nad terénem. Rovněž samotný detektor je připevněn k podlaze vrtulníku a tak při změně náklonu dochází ke změně geometrie měření. Proto výhodou tohoto způsobu letu je, že jsou obraty vrtulníku, při kterých jsou výšková data a data z měření zatížena chybou, prováděny mimo monitorovaný polygon. Také lze na základě vyhodnocení prvotního přeletu po průzkumných linkách, na obrázku označeny červeně, upravit rozestupy linek svazovacích, označeny modře. Nevýhodou je delší trasa letu a tím delší čas potřebný k monitorování. U varianty **b** je tedy zásadním přínosem kratší dráha letu. Styl je využitelný při monitorování menším snadněji ovladatelným vrtulníkem vybaveným kvalitním zařízením GPS, na menším polygonu.



Obrázek 8 – Varianty způsobu provádění leteckého monitorování - vlastní zdroj

6.3 Výhody používaných systémů

Společnou výhodou aktuálně používaných prostředků je velká mobilita umožňující nasazení i v jinak nedostupném terénu. Výhodou letecké gamaspektrometrie za použití vrtulníku je ve srovnání s možnostmi dronů velká nosnost, která umožňuje použití několika detektorů současně navíc s dostatečným detekčním objemem. Díky této nosnosti a palubním napájecím možnostem stejnosměrného napětí 24 až 29.4 V s proudem do 10 A vrtulníku Mi-17, který se běžně využívá, je možné připojit například polovodičový detektor HPGe, nebo další systém. Z hlediska radiační ochrany je v případě nárůstu hodnot dávkového příkonu možné změnit rychlost, směr nebo výšku letu vrtulníku. V případě hledání bodového zdroje IZ je možné pomalým letem

zaměřit přesnou polohu zdroje, případně zůstat ve visu a načítat spektra po delší časový úsek. (26)

6.4 Nevýhody a omezení při použití

6.4.1 Omezení legislativní

Jako první je třeba zmínit omezení, plynoucí z aktuálně platné legislativy. Liší se v závislosti na použitém prostředku a mají nemalý vliv nejen na provádění reálného monitorování, ale také zásadně ovlivňují výcvik. Většina výchozích parametrů a limitů je stanovena v zákonné legislativě viz kapitola 2.5. Tato omezení jsou sice výchozími mantinely, ale musí být rozpracována a upravena v každém případě použití s konkrétním prostředkem monitorování. V oblasti legislativy použití leteckých prostředků, především dronů, by bylo vhodné pro případy závažných mimořádných událostí nebo krizových situací selektivně umožnit použít tyto prostředky bez některých omezení. Z důvodu zabezpečení radiační ochrany obsluhy a zkrácení doby monitorování by bylo benefitem umožnit let dronu bez nutnosti vizuálního kontaktu a bez souhlasu majitele pozemku, nad kterým je monitorování plánováno. Zvýší se sice riziko, že se zařízení vymkne kontrole a hrozí tak srážka nebo nekontrolovatelný pád, ale v určitých odůvodněných případech výhoda získaných informací takto provedeného monitorování, míru rizika posouvají do limitů přijatelného. Navíc je dnes možné dron opatřit automatickým bezpečnostním systémem, který vyhodnocuje, zda je zařízení pod kontrolou, a v případě že ne, dojde k automatickému zastavení a vypuštění padáku.

6.4.2 Technická omezení a nevýhody

Již samotný princip detekce, který probíhá v nemalé vzdálenosti od zdroje je největším omezením. Má-li být IZ detekováno, musí být z principu mezi zdrojem a detektorem vzdálenost, kterou je IZ schopné absolvovat. Proto se také většina používaných detektorů v leteckém monitorování omezuje na záření γ , zřídka pak β a neutronové záření. Technicky lze nejpřesnějších hodnot za letu dosáhnout, když je vzdálenost detektoru od zdroje minimální a pokud možno konstantní. Nejpřesnější data lze získat při monitorování s přesným kopírováním terénu a dodržováním stanovené letové výšky, s výjimkou monitorování zdrojů IZ s vysokou aktivitou, kde může dojít k vyřazení scintilačního detektoru z činnosti. Minimální letová výška je omezena jednak legislativně, ale v případě, kdy se jedná o plošnou kontaminaci, je také důležité dostatečnou výškou předejít kontaminaci leteckého prostředku a detektoru rozvířením kontaminantu od proudu vzduchu vznikajícího aerodynamickým vztlakem. Přesné kopírování prostoru ve fixní výšce nad terénem rovněž omezují technické parametry leteckého prostředku obzvláště v členitém, hornatém terénu. Výšku je vhodné za letu korigovat ve vztahu k použitému detektoru a jeho měřitelným maximům, především s důrazem na radiační ochranu posádky. Hodnoty příkonových dozimetrických veličin vztažené k výšce 1 m nad terénem stejně jako například výpočty aktivit ze získaných spekter jsou vypočítávány matematicky a je nutné tyto výstupy kvalifikovaně prezentovat.

Maximální rychlost monitorování je většinou spojená s maximální rychlostí použitého leteckého prostředku a pro většinu prostředků není provoz při maximálních rychlostech ekonomický. Rychlost monitorování také ovlivňuje

použitý detekční systém, konkrétně frekvence načítání a ukládání dat. Běžně používaná rychlost $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a frekvence detekce 1 s u zařízení IRIS znamená záznam každých přibližně 28 m. Pro statistické výpočty s předpokladem interpolací hodnot v celém prostoru průzkumu je tedy nejvýhodnější letět co nejpomaleji. Lze tak činit pouze na úkor rychlosti prováděného monitorování a při hodinové spotřebě téměř 1 000 l paliva pro vrtulník Mi-17 je to i značně neekonomické.

S větším počtem omezení a nevýhod je spojeno monitorování prováděné pilotovaným prostředkem s operátorem na palubě. Z hlediska radiační ochrany je to riziko, kdy může dojít k expozici posádky a obsluhy detektoru. Proto je nutné vždy dodržovat bezpečnou vzdálenost a trvale monitorovat příkonové hodnoty. Po rozsáhlejší mimořádné události může být rizikem také kontaminace nacházející se ve vzduchu. Z těchto důvodů je důležité nezahajovat monitorování, do doby, než je jisté, že se kontaminant nachází pouze na zemi, po tak zvaném ukončení vypadávání částic. Proti stacionárním systémům, kde je v okolí detektorů stálejší hodnota přírodního pozadí, je měření zatíženo větší chybou. Pořád je ale výstup natolik reprezentativní, že umožňuje zpracovat návrhy zásadních rozhodnutí, jako jsou například navrhované prostory evakuace a nejvýhodnější trasy k opuštění kontaminovaného prostoru. Pro detailnější potvrzení hodnot lze vyslat mobilní skupiny, které mohou využít výstupy leteckého monitorování pro plánování trasy, místa odběru vzorků a radiační ochrany. (27)

6.4.3 Vliv prostředí

Dalším nikoli však poslední faktor ovlivňující zdárný průběh monitorování je prostředí, a to nejen v místě kde má být odborný úkol plněn, ale také například místo startu a přistání. Počasí a jeho předpověď hraje důležitou roli při rozhodování, jaký prostředek je možné použít, kdy a s jakým omezením. Nejvíce limitující je rychlost větru, nízká oblačnost, mlhy, dále pak bouřky, srážky, ale také samotná fáze dne. Jen málo leteckých prostředků je plně použitelných i v noci. Přítomnost srážek nemusí být problémem jen pro letecký prostředek, ale také dochází k ovlivnění měření. Při monitorování zemského povrchu působí sněhová pokrývka, led nebo povodeň jako nezanedbatelné stínění, a navíc díky nerovnoměrnému pokrytí zatěžuje statistické výpočty velkou chybou. V ojedinělém případě ale mohou takovéto podmínky kvalitu detekce i zvýšit. Je tomu tak v případech, kdy se kontaminace, nebo hledaný zdroj IZ nachází na vrstvě sněhu, který přirozeně stíní pozadí z podloží nebo z kontaminace nacházející se pod jeho povrchem. Trvajících dešťové srážky mohou taktéž změnit pozici kontaminantu, což například znamená, že vypočítané hodnoty koncentrací z provedeného monitorování budou zavádějící. Další vliv, který se musí zohlednit je terén, jeho porost, členitost případná zástavba a výskyt bezletových zón. Nelze opomenout také strukturu místního geologického podloží ve vztahu k hodnotám přírodního pozadí a k rozsahu ovlivnění měření radonem.

6.5 Možnosti dalšího vývoje

Oblast možností, kam až lze tuto oblast posunout, je omezená pouze dostupností zdrojů, informací a ochotou lidstva tuto oblast dále rozvíjet.

Existuje zde celá škála odvětví, neustále produkující inovace a zdokonalující technologické postupy výroby leteckých prostředků, detekčních systémů nebo jejich jednotlivých částí. Z hlediska uživatele je důležité trvale udržovat přehled nad výzkumnými a vývojovými projekty, které by svým výstupem mohli přispět ke zdokonalení nebo rozšíření možností. Ze současné praxe lze odvodit minimálně jednu, ještě důležitější skutečnost a tou je bezesporu výchova a vzdělání nových odborníků v této oblasti, kteří jediní mohou reálně tuto oblast odborně posunout a to díky vlastnímu entuziastickému přístupu. Již Francis Bacon zastával názor, že vynálezy, které závisejí na celkovém stavu znalostí, mohou být učiněny jen tehdy, je-li k dispozici vědecký a informační základ.

U leteckých prostředků je snaha výrobců o maximální zefektivňování výroby, integraci nových pevnějších a lehčích materiálů, akceptace ekologických norem a přístupů při výrobě. Díky velkému rozmachu implementace dronů do různých činností lze očekávat jejich větší využití na úkor pilotovaných vrtulníků s operátorem na palubě. Odpovídají tomu i novinky ve světě elektrotechniky, například nedávno zveřejněná zpráva o testování akumulátorů se skleněným elektrolytem s větší kapacitou a delší životností. Tyto dílčí inovace rychle posouvají možnosti používaných prostředků. U použití dronů není nutné používat velké objemy detektorů, protože mohou létat podstatně blíže k zemskému povrchu potažmo ke zdroji IZ. Riziko kontaminace lze v budoucnu snížit použitím hermeticky uzavřeného zapouzdření detekčního systému i jednotlivých periferií dronu. Toto pouzdro vyrobené z vhodných materiálů může také usnadnit případnou dekontaminaci. Určitý vývoj probíhá také ve směru k renesanci využití vzducholodí. Jejich

velkou výhodou je doba, po kterou jsou schopné operovat ve vzduchu, nosnost a ve vojenském měřítku také nesnadná detekce místa pohybu vzducholodi. Mezi nevýhody lze zařadit malou rychlost, těžší ovladatelnost a využitelnost za nepříznivého počasí.

Další vývoj, který běží paralelně nemalou rychlostí, je oblast informačních technologií a komunikačních a informačních systémů. Hardware se neustále zmenšuje, zrychluje, snižuje se jeho spotřeba a výroba se neustále zefektivňuje. U aplikačního programového vybavení je to s rychlostí provádění vylepšení a úprav podobně. Díky tomuto dynamickému vývoji je možné systémy téměř neustále zdokonalovat a upravovat dle aktuálních potřeb koncového uživatele. Také je otevřená možnost vývoje a instalace dalších detektorů nebo periférií, které výstupy rozšíří nebo upřesní. Jednou z variant může být k běžné kameře přidat i termokameru nebo kameru pro 3D záznam, které jsou již dnes součástí některých mobilních telefonů. 3D záznam s termokamerou může za letu zaevidovat případnou přítomnost nebo pohyb oblaku kontaminace. A to ať se jedná o kontaminaci látkami radioaktivními nebo chemickými. Jako další využití, které si dokáží představit je v průběhu leteckého monitorování radiační situace také provádět aktivně vyhledávání osob, které se v monitorované oblasti pohybují a pravděpodobně nejsou informováni o mimořádné situaci. Kdyby byl dron vybaven reproduktorem, mohl by se tak snadno stát prostředkem varování osob, které se nacházejí v prostoru kontaminace. Kamery, kterými jsou dnes zařízení vybaveny, mají většinou již i citlivý mikrofón, tak by operátor dronu mohl snadno obousměrně komunikovat s osobami v oblasti a odeslat je například k místu dekontaminace. K tomuto

aktivnímu vyhledávání osob by mohla sloužit právě již zmiňovaná termokamera ve spojení se speciálně vytvořenou aplikací.

7 ZÁVĚR

Události v Černobyli a Fukušimě, jakkoli vznikly odlišným způsobem, poukázaly na fakt, že i jaderné elektrárny plně zabezpečovacích systémů nejsou úplně bez rizika fatálního selhání. Také zdroje IZ nacházejí stále nové uplatnění v průmyslu nebo zdravotnictví a je možné, že při přepravě nebo manipulaci dojde k nehodové expoziční situaci. Tyto situace je nutné řešit a v hierarchii opatření je monitorování rozsahu kontaminace jedno z prvních a nejdůležitějších. Proto je oblast leteckého monitorování obor s velkou perspektivou, a chtěl bych, aby souhrn informací a poznatků v této práci byl přínosem pro operátory, ale také pro bezpečnostní a krizový management, který o použití těchto systémů rozhoduje a ve finále je také adresátem výstupů monitorování.

Prostředky aktuálně využívané v ČR, mohou být plnohodnotně nasazeny pro monitorování radiační situace po událostech spojených s únikem nebo ztrátou či krádeží zdrojů IZ. Jednotlivé systémy jsou na úrovni srovnatelné s těmi, které jsou používány v zahraničí. Doba, po kterou jsou prostředky v užívání jednotlivých institucí a frekvence výcviku, poskytuje záruku dostatečné zkušenosti obsluh v jejich používání.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ARMS – armádní radiační monitorovací síť,

CdZnTe – kadmium zinek telurid (polovodičový detektor)

CSV – Comma-separated Values (soubor s hodnotami oddělenými čárkou)

cv ZHN – centrum výstrahy zbraní hromadného ničení

DEM – Digital Elevation Model

GSM – Groupe Spécial Mobile (sítě mobilních operátorů)

GM – Geigerův-Müllerův (čítač)

HPGe – High Purity Germanium detector (polovodičový HPGe detektor)

IAEA – International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)

ICAO – International Civil Aviation Organization (Mezinárodní organizace pro civilní letectví)

INES – The International Nuclear Event Scale (mezinárodní stupnice hodnocení radiačních událostí)

IZ – ionizující záření

IZS – integrovaný záchranný systém

JAAT – Joint Aviation Authorities Training

JE – jaderná elektrárna

JEZ – jaderné energetické zařízení,

keV – kiloelektronvolt

LaBr₃ (Ce) – bromid lantanitý s příměsí ceru (scintilační detektor)

LIS – Letecká informační služba

MO – Ministerstvo obrany

NATO – North Atlantic Treaty Organization (Severoatlantická aliance)

NaI(Tl) – jodid sodný s příměsí thalia (scintilační detektor)

NGŠ – náčelník generálního štábu

NMEA – National Marine Electronics Association

RMS – radiační monitorovací síť

SI – Le Système International d'Unités (mezinárodní soustava jednotek)

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚJCHBO, v.v.i. – Státní úřad jaderné, chemické a biologické ochrany veřejná
výzkumná instituce

SÚRO, v.v.i. – Státní ústav radiační ochrany veřejná výzkumná instituce

SVZ – síť včasného zjištění

TDS – teledozimetrický systém

ÚARMS – Ústředí armádní radiační monitorovací sítě

VGHMÚř – Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad

Wi-Fi – wireless fidelity

α – alfa, druh ionizujícího záření;

β – beta, druh ionizujícího záření;

γ – gama, druh ionizujícího záření;

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Běhounek, František. *Radium a paprsky X: (tajemství hmoty a energie)*. Praha : Matice lidu, 1924.
2. Hála, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno : Konvoj, s.r.o, 1998. 80-85615-56-8.
3. SÚRO, v.v.i. Aktuální radiační situace na území České Republiky. SÚRO. [Online] 2017. [Citace: 2. únor 2017.] <https://www.suro.cz/cz/rms/aktualni-radiacni-situace-na-uzemi-ceske-republiky>.
4. Ullmann, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. Ostrava : Ostravská univerzita v Ostravě, Fakulta zdravotnických studií, 2009. 978-80-7368-669-7.
5. WHO Media, centre. World Health Organization. WHO. [Online] april 2016. [Citace: 16. leden 2017.] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/en/>.
6. SÚJB. O radiačním monitorování. [Online] [Citace: 14. únor 2017.] <https://www.sujb.cz/monras/info/informace.html#z0>.
7. Skalická, Zuzana, a další. Radiobiologie. [Online] [Citace: 2. únor 2017.] <http://fbmi.sirdik.org/>.
8. Gerndt, Josef a Průša, Petr. *Detektory ionizujícího záření*. Praha : ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04710-1.
9. Ullmann, Vojtěch. Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. [Online] <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#5>.
10. Kolektiv SÚRO v. v. i, KJR FJFI ČVUT a Lynax. Metodika pro testy odezvy detekčních systémů mobilních skupin v poli reálného štěpného spektra radionuklidů vytvořeného pomocí experimentálního školního reaktoru malého výkonu VR-1. [Online] 31. Březen 2015. [Citace: 2. Březen 2017.]

- file:///C:/Users/nprap.%20Kojzar%20Ladisl/Downloads/Metodika%20pro%20testy%20odezvy%20detekcnich%20systemu%20mobilnich%20skupin.pdf.
11. Pavlík, Josef. *Letecká gama spektrometrie a monitorování radiační situace v podmínkách AČR*. Vyškov : Univerzita obrany, 2013.
 12. SÚJB. *Vyhláška 360/2016*. Praha : Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2016.
 13. IAEA. *Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration*. Viena : IAEA, 2011. 9789201290106.
 14. SÚJCHBO, v.v.i. *Výroční zpráva o činnosti SÚJCHBO, v.v.i. za rok 2015*. místo neznámé : SÚJCHBO, v.v.i, 2016.
 15. SÚJCHBO, v.v.i. Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany. *SÚJCHBO, v.v.i.* [Online] WordPress, 2017. [Citace: 19. leden 2017.] http://www.sujchbo.cz.scimitar.blueboard.cz/?page_id=32.
 16. Robodrone. Státní ústav radiační ochrany. *Robodrone*. [Online] Robodrone industries s.r.o, 2014. [Citace: 21. duben 2017.] www.robodrone.com/suro.
 17. Thinová, Lenka. Gamaspektrometrické měření in situ s využitím dronu. *DIAMO*. 2015, 12.
 18. Aerologie - měření radioaktivity. [Online] 2010-2011. [Citace: 13. únor 2017.] http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_radac.html.
 19. Vyhláška 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. [Online] [Citace: 14. únor 2017.] <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasiky/sb0172-2016.pdf>.
 20. Úřad pro civilní letectví. *Letecké předpisy*. [Online] 2011. [Citace: 14. únor 2017.] <http://www.caa.cz/predpisy/letecke-predpisy>.

21. Předpisy pro létání s drony v ČR. *Droneweb*. [Online] 2016. [Citace: 15. únor 2017.] <http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/37-predpisy-pro-letani-s-drony-v-cr>.
22. Ohera, Marcel. *Vyhodnocování výsledků letecké gamaspektrometrie*. Vyškov : Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, 2010.
23. Yukihiša, Sanada a Atsuya, Kondo. Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant. [Online] 25. November 2013. [Citace: 16. únor 2017.] <http://dx.doi.org/10.1071/EG13004>.
24. Butterweck, Gernot a Bucher, Benno. *Airborne Gamma-Spectrometry in Switzerland*. Chemnitz : Federal Department of Defence, Civil Protection and Sport, 2015.
25. Bardet, Adeline a Bruno, Valerie. *IRSN Aerial Measuring System*. Chemnitz : Institute de Radioprotection et Surete Nucleaire, 2015.
26. airspot.ru. *ВЕРТОЛЕТ Ми-171, РУКОВОДСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*. [Online] 26. ИЮНЬ 1995. [Citace: 2. Březen 2017.] http://airspot.ru/book/file/1194/_____ - 171._____5__ - 1995.pdf.
27. NATO, Allied publication, překlad interního dokumentu. *ATP-45 Výstraha, hlášení a předpověď ohrožení chemickými, biologickými, radiologickými a jadernými incidenty (příručka operátora)*. 2014.

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Systém IRIS na palubě vrtulníku Mi-17 - vlastní zdroj.....	27
Obrázek 2 - Montáž zařízení IRIS do vrtulníku policie ČR - vlastní zdroj.....	28
Obrázek 3 - Dron používaný k monitorování radiační situace – zdroj SÚRO, v.v.i.....	30
Obrázek 4 - Radiosonda VAISALA doplněná čidlem radioaktivity - zdroj (18)	32
Obrázek 5 - Palubní displej operátora IRIS se zobrazením spekter GRS10 v průběhu měření- vlastní zdroj	40
Obrázek 6 - Grafické zobrazení hodnot dávkového příkonu v programu PEIconvert - vlastní zdroj.....	41
Obrázek 7 - Grafický výstup aerologického monitorování se sondou pro detekci záření β a γ - vlastní zdroj	48
Obrázek 8 – Varianty způsobu provádění leteckého monitorování - vlastní zdroj .	50

11 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Přehled základních používaných dozimetrických veličin (6)	18
---	----

12 PŘÍLOHY

12.1 Příloha 1 Metodika vizualizace dat v aplikaci Quantum GIS

Uvedená metodika je zpracována jako zjednodušený návod využití aplikačního programového vybavení Quantum GIS (dále jen aplikace) ke zpracování dat, získaných při leteckém případně pozemním radiálním průzkumu. Jako konkrétní příklad je použita část exportovaných dat ze zařízení IRIS ve formátu Comma Separated Value (CSV) exportovaných z programu PEIView dodávaného výrobcem zařízení. Uvedený postup lze použít u jakýchkoli georeferencovaných dat s obdobnou strukturou. Pro vizualizaci byla použita aktuální verze aplikace číslo 2.18.5-1 a data z testů na polygonu vojenského výcvikového prostoru Vyškov. Grafickým výstupem jsou hodnoty dávkového příkonu měřené leteckým průzkumem ve výšce 50 m přepočítané k 1 m nad terénem.

Metodika je rozdělena do těchto částí:

- Úprava dat před použitím
- Vkládání dat do aplikace
- Vizualizace bodových hodnot
- Interpolace

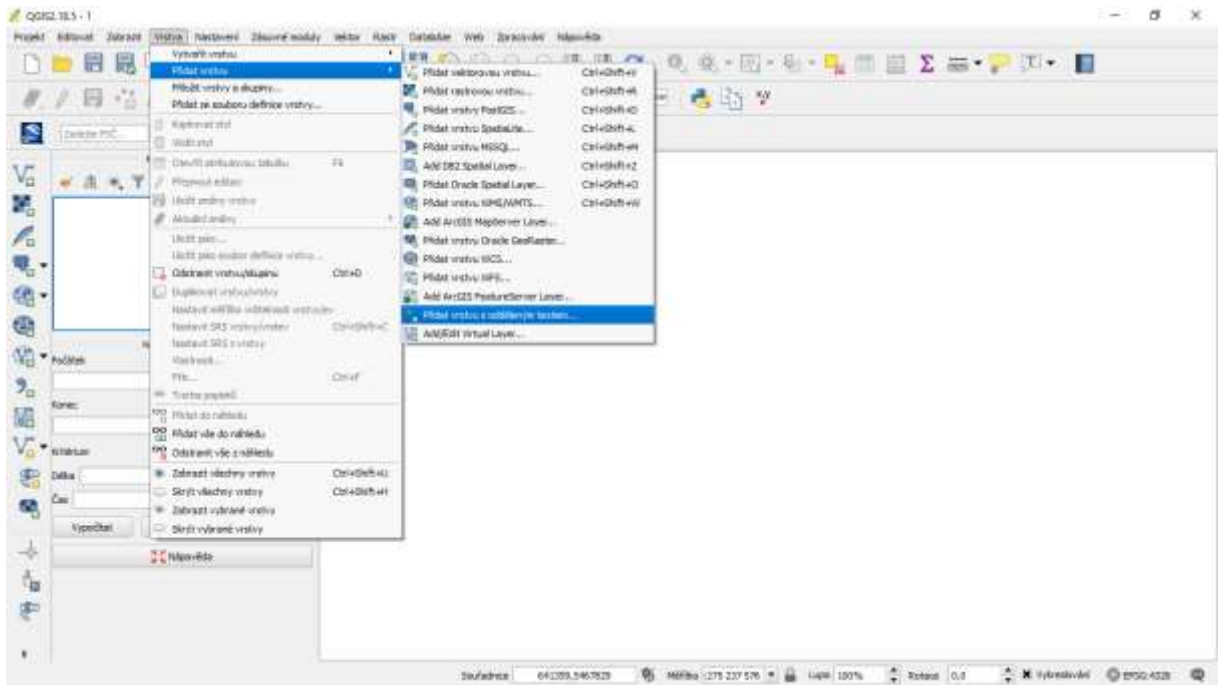
12.1.1 Úprava dat před použitím

Při použití souboru CSV není nutné provádět dodatečné úpravy. Před načtením dat do aplikace je doporučeno soubor zkontrolovat některým z běžných textových programů a ověřit, zda obsahuje souřadnice a v jakém

formátu, jaký typ oddělovače hodnot byl skutečně použit a jakou podobu mají uložené hodnoty. Lze tak předejít fatálním selháním při načítání souboru, kdy některá zařízení při zápisu dat používají desetinou čárku, jiná tečku a někdy jsou tisíce odděleny čárkou nebo mezerou.

12.1.2 Vkládání dat do aplikace

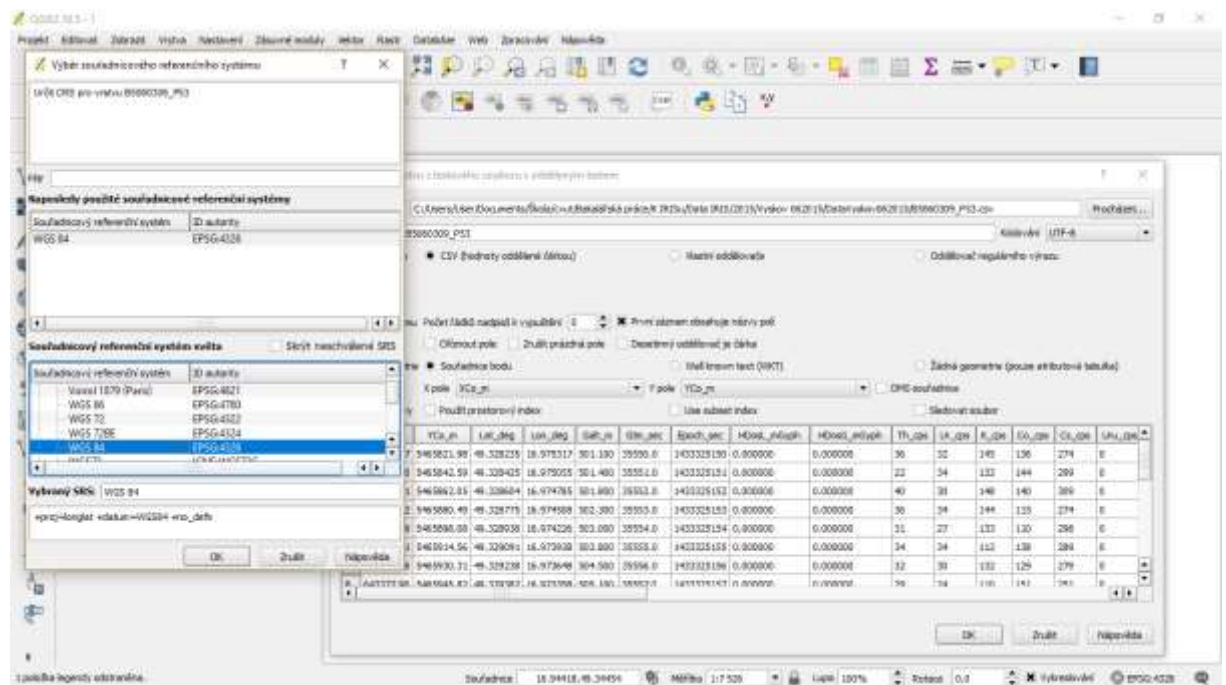
Kliknout na záložku Vrstva, zvolit Přidat vrstvu s odděleným textem viz Obrázek 1.



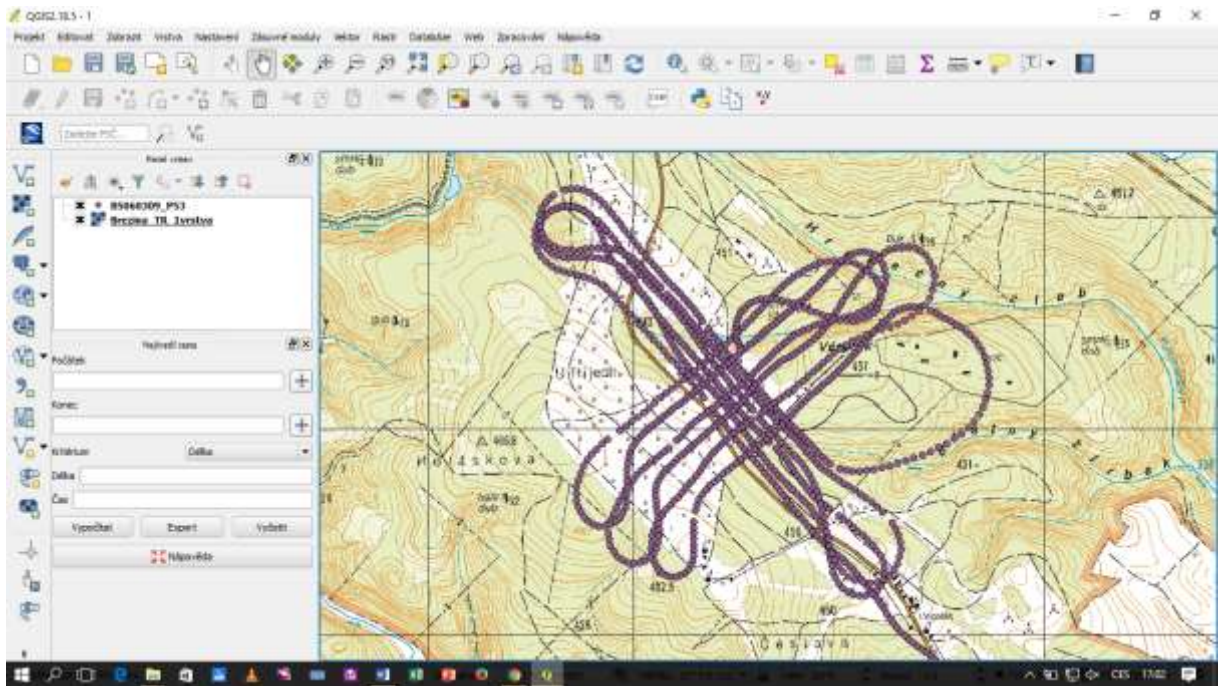
Obrázek 9 Přidání vrstvy – zdroj vlastní

Po kliknutí na tlačítko Procházet zadat cestu k souboru s daty. V případě, že se jedná o korektní soubor, zobrazí se náhled dat v tabulce, viz Obrázek 2. Po potvrzení výběru stisknout OK. V dialogovém okně se objeví výzva k výběru souřadnicového referenčního systému s podbarvenou upřednostněnou nabídkou. Po odsouhlasení stisknout OK. Pro kontrolu

správnosti zvoleného souřadnicového referenčního systému je možné přidat vrstvu s mapou oblasti a jednoduše pohledem zkontrolovat, že se oblast mapy a prováděného monitorování překrývají, viz Obrázek 3.



Obrázek 10 Načtení dat – zdroj vlastní

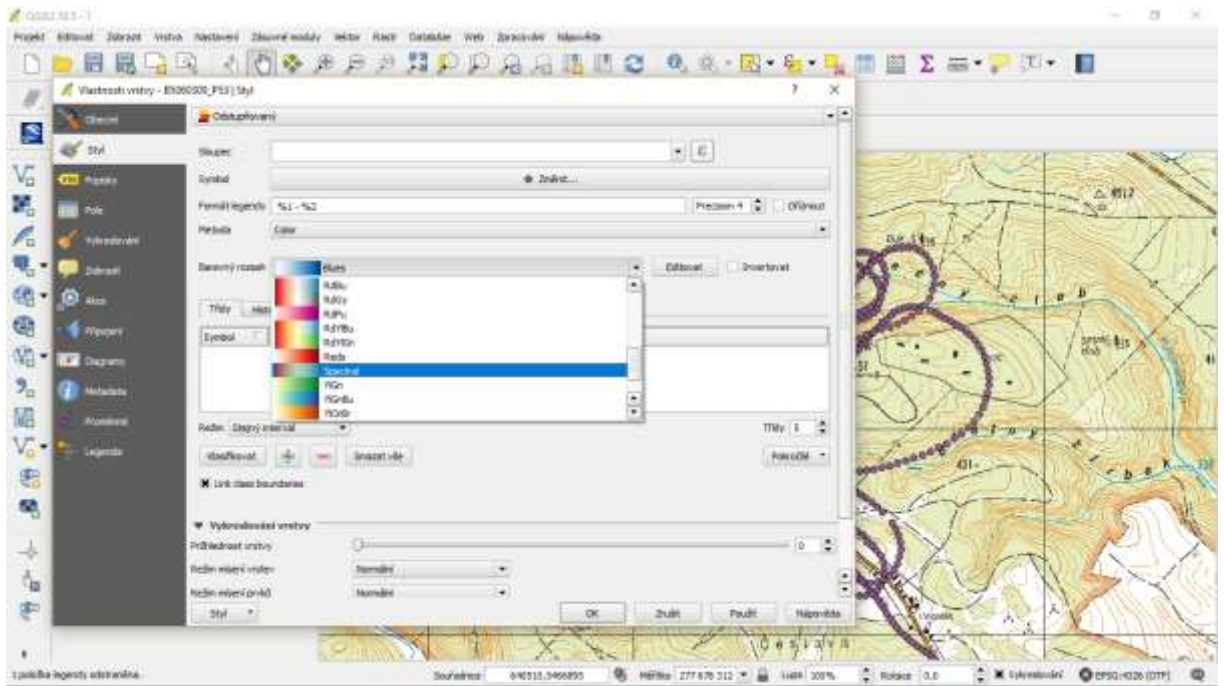


Obrázek 11 Zobrazení dat nad mapou – zdroj vlastní, mapa VGHMÚř

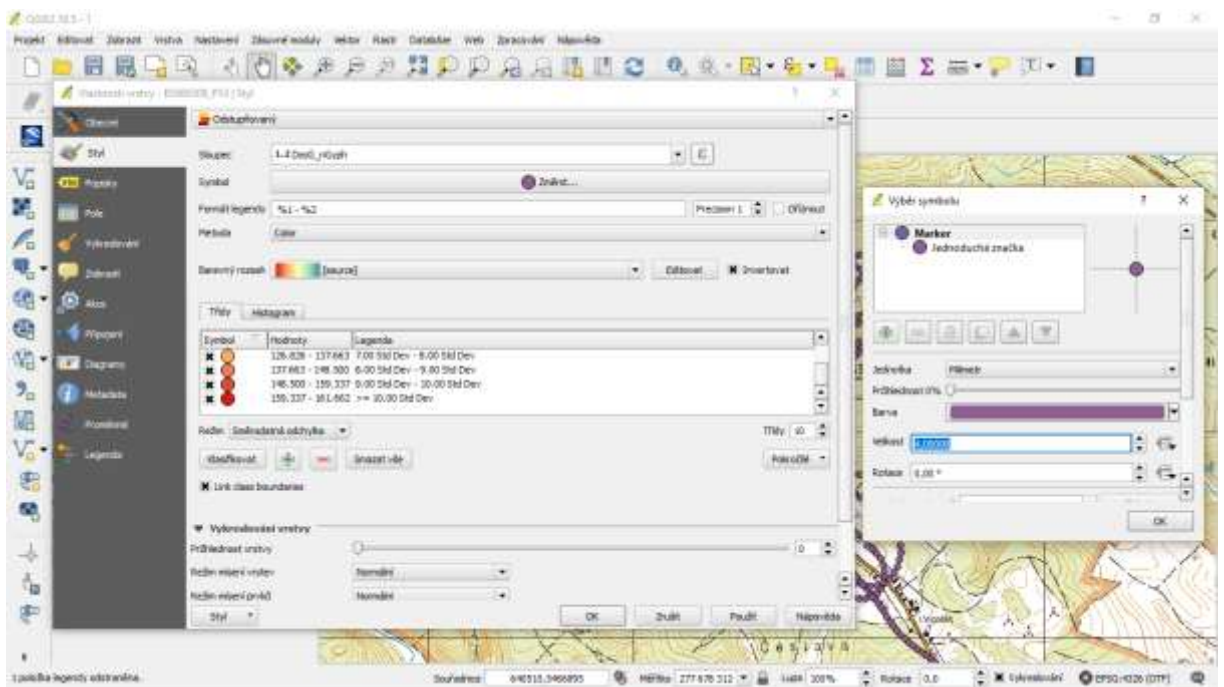
12.1.3 Vizualizace bodových hodnot

Ve vlastnostech vrstvy s daty zvolit v záložce Styl Odstupňovaný, vybrat sloupec s daty pro zobrazení (v tomto případě DosG) a vhodný Barevný rozsah viz

Obrázek 4, například Spectral. Barvy volit tak, aby nesplyvaly s barvou podkladové mapy. Dále kliknout na tlačítko Změnit u popisu Symbol a upravit velikost případně i tvar bodu. Do pole Třídy zadat počet tříd, do kterých budou data rozdělena pomocí klíče zvoleného v poli Režim po stisknutí tlačítka Klasifikovat viz Obrázek 5.



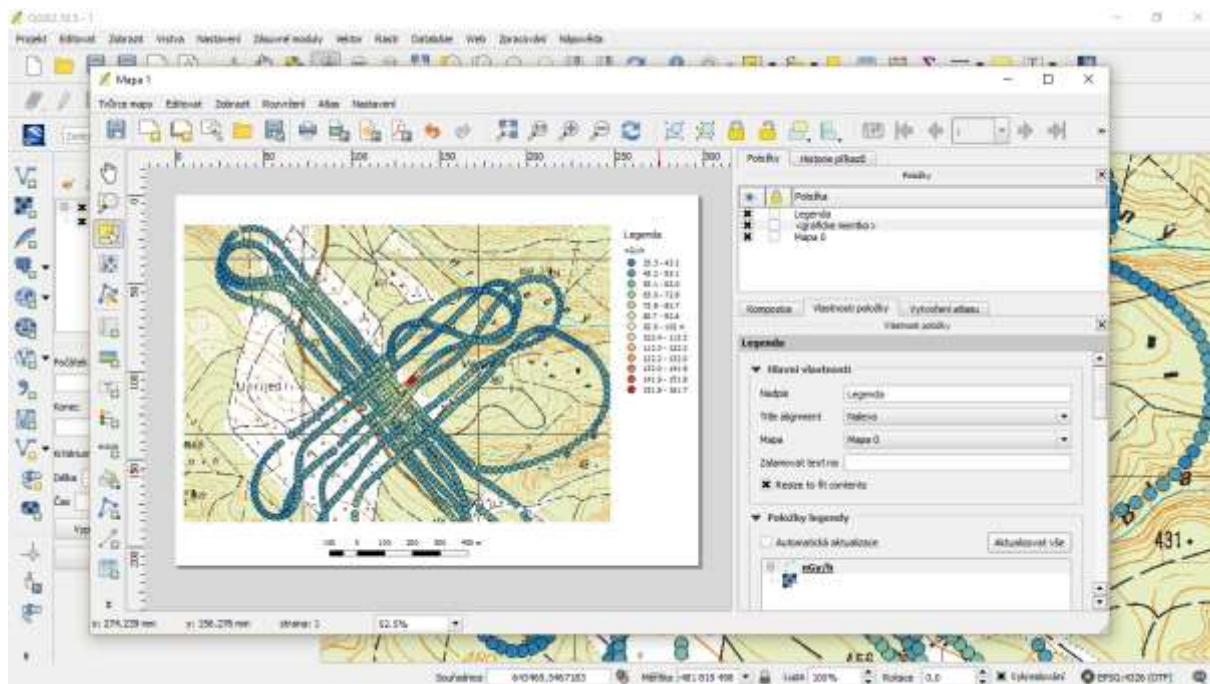
Obrázek 12 Nastavení parametrů vrstvy - zdroj vlastní



Obrázek 13 Nastavení rozsahu dat - zdroj vlastní

Pro tvorbu grafického výstupu bodových hodnot zvolit v záložce Projekt Nový tvůrce mapy (Ctrl+P). V okně Tvůrce mapy lze dále editovat zobrazené vrstvy. Pomocí tlačítek na nástrojové liště je nutné Přidat novou mapu, kdy dojde k extrakci výřezu vrstev zobrazených na obrazovce. Pro zobrazení tohoto výřezu přesunout kurzor do bílého pracovního pole vlevo nahoru a tahem doprava dolů stanovit velikost obrázku.

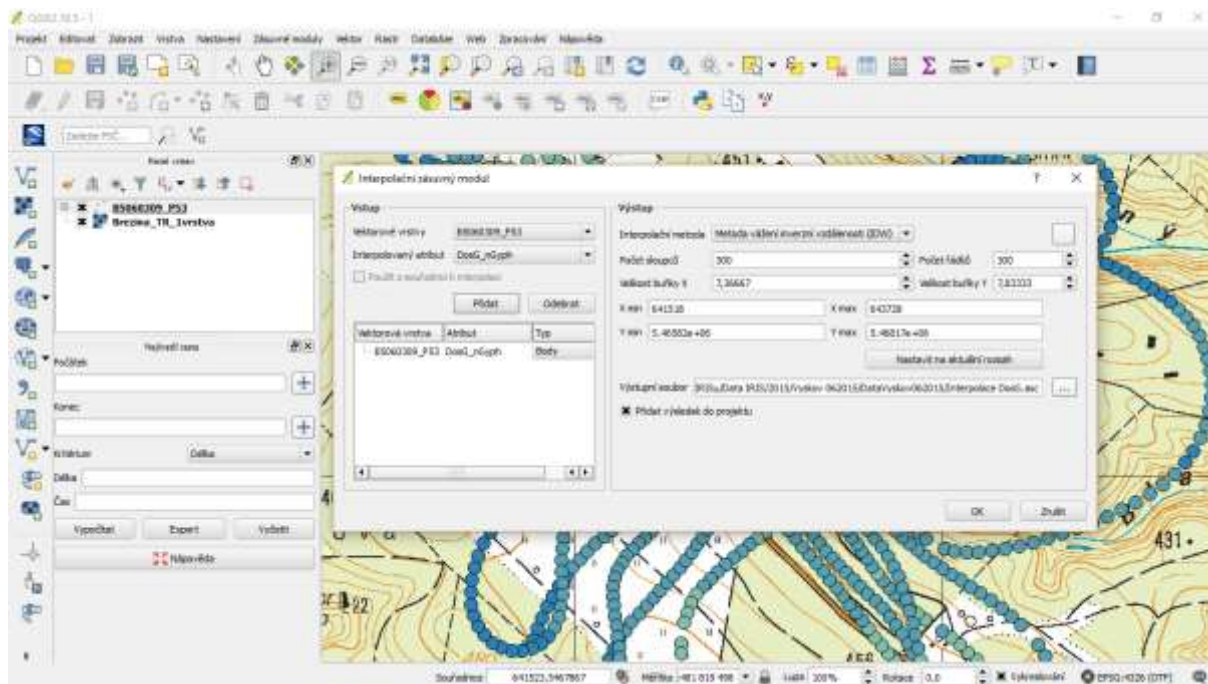
Tuto sestavu je možné dále rozšířit o legendu, měřítko mapy a doplnit o popisky nebo tvary. Po vytvoření požadované struktury mapy lze každou z položek dále editovat v záložce Vlastnosti položek viz Obrázek 6. Mapu lze pak vytisknout, uložit jako obrázek (v několika volitelných formátech), exportovat do formátu PDF, nebo SVG anebo použít celé rozvržení jako vzor a uložit jako šablonu v nabídce Soubor. Takto zpracovaný dokument je podklad pro interpretaci výsledků monitorování a může být předán k dalšímu použití (například jednotkám pro mobilní průzkum, odběrovým týmům nebo orgánům krizového řízení).



Obrázek 14 Tvorba mapy s legendou - zdroj vlastní

12.1.4 Interpolace

Pro lepší orientaci a přehlednost grafického zobrazení bodových hodnot lze provést přes výběr Interpolace v záložce Rastr. V okně Interpolační zásuvný modul vybrat vrstvu s daty a zvolit Interpolovaný atribut `DosG_nGyph` (případně jiný). Tento zásuvný modul nabízí pouze dvě varianty interpolace. První, v příkladu na Obrázku 7 použitá, je IDW (Inverse Distance Weighted), metoda inverzních vzdáleností. Druhá je interpolace založená na nepravidelných trojúhelníkových sítích TIN (Triangulated Irregular Networks).



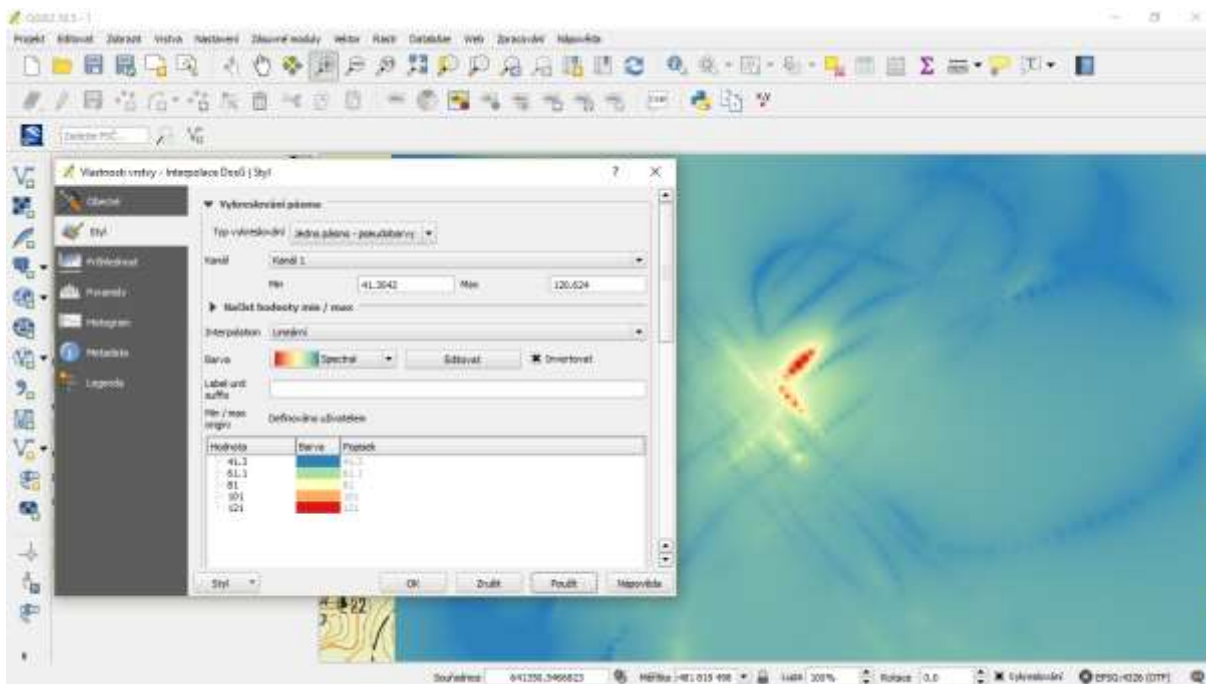
Obrázek 15 Základní nastavení pro interpolaci - zdroj vlastní

Po stisknutí tlačítka Přidat se v okně zobrazí popis vektorové vrstvy a vyplní se některé údaje v podokně Výstup. V tomto podokně je zapotřebí vybrat Interpolční metodu IDW nebo TIN a zadat cestu pro uložení Výstupního souboru. Poté potvrdit OK. Parametry interpolace lze ponechat, tak jak jsou přednastaveny automaticky, pro jejich lze využít nápovědy programu.



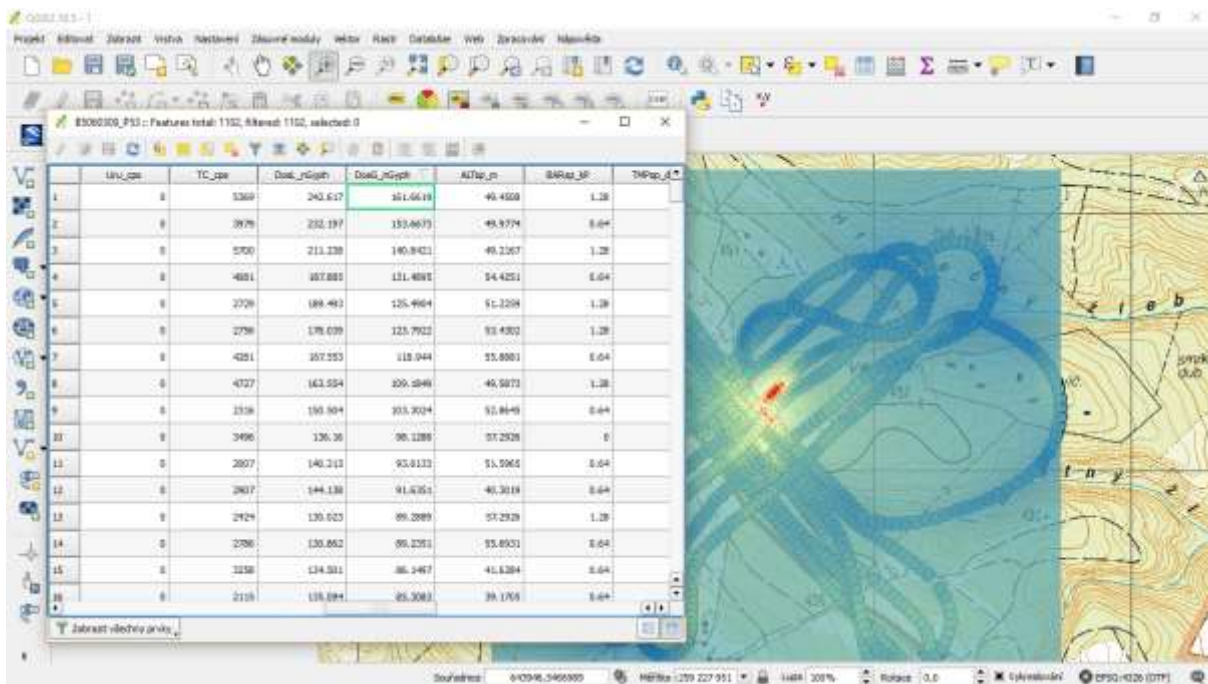
Obrázek 16 Zobrazení vrstvy s interpolací - zdroj vlastní

Po stisknutí tlačítka OK se objeví další vrstva (v přednastaveném odstínu šedi), kterou je nutno ve vlastnostech vrstvy upravit. Dvojklikem na vrstvu Interpolace DosG v podokně Vrstvy se zobrazí její vlastnosti. V okně Vlastnosti vrstvy, záložce Styl a poli Typ vykreslování zvolit Jedno pásmo - pseudobarvy. V záložce Průhlednost je výhodné nastavit podle sytosti podkladové mapy 20 – 50 %.



Obrázek 17 Nastavení vrstvy s interpolací hodnot - zdroj vlastní

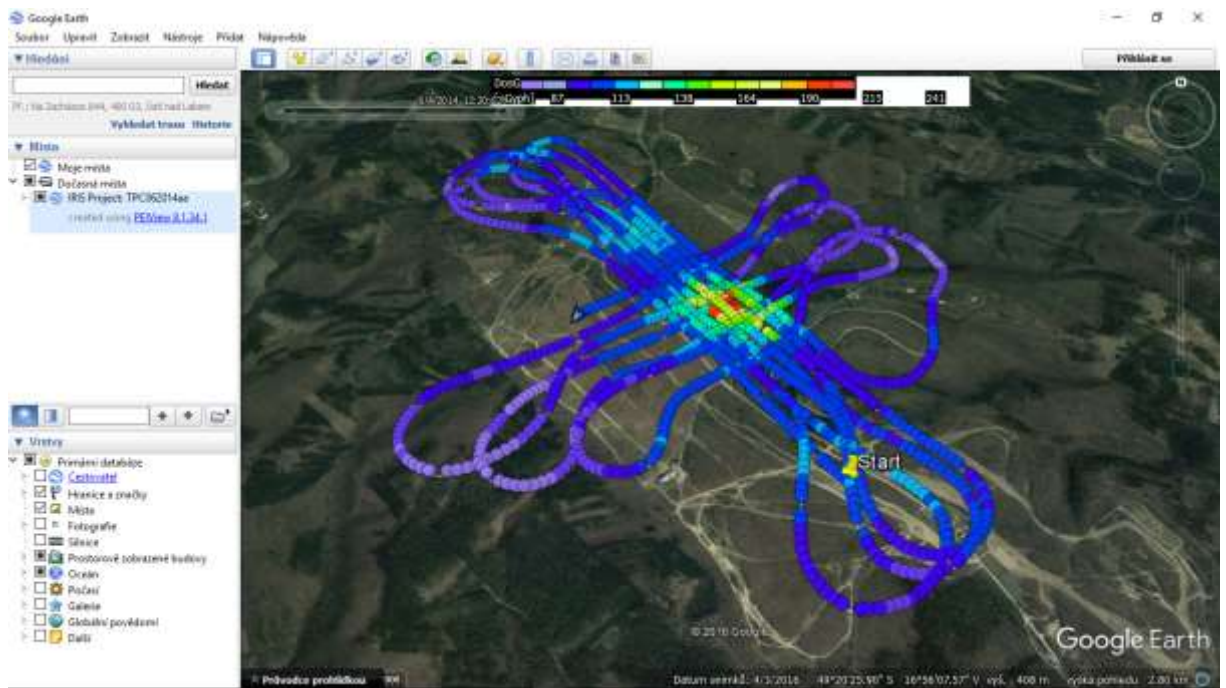
Po potvrzení nabídky tlačítkem Použít nebo OK dojde k zobrazení vrstvy s interpolací hodnot vypočítaného dávkového příkonu viz Obrázek 9. Pro lepší přehlednost lze vypnout v podokně Panel vrstev zobrazení vrstvy s bodovými hodnotami. Na vrstvě s interpolovanými hodnotami lze pak jednoznačně identifikovat oblasti s vyššími hodnotami, které mají červenou barvu. Pro přesné určení souřadnic lze využít Zásuvného modulu Získání souřadnic. U vrstvy s bodovými hodnotami lze zobrazit a dále editovat Atributovou tabulku. Pomocí setřídění hodnot v jednotlivých sloupcích, nebo zadáním dotazu lze snadno identifikovat souřadnice k maximálním nebo zadaným hodnotám jak je vidět na Obrázku 10. V případě, že jsou nabízené interpolační metody nedostačující, je možné využít aplikace SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) nabízející další možnosti.



Obrázek 18 Zobrazení a vyhledávání v atributové tabulce - zdroj vlastní

12.1.5 Další možnosti vizualizace dat

Jednou z dalších variant grafického výstupu je využití aplikačního programového vybavení Google Earth a zobrazení souboru KML (Keyhole Markup Language) viz Obrázek 11.



Obrázek 19 Zobrazení bodových hodnot v aplikaci Google Earth - zdroj vlastní