

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná geologie



Mgr. Ondřej Šálek

Gama záření geologických objektů a jejich lokalizace radiometrickým měřením

Gamma radiation of geological objects and their localization by radiometric measurement

Disertační práce

Školitel: prof. RNDr. Milan Matolín, DrSc.

Praha, 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 22. 2. 2019

Podpis

Abstrakt

Práce se zabývá polem gama záření lokálních anomálií koncentrace uranu a možnostmi jejich lokalizace terénním radiometrickým měřením. Pole gama záření progresivně slábne se vzdáleností od pozemního zdroje radioaktivity. Zvolená metodika radiometrického průzkumu je pro vyhledávání zdrojů radiace významná. Pole gama záření pro různé parametry anomálií koncentrace uranu a různou metodiku radiometrického průzkumu bylo studováno pomocí modelových výpočtů. Metodika výpočtu byla odvozena z elementárních teoretických vztahů pro popis pole gama záření bodového zdroje. Ověření správnosti modelových výpočtů pole gama záření bylo provedeno porovnáním pozemních a mini-leteckých experimentálních dat a vypočtených hodnot na třech reálných anomáliích koncentrace uranu. Mini-letecké měření bylo provedeno pomocí prototypu gama spektrometru Georadis D230A, který se vyznačuje relativně vysokou citlivostí detekce gama záření vzhledem k dříve použitým obdobným přístrojům. Leteckým prostředkem byla hexakoptéra Kingfisher. Posouzení možností tohoto přístroje pro detekci anomálií koncentrace uranu bylo jedním z cílů této práce. Vypočtené hodnoty pole gama záření v poloze detektoru na zemi až ve výšce 40 m nad zemí uspokojivě souhlasí s experimentálními daty pozemního a mini-leteckého měření. Popsanou metodu lze použít pro modelové výpočty pole gama záření nad libovolně zadaným pozemním zdrojem radioaktivity a různé výšky detekce. Možnosti lokalizace radioaktivních anomálií byly zkoumány pro pozemní kruhové objekty s různým průměrem v rozmezí 2 m až 60 m a s různou koncentrací uranu v rozmezí 10 ppm eU až 2000 ppm eU. Výška detekce gama záření byla uvažována v mezích 0 m až 80 m nad zemí. Uvažována byla různá citlivost detektoru a různá doba měření na jednom bodě od 1 s do 360 s.

Výsledky ukázaly, že obecně s rostoucí výškou detekce horizontální vzdálenost detekovatelnosti anomálního objektu nejdříve roste, v určité výšce dosáhne maxima a s pokračujícím nárůstem výšky vzdálenost detekovatelnosti objektu opět klesá. V určité výšce detekce již nelze objekt lokalizovat ani nad jeho středem. Výsledky práce ukazují, že pro lokalizaci anomálních objektů je pozemní měření výhodné provádět s detektorem v co nejvyšší možné výšce nad zemí (kolem 2 m). Mini-letecké měření lze provozovat ve výškách letu od několika metrů až do několika desítek metrů. Optimální výška detekce, pro níž je vzdálenost detekovatelnosti anomálního objektu největší, je uvedena v závislosti na parametrech anomálního zdroje a metodice průzkumu. Možnosti lokalizace modelových

radioaktivních objektů pomocí mini-leteckého průzkumu s přístrojem D230A se ukázaly jako velmi blízké možnostem standardního leteckého průzkumu.

Možnosti lokalizace pole gama záření modelových objektů byly studovány pro energii gama zájmového okna uranu (1,76 MeV) a pro interval energií úhrnné gama aktivity. Výsledky ukázaly, že pro zadané předpoklady je vzdálenost detekovatelnosti anomálního objektu při zpracování dat úhrnné gama aktivity větší než vzdálenost detekovatelnosti při zpracování četnosti impulsů v energetickém okně uranu. Rozdíl je řádově do výše prvních desítek procent. Příčinou je zejména vyšší četnost impulsů a tím přesnost měření úhrnné gama aktivity.

Abstract

This thesis deals with gamma-ray field of size-limited uranium objects and with possibilities of their localization by a field radiometric measurement. The gamma-ray field attenuates progressively with distance from the ground source of radiation. The applied method of radiometric survey plays an important role in localization of a radioactive object. The gamma-ray field of uranium anomalous objects was studied for variable signatures of ground anomalous objects and different methods of gamma-ray survey by using mathematical modelling. The method of modelling was derived from fundamental theoretical laws describing the gamma-ray field of a point source. The verification of applied mathematical modelling was carried out by the comparison of calculated model of the gamma-ray field at three real uranium anomalous objects with experimental data of ground and mini-airborne measurement. Mini-airborne measurement was realized by the prototype of a gamma spectrometer Georadis D230A. This instrument is characterized by relatively high sensitivity compared to previously used similar devices. Airborne platform was a hexacopter Kingfisher. One of the aims of this thesis was to assess the applicability and technical capacity of D230A instrument. Calculated values of the gamma-ray field at different detection heights, in the interval from zero to forty meters above the ground uranium objects, are in the conformity with experimental data of ground and mini-airborne measurement. The developed and described method for modelling of gamma-ray field over planar arbitrarily defined radiation source is applicable for different height of detection. Possibilities to detect an uranium radioactive object was assessed for circular sources of different diameter in the range from 2 m to 60 m with different uranium concentration in the range from 10 ppm eU to 2000 ppm eU. The variable height of detection from measurement on the ground to 80 m above the ground was considered. Different detector sensitivities and variable exposure time from 1 s to 360 s were considered.

The results of mathematical modelling showed that generally the detectability distance of anomalous object initially grows with increasing detection height, at certain detection height reaches the maximum and with continued increase of detection height the detectability distance of the object declines. At certain detection height, it is not possible to detect the object neither above its center. For localization of a radioactive source it is advantageous to carry out the ground measurement with a detector as high as is possible, around 2 m. Mini-airborne measurement using UAV is possible to realize at flight altitudes from several

meters to several tens of meters. The thesis introduces the relation between the detectability distance of a ground gamma-ray uranium object and variable parameters of the ground object, flight height, and the applied survey method. The detection possibilities of a circular radiation source using mini-airborne survey with the spectrometer D230A were evaluated as very close to possibilities of a standard airborne survey.

The possibilities of localization of model radioactive objects were studied for gamma energy of uranium energy window 1.76 MeV and separately for the total count energy interval. The results showed that detectability distance of the anomalous object is greater for the total count measurement than with using the count rate in uranium energy window only. The difference is up to the first tens of percent. The reason is mainly the higher registered count rate and related precision of the total count measurement.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. RNDr. Milanu Matolínovi, DrSc. za odbornou pomoc a vedení v průběhu doktorského studia. Dále bych rád poděkoval všem, kdo jakkoli pomohli s realizací terénního měření a zpracováním dat, jmenovitě RNDr. Zdeňkovi Jáněmu a RNDr., PhDr. Jiřímu Dohnalovi. Za ochotné poskytnutí informací o terénních radiometrických anomáliích děkuji Mgr. Viktoru Goliášovi, Ph.D. a RNDr. Jaroslavu Váchovi. Firmě Georadis s.r.o. děkuji za zapůjčení přístroje D230A. Státnímu ústavu radiační ochrany děkuji za spolupráci při mini-leteckém měření.

Vznik této práce byl podpořen z rozpočtu Mezinárodní agentury pro atomovou energii v rámci projektu Coordination Research Project No. 19036.

Obsah

Abstrakt	iii
Abstract.....	v
1 Úvod.....	1
2 Terénní radiometrický gama průzkum.....	2
2.1 Pozemní gama spektrometrický průzkum s přenosnými přístroji	2
2.2 Letecký gama spektrometrický průzkum.....	4
2.3 Mini-letecký gama spektrometrický průzkum	5
2.4 Pokles intenzity gama záření se vzdáleností od zdroje.....	8
2.5 Přesnost radiometrických měření, kritéria anomálie	12
3 Výzkum na lokalitách s anomální koncentrací uranu	14
3.1 Kalibrační standard uranu s.p. DIAMO, Stráž p. Ralskem.....	14
3.2 Přírodní uranová mineralizace u Dolní Černé Studnice	16
3.3 Přírodní uranová mineralizace u obce Třebsko	20
3.4 Mini-letecký průzkum.....	23
4 Modelování pole gama záření.....	27
4.1 Horizontální hustota bodových zdrojů gama záření	28
4.2 Vertikální hustota bodových zdrojů gama záření	29
4.3 Kalibrace modelu, postup modelování	30
4.4 Ověření modelu pro útlum gama záření ve vzduchu	33
4.5 Diskuze	34
5 Výsledky na lokalitách s anomální koncentrací uranu	36
5.1 Výsledky experimentů a modelových výpočtů na kalibračním standardu uranu, s.p. DIAMO, Stráž pod Ralskem	36
5.2 Výsledky experimentů a modelových výpočtů na přírodní uranové mineralizaci Dolní Černá Studnice	38
5.3 Výsledky experimentů a modelových výpočtů na přírodní uranové mineralizaci Třebsko.....	46
5.3.1 Výsledky pozemního průzkumu	46
5.3.2 Výsledky mini-leteckého průzkumu	49
5.4 Posouzení shody experimentálních a modelových dat	65
5.4.1 Kalibrační standard U	65
5.4.2 Lokalita Dolní Černá Studnice	65
5.4.3 Lokalita Třebsko	66
5.4.4 Diskuze.....	68

6	Výsledky výpočtu pole gama záření modelových objektů	70
7	Posouzení možnosti lokalizace modelových objektů	74
7.1	Postup stanovení vzdálenosti detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením gama záření v uranovém okně	74
7.2	Postup stanovení vzdálenosti detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením úhrnné gama aktivity	76
7.3	Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením gama záření v uranovém okně	77
7.3.1	<i>Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní dynamický průzkum.....</i>	<i>78</i>
7.3.2	<i>Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní statickou analýzu</i>	<i>82</i>
7.3.3	<i>Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů při mini-leteckém průzkumu.....</i>	<i>85</i>
7.4	Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením úhrnné gama aktivity	89
7.4.1	<i>Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní dynamický průzkum.....</i>	<i>90</i>
7.4.2	<i>Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní statickou analýzu</i>	<i>94</i>
7.4.3	<i>Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů při mini-leteckém průzkumu.....</i>	<i>97</i>
7.5	Optimální výška detekce gama záření pro lokalizaci modelových radioaktivních objektů	101
7.6	Vliv času měření na vzdálenost detekovatelnosti modelových radioaktivních objektů	107
7.7	Detekce modelových radioaktivních objektů standardním leteckým průzkumem ..	109
7.8	Diskuze	114
8	Závěr	115
9	Literatura:.....	117
10	Seznam příloh	123
11	Publikace.....	125

1 Úvod

Vyhledávání radioaktivních anomálií je prováděno za účelem prospekce radioaktivních surovin uranu či thoria nebo mapování kontaminace životního prostředí umělými nebo přírodními radionuklidy. Pozemní a letecký terénní gama průzkum patří k základním metodám vyhledávání radiometrických anomálií. Pole gama záření prudce slábne se vzdáleností od pozemního zdroje radioaktivity, proto hraje použitá metodika průzkumu významnou roli v úloze vyhledávání radiometrických anomálií.

Uranové mineralizace v oblastech magmatických a metamorfovaných hornin mají obvykle hydrotermální původ a na zemském povrchu se projevují jako rozlohou malé plochy s vyšší koncentrací uranu. Objemově rozsáhlejší sedimentární ložiska uranu se často projevují pouze na plošně omezených výchozech (Matolín, 1963). Tato práce se zabývá polem gama záření anomálií koncentrace uranu malého rozsahu ve vztahu k možnostem jejich lokalizace pozemním, leteckým a nízkým mini-leteckým měření pomocí nepilotovaných leteckých prostředků. Práce se soustředí na pokles intenzity pole gama záření s horizontální a vertikální vzdáleností od zdroje radioaktivity. Možnosti lokalizace anomálně radioaktivních objektů pomocí terénního měření gama záření jsou posuzovány s ohledem na parametry použitých přístrojů, použité metodiky průzkumu a parametry vyhledávaných radioaktivních objektů. Prostředkem ke studiu možností lokalizace radioaktivních objektů malého rozsahu byly terénní pozemní a mini-letecké experimenty a teoretické výpočty pole gama záření definovaných skutečných i pomyslných zdrojů radioaktivity.

Mini-letecké gama spektrometrické měření bylo provedeno pomocí prototypu gama spektrometru Georadis D230A, který se vyznačuje relativně vysokou citlivostí vzhledem k dříve použitým obdobným přístrojům. Posouzení možností tohoto přístroje pro detekci anomálií koncentrace uranu bylo jedním z cílů této práce.

Výpočty pole gama záření byly prováděny pomocí deterministického matematického modelu. Metodika výpočtu byla odvozena pro účely této práce z elementárních teoretických vztahů pro popis pole gama záření bodového zdroje a je v práci detailně popsána.

2 Terénní radiometrický gama průzkum

2.1 Pozemní gama spektrometrický průzkum s přenosnými přístroji

Terénní gama spektrometrické měření slouží k analýze obsahů draslíku, uranu a thoria v horninách v regionálním nebo detailním měřítku. Dosah gama záření přírodních radionuklidů v horninách 35 cm uvádí IAEA (International Atomic Energy Agency, 2003). Terénní in situ gama spektrometrie se používá již desítky let pro vyhledávání a průzkum ložisek radioaktivních surovin, geologické mapování a pro studium procesů v životním prostředí (IAEA, 2003).

Nejběžnější typ detektoru pro přenosné terénní gama spektrometry pro geologické účely je scintilační detektor s krystalem NaI(Tl), častěji se v poslední době také využívají scintilační krystaly $\text{Bi}_4(\text{GeO}_4)_3$, zkráceně BGO (bismuth-germanium-oxygen). Nejpoužívanější rozměry krystalů jsou 76×76 mm a 51×51 mm (průměr podstavy \times výška válce) (IAEA, 2013).

Citlivost scintilačního detektoru NaI(Tl) velikosti 76×76 mm pro energie přírodních radionuklidů K, U a Th je typicky cca 200 imp/min na 1 % draslíku, 18 imp/min na 1 ppm uranu a 8 imp/min na 1 ppm thoria při geometrii měření na povrchu nekonečného homogenního poloprostoru (IAEA, 2003). Citlivost scintilačního detektoru NaI(Tl) velikosti 51×51 mm je kolem 56 imp/min na 1 % draslíku, 5,4 imp/min na 1 ppm eU, a 2,1 imp/min na 1 ppm eTh. Citlivost scintilačního BGO detektoru 51×51 mm dosahuje, díky jeho větší hustotě a účinnosti pro detekci gama záření, cca 80 % citlivosti většího krystalu 76×76 mm NaI(Tl) (IAEA, 2013).

Odezva terénního gama spektrometru závisí také na velikosti, tvaru a umístění zdroje a na geometrii zdroje a detektoru. Detektor může být umístěn přímo na zemi, nebo může být v nízké výšce nad zemí. Všechna měření na profilu musejí být ale prováděna v konstantní geometrii zdroje a detektoru. Pro tuto geometrii zdroje a detektoru je také radiometrický přístroj kalibrován. Přenosné geofyzikální radiometry jsou obvykle kalibrovány pro geometrii 2π sr (steradiánu) s přístrojem umístěným na povrchu země. Pro detektor umístěný na povrchu země má analyzovaný vzorek horniny mocnost přibližně 35 cm, průměr 1 m a jeho hmotnost přesahuje 100 kg (IAEA, 2003). Při umístění detektoru nad zemí výrazně vzrůstá průměr analyzovaného vzorku horniny na několik metrů až několik desítek metrů v závislosti na energii detekovaného gama záření. Měření v nízké výšce nad zemí také minimalizuje efekty lokálních nerovností reliéfu a nerovnoměrné koncentrace radionuklidů (IAEA, 2003).

Posoudit kvantitativně rozdíly v možnosti detekovatelnosti lokálních anomálií koncentrace uranu mezi geometrií měření na zemi a v nízké výšce nad zemí je jedním z cílů této práce. Zkoumané výškové úrovně umístění detektoru při pozemním měření byly zvoleny 0,1 m (na zemi), 0,5 m, 1 m a 2 m.

Jako příklad aplikace s geometrií detektoru ve výšce cca 2 m lze uvést přístroj PGIS-2 výrobce Picoenvirotec, který dokumentuje Obr. 1. Přístroj je umístěn na zádech operátora v batohu (Nuvia Dynamics, 2018). Příkladem geometrie detektoru ve výšce cca 1 m nad zemí je pěší průzkum s přístrojem GT-32 zobrazeným na Obr. 2. Kompaktní přístroj je nesen operátorem ve výšce pasu (Georadis, 2018). Příkladem geometrie měření ve výšce 0,5 m nad zemí může být pěší průzkum s přístrojem GS-256 neseným v ruce (Obr. 2). Citlivá část sondy, scintilační krystal, je umístěn ve spodní části sondy. Na Obr. 2 je přístroj GR-320 zobrazen v geometrii měření na zemi.

Kalibrace přenosných gama spektrometrů se provádí experimentálním měřením na kalibračních standardech K, U a Th se známými koncentracemi radionuklidů. V ČR je k dispozici kalibrační základna ve správě s. p. DIAMO ve Stráži pod Ralskem (Matolín et al., 2011). Ke kalibraci přenosných gama spektrometrů je také možné použít transportovatelné standardy s rozměry 1×1×0,3 m (Grasty et al., 1991). Pozadí se určuje na vodní hladině nádrže s dostatečnou plochou a hloubkou.



Obr. 1. Gamaspektrometr PGIS-2/Backpack v geometrii měření 2 m nad zemí (Nuvia Dynamics, 2018).



Obr. 2. Gamaspektrometr GR-320 v geometrii měření na zemi (vlevo), přístroj GS-256 v geometrii měření v 0,5 m (uprostřed) a přístroj GT-32 (Georadis, 2018) v geometrii měření v 1 m nad zemí (vpravo).

2.2 Letecký gama spektrometrický průzkum

Letecká gama spektrometrie s použitím letadel a vrtulníků je používána po desetiletí k přímé a nepřímé detekci rud (IAEA, 2010; Grasty, 1979; Gnojek, Přichystal, 1985), ke geologickému mapování (Schetselaar et al., 2000; Schetselaar, 2002) a geochemickému mapování (Shives et al., 1997). Pomocí leteckého průzkumu byla zkoumána mírně zvýšená radioaktivita nad některými ložisky uhlovodíků (Saunders et al., 1993, 1994; Telford et al., 1990). Další aplikace letecké gama spektrometrie jsou v oblasti hodnocení životního prostředí (Sanderson et al., 1995; Sanderson, Ferguson, 1997), mapování radioaktivního spadu (Mellander, 1989; Minty, Brodie, 1994), mapování půdních procesů (Cook et al., 1996; Wilford, Minty, 2007), hydrogeologii (Grasty, 1982) nebo vyhledávání ztracených zdrojů radioaktivity (Bristow, 1978; Deal et al., 1972). Radiometrická data leteckého průzkumu se také využívají při hodnocení radonového rizika území (Akerblom, 1995; Appleton et al., 2008; Barnet, 1995). Výsledky leteckého radiometrického průzkumu se obvykle zobrazují ve formě radiometrických map (Manová, Matolín, 1995; Minty at al., 2009).

Moderní letecké gamaspektrometry jsou typicky složeny z více krystalů NaI(Tl) o rozměrech $102 \times 102 \times 406$ mm s celkovým objemem minimálně 32 litru NaI(Tl) (IAEA, 2003). Rychlost letu pro měření s letadly je obvykle 40 – 60 m/s. Pro měření s vrtulníky může být rychlost nižší 25 – 30 m/s (IAEA, 2003). Letecký průzkum se obvykle provádí v konstantní výšce nad terénem mezi 30 m a 120 m. Výška letu se volí podle charakteru terénu, vegetace a vzdálenosti profilů (IAEA, 1991). V České Republice se letecký gama

spektrometrický průzkum prováděl obvykle ve výšce 80 m nad terénem (Matolín, 1997). V nízkých výškách 30 – 40 m lze provádět letecký průzkum v rovinných nezalesněných terénech, např. ve Finsku (Turunen et al., 2005). Nižší výška letu způsobuje lepší signál (vyšší četnost impulzů) a také lepší poměr signálu k šumu. Na druhou stranu se s nižší výškou letu zužuje šířkový dosah měření (IAEA, 1991).

Šířkový dosah leteckého měření odvozený z průměru kruhové plochy, která pro danou výšku produkuje 90 % detekovaného záření uvádí Kogan et al. (1971). Šířkový dosah závisí na energii gama kvant zdroje. Pro energii 1,76 MeV a výšku letu 80 m nad zemí je pás, ze kterého pochází 90 % signálu široký přibližně 400 m, pro výšku letu 40 m je měřený pás široký přibližně 240 m. Billings a Hovgaard (1999) uvádí pro výšku letu 60 m a energii gama záření draslíku 1,46 MeV šířkový dosah přibližně 300 m. Vzdálenost letových profilů se volí obvykle 50 m až 400 m, u regionálních geochemických mapování může být i více než 1 km (IAEA, 2003). Při plánování parametrů leteckého gama průzkumu je nezbytné hledat optimální kompromis mezi výškou letu, rychlostí letu, vzdáleností profilů, citlivostí detektoru a rizikem minutí hledaného zdroje s ohledem na jeho předpokládanou gama aktivitu a rozměry (IAEA, 1991).

Kalibrace leteckých gama spektrometrů se provádí pomocí experimentálních měření na kalibračních standardech se známými obsahy přírodních radionuklidů a pomocí leteckého měření na kalibračním profilu se známými obsahy přírodních radionuklidů. Pomocí letů nad kalibračním profilem se určuje citlivost leteckého gama spektrometru pro přírodní radionuklidy K, U a Th v pracovní výšce letu. Pozadí se určuje pomocí letů nad rozsáhlou vodní hladinou. Kalibrační procedura je standardizovaný proces a byla detailně popsána např. v publikaci Minty et al. (1997). Citlivosti standardního leteckého gama spektrometru (32 l) ve výšce 80 m uvádí Grasty a Minty (1995) jako 99 imp/s na 1 % K, 8 imp/s na 1 ppm eU a 6 imp/s na 1 ppm eTh. Citlivosti leteckého gama spektrometru s objemem detektoru 16,8 l ve výšce 120 m jsou uvedeny v publikaci IAEA (1991) jako 30 imp/s na 1 % K, 2,9 imp/s na 1 ppm eU a 2 imp/s na 1 ppm eTh.

2.3 Mini-letecký gama spektrometrický průzkum

Jako mini-letecký gama spektrometrický průzkum je v této práci označen průzkum s použitím lehkých nepilotovaných letounů, v literatuře obvykle označovaných zkratkou UAV z anglického Unmanned Aerial Vehicle. V následujících odstavcích je uveden přehled významných prací zabývajících se mini-leteckým gama průzkumem.

MacFarlane et al. (2014) popsal UAV multikoptéru s detektorem GR1 Kromek určenou k rychlému vyhodnocení přítomnosti radionuklidů s vysokým prostorovým rozlišením. Měření bylo prováděno v nízkých výškách do 3 m, pro které autoři uvádějí vysokou citlivost přístroje. Přístroj byl testován pomocí zdroje radioaktivity tvořeného ze vzorků uranové rudy uspořádaných na ploše 20 cm². Detektor GR1 Kromek je tvořen polovodičovým detektorem z teluridu kadmato-zinečnatého (CdZnTe) s objemem pouze 1 cm³.

Martin et al. (2015a, 2015b, 2016) používal UAV multikoptéru vyvinutou MacFarlanem et al. (2014) k mapování odvalů po těžbě uranu, ke stanovení účinnosti sanace po jaderné havárii ve Fukušimě a k radiometrickému průzkumu v prostoru továrny na přepracování jaderného paliva Sellafield (Velká Británie). Všechna měření byla prováděna ve výškách do 15 m.

Falciglia et al. (2017) se zabýval možností použití malého CdTe polovodičového detektoru s plochou 25 mm² a tloušťkou 1 mm k hodnocení půd kontaminovaných ²⁴¹Am a ¹⁵²Eu. Autoři udávají nízkou citlivost použitého detektoru projevující se nutnou dlouhou dobou měření přes 10 min a potřebnou krátkou vzdáleností zdroje a detektoru do 1 m.

Sanada a Torii (2014) využili dálkově řízenou helikoptéru s hmotností 94 kg k leteckému radiometrickému mapování v blízkosti havarované jaderné elektrárny Fukušima v Japonsku. Helikoptéra byla vybavena scintilačním gama spektrometrem sestávajícím se ze třech krystalů LaBr₃:Ce, každý s objemem 43,4 cm³. Hmotnost přístroje byla 6,5 kg. Přístroj byl kalibrován pro měření dávkového příkonu na úrovni 1 m nad zemí. Pracovní výška letu byla 80 m.

V publikaci Šálek et al., 2018 bylo popsáno experimentální měření s přístrojem D230A Georadis, gama spektrometrem navrženým pro použití s lehkými nepilotovanými letouny. Hmotnost přístroje D230A je cca 4 kg. Přístroj D230A má dva BGO scintilační krystaly s rozměry 51 mm × 51 mm. Gama spektrometr D230A má odhadem třístokrát větší citlivost než detektor Kromek GR1, který byl použit ve dřívějších výzkumech (MacFarlane et al., 2014; Martin et al., 2015a, 2015b, 2016). Jako mini-letecký nosič byla použita hexakoptéra Robodrone Kingfisher. Přístroj byl testován na lokalitě Třebsko, okr. Příbram, s objektem uranové mineralizace. Letecké měření bylo prováděno ve výškách od 5 m do 40 m. Níže v této práci je uveden detailní popis experimentu a jeho výsledků.

Zaměříme-li se na hodnocení přírodních radionuklidů, lze konstatovat, že přístroj popsany autory Sanada a Torii (2014) využívající jako scintilační materiál bromid lanthanitý není vhodný pro měření přírodní radioaktivity z důvodu přítomné kontaminace scintilátoru

nestabilním izotopem ^{138}La . Přístroj byl použit pro detekci ^{137}Cs . Přístroje použité autory MacFarlane et al. (2014), Martin et al. (2015a, 2015b, 2016) a Falciglia et al. (2017) mají sice velmi dobré energiové rozlišení, ale nejsou vhodné pro měření přírodní radioaktivity a vyhledávání přírodních gama anomálií kvůli malému objemu detektoru a nedostatečné citlivosti pro nepříliš intenzivní přírodní anomálie radioaktivity. Přístroj popsáný v publikaci Šálek et al., 2018 (Georadis D230A) je díky relativně velkému detekčnímu objemu scintilačního detektoru BGO vhodný pro detekci přírodních radionuklidů. Nižší energiové rozlišení BGO scintilátoru není limitující pro stanovení koncentrací přírodních radionuklidů a úhrnné gama aktivity.

Z uvedeného přehledu publikovaných prací je patrné, že nepilotované letecké prostředky již byly v minulosti vícekrát použity pro letecké měření radioaktivity v otázkách životního prostředí, kontaminace umělými radionuklidy, radiační ochrany a monitorování radioaktivního spadu při jaderných haváriích. Použití bezpilotních prostředků pro letecké radiometrické měření je nicméně stále ve fázi vývoje a v současnosti neexistuje ustálená podoba přístrojového vybavení, metodiky měření a zpracování dat, tak jako je tomu u klasické letecké gama spektrometrie a pozemního průzkumu.

Letecké radiometrické měření s využitím nepilotovaných prostředků se oproti klasické letecké radiometrii liší zejména v těchto bodech:

- Krátká doba letu a tedy velmi omezený dolet.
- Malá nosnost letounu a tedy mnohem menší a méně citlivý detektor.
- Rychlost letu. Nepilotované letecké prostředky mohou letět nízkou rychlostí a tím dosáhnout vyššího zisku signálu a kompenzovat tak malou citlivost detektoru.
- Výška letu. Nepilotované letecké prostředky mohou létat, díky nízké rychlosti, vysoké pohyblivosti a nižším rizikům, v malých výškách oproti pilotovaným letadlům a vrtulníkům. Malá výška letu také přispívá k vyššímu zisku signálu a pomáhá tak kompenzovat nízkou citlivost malého detektoru.

V budoucnosti lze očekávat další rozvoj nepilotovaných leteckých prostředků. Možnosti jejich použití pro radiometrický letecký průzkum se budou rozšiřovat s rostoucí nosností a dobou letu.

2.4 Pokles intenzity gama záření se vzdáleností od zdroje

Pole gama záření reálných zdrojů klesá se vzdáleností od zdroje v důsledku dvou faktorů. První faktor je pokles hustoty toku gama kvant se vzdáleností od zdroje konečné velikosti. Nejrychleji, s kvadrátem vzdálenosti, klesá intenzita gama záření bodového zdroje, vztah (1) (Mareš et al., 1990).

Druhý faktor je pokles gama záření v důsledku absorpce ve hmotě. Útlum gama záření ve hmotě je způsoben jadernými interakcemi: Comptonovým rozptylem, fotoefektem a tvorbou párů elektron-positron (Minty, 1997). V důsledku jaderných interakcí s hmotou intenzita gama záření se vzdáleností od zdroje klesá. Absorpci gama záření o dané energii ve hmotě s definovaným prvkovým složením lze popsat pomocí lineárního součinitele zeslabení μ (m^{-1}) (Mareš et al., 1990).

Intenzitu bodového zdroje gama záření procházejícím prostředím 1 a prostředím 2 ve vzdálenosti r od zdroje gama záření uvádí vztah (1) (Mareš et al., 1990).

$$I = \frac{km}{(r_1 + r_2)^2} \exp(-\mu_1 r_1 - \mu_2 r_2) \quad (1)$$

r_1, r_2 dráha v prostředí 1 a 2, $r = r_1 + r_2$

I intenzita gama záření

k konstanta popisující intenzitu gama záření daného radionuklidu o jednotkovém množství v jednotkové vzdálenosti od detektoru ve vakuu

m hmotnost daného radionuklidu

μ_1, μ_2 lineární součinitele zeslabení gama záření v prostředí 1 (hornina, μ_1) a v prostředí 2 (vzduch, μ_2)

Intenzitu gama záření nad povrchem nekonečného homogenního poloprostoru (horninové prostředí) v absorbujícím prostředí (vzduch) ve výšce h nad povrchem homogenního poloprostoru uvádí vztah (2) (Mareš et al., 1990).

$$I = \frac{2\pi k Q \rho}{\mu_1} E_2(\mu_2 h) \quad (2)$$

Q hmotnostní koncentrace radioaktivního prvku ve zdroji

ρ hustota zdroje

E_2 integrálně exponenciální funkce druhého řádu

Funkce E_2 je definována (King, 1912):

$$E_2(x) = e^{-x} - x \int_x^{\infty} e^{-t} \frac{1}{t} dt \quad (3)$$

Pro výpočet hodnoty funkce E_2 v různých výškách detekce je třeba určit hodnotu lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu μ_2 . Hodnotu μ_2 je možné určit teoreticky nebo experimentálně.

Databáze XCOM (Berger et al., 2010) umožňuje stanovení hmotnostního součinitele zeslabení gama záření pro libovolné energie gama záření a chemické složení prostředí. Hmotnostní součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu pro energii 1,764 MeV emitovanou radionuklidem ^{214}Bi (produkt přeměny v přeměnové řadě ^{238}U) byl určen pomocí databáze XCOM jako $4,757 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$.

Grasty (1979) uvádí obdobnou hodnotu hmotnostního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu pro energii 1,764 MeV $4,79 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$.

Prutkina a Šaškin (1975) uvádí hodnotu lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu pro energii 1,764 MeV $0,0062 \text{ m}^{-1}$.

Kogan et al. (1971) uvádí hodnotu lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu pro energii 1,764 MeV $0,00618 \text{ m}^{-1}$.

Hustota vzduchu při atmosférickém tlaku 100 kPa, teplotě 20° C odpovídá $0,0012 \text{ g/cm}^3$ (IAEA, 1979). Lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu pro energii 1,764 MeV byl stanoven pro účely této práce v souladu s databází XCOM pro hustotu vzduchu $0,0012 \text{ g/cm}^3$ jako $0,0056 \text{ m}^{-1}$. Ostatní jmenovaní autoři uvádějí hodnoty velmi blízké. Hodnota lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu závisí na jeho hustotě, která je funkcí teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu, a může se měnit až o 30 % (Minty, 1988).

Hmotnostní součinitel zeslabení gama záření v hornině pro energii 1,764 MeV byl stanoven pomocí databáze XCOM pro zjednodušené parametry prostředí. Chemické složení hornin: SiO_2 72 %, Al_2O_3 15 %, K_2O 4%, Na_2O 4 %, FeO 2%, MgO 3 %. Hustota hornin

$1,8 \text{ g/cm}^3$. Hmotnostní součinitel zeslabení gama záření v hornině je $4,739 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$. Lineární součinitel zeslabení gama záření v hornině je pro zvolené parametry $8,53 \text{ m}^{-1}$.

Lineární součinitel zeslabení ve vzduchu v energetickém okně úhrnné gama aktivity z experimentálních mini-leteckých měření na lokalitě Třebsko byl odvozen proložením experimentálních dat pro různé výšky měření (průměrná hodnota četnosti impulzů z intervalu metráže 0 až 30 m na profilu v dané výšce měření) teoretickou funkcí poklesu podle funkce E_2 pomocí metody nejmenších čtverců odchylek. Pokles detekované četnosti impulzů ve výškách 5 až 40 m na profilu 1 odpovídá lineárnímu součiniteli zeslabení gama záření ve vzduchu $0,0022 \text{ m}^{-1}$, na profilu 2 a 3 odpovídá hodnota $0,0028 \text{ m}^{-1}$.

Matolín (1963) uvádí hodnotu lineárního součinitele zeslabení ve vzduchu pro úhrnnou gama aktivitu $0,0035 \text{ m}^{-1}$.

IAEA (1991) uvádí na str. 36 experimentální křivku poklesu úhrnné gama aktivity s výškou. Proložením této křivky funkcí E_2 metodou nejmenších čtverců odchylek, byla stanovena odpovídající hodnota lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu $0,0042 \text{ m}^{-1}$.

Lineární součinitel zeslabení gama záření μ_2 ve vzduchu pro úhrnnou gama aktivitu byl stanoven pro účely výpočtu pole gama záření na lokalitě Třebsko v souladu s experimentálními daty jako $0,0026 \text{ m}^{-1}$ a pro účely výpočtů pole gama záření modelových objektů byl μ_2 stanoven jako průměrná hodnota z uvedených údajů $0,0035 \text{ m}^{-1}$.

Číselné hodnoty funkce $E_2(\mu_2 h)$ pro různé výšky detekce nad zemí byly vypočítány s využitím funkce *expint* v programu MATLAB. Hodnoty funkce E_2 pro zvolené parametry uvádí Tabulka 1. Z tabulky je patrné, že ve výšce 40 m je intenzita gama záření s energií 1764 keV zhruba poloviční oproti intenzitě gama záření na zemi a ve výšce 80 m, kde se obvykle provádí letecký průzkum je intenzita zhruba třetinová.

Pro hodnotu lineárního součinitele zeslabení $\mu_2=0,0035 \text{ m}^{-1}$, který odpovídá oknu úhrnné gama aktivity je pokles intenzity gama záření s výškou pozvolnější. Ve výšce 40 m je intenzita gama záření 65 % hodnoty na zemi a ve výšce 80 m je intenzita gama záření poloviční.

Tabulka 1. Hodnoty funkce E_2 pro výšky detekce gama záření do 100 m nad zemí pro lineární součinitel zeslabení záření gama $\mu_2=0,0056 \text{ m}^{-1}$, který odpovídá energii gama záření 1,764 MeV (zájmové energetické okno uranu) a pro lineární součinitel zeslabení záření gama $\mu_2=0,0035 \text{ m}^{-1}$, který odpovídá oknu úhrnné gama aktivity.

$h \text{ [m]}$	$\mu_2=0,0056 \text{ m}^{-1}$		$\mu_2=0,0035 \text{ m}^{-1}$	
	$X=\mu h$	$E_2(X)$	$X=\mu h$	$E_2(X)$
0.1	0.0006	0.996	0.0004	0.997
0.2	0.0011	0.992	0.0007	0.995
0.3	0.0017	0.989	0.0011	0.992
0.4	0.0022	0.985	0.0014	0.990
0.5	0.0028	0.982	0.0018	0.988
0.6	0.0034	0.979	0.0021	0.986
0.7	0.0039	0.977	0.0025	0.984
0.8	0.0045	0.974	0.0028	0.982
0.9	0.0050	0.971	0.0032	0.981
1	0.0056	0.969	0.0035	0.979
2	0.0112	0.945	0.0070	0.962
3	0.0168	0.924	0.0105	0.948
4	0.0224	0.905	0.0140	0.934
5	0.0280	0.888	0.0175	0.922
6	0.0336	0.871	0.0210	0.910
7	0.0392	0.856	0.0245	0.898
8	0.0448	0.841	0.0280	0.888
9	0.0505	0.827	0.0315	0.877
10	0.0561	0.813	0.0350	0.867
20	0.1121	0.701	0.0700	0.782
30	0.1682	0.615	0.1050	0.714
40	0.2242	0.546	0.1400	0.656
50	0.2803	0.487	0.1750	0.606
60	0.3364	0.438	0.2100	0.562
70	0.3924	0.395	0.2450	0.523
80	0.4485	0.357	0.2800	0.488
90	0.5046	0.324	0.3150	0.456
100	0.5606	0.295	0.3500	0.427

Hodnota lineárního součinitele zeslabení se odvíjí od použitého detektoru, nastavení šířky oken zájmových energií a diskriminační hladiny energie gama záření pro okno úhrnné gama aktivity. Ve spektru úhrnné gama aktivity se projevuje mnoho energií od mnoha radioizotopů přírodních přeměnových řad uranu a thoria a od draslíku, které interagují s hmotou, rozptylují se a produkují gama záření s nižší energií. Hodnotu lineárního součinitele zeslabení úhrnné gama aktivity ve vzduchu ovlivňuje tedy také poměr K, U a Th v horninách a závislost účinnosti detektoru na energii gama záření. Správnou hodnotu lineárního součinitele zeslabení

je nutno stanovit z experimentálního měření v různých výškách letu pro danou aparaturu a její nastavení.

Při reálném leteckém průzkumu se uplatní absorpce záření gama biomasou. Minty (1988) uvádí, že v některých případech může mít hustá vegetace ekvivalentní stínící efekt jako 50 m vzduchu. Stínící efekt biomasy se může měnit s ročním obdobím nebo v dlouhodobém horizontu (Rubin et al., 1980).

2.5 Přesnost radiometrických měření, kritéria anomálie

Přeměna nestabilních jader atomů má pravděpodobnostní charakter. Statistické změny intenzity pole gama záření, fluktuace radioaktivity, lze popsat pomocí Poissonova rozdělení (Mareš et al., 1990). Pro Poissonovo rozdělení platí, že rozptyl σ^2 hodnot je roven jejich střední hodnotě \bar{N} . Pokud je N impulzů zaznamenáno v čase t , potom směrodatná odchylka σ (také označovaná jako standardní odchylka z anglického standard deviation) počtu impulzů je:

$$\sigma_{(N)} = \sqrt{N} \quad (4)$$

Střední kvadratická chyba četnosti impulzů $n = N/t$ (imp/s) je rovna:

$$\sigma_{(n)} = \frac{\sqrt{N}}{t} = \sqrt{\frac{n}{t}} \quad (5)$$

Pro relativní chybu měření δ :

$$\delta(N) = \delta(n) = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{nt}} \quad (6)$$

Rovnice (5) a (6) ukazují, že přesnost radiometrických měření roste s počtem registrovaných impulzů, s časem měření a s citlivostí přístroje (Mareš et al., 1990).

Doporučované časy měření s ohledem na přesnost měření a ekonomiku průzkumu pro NaI(Tl) detektor 76×76 mm jsou 2 min pro výše radioaktivní horniny a 6 min pro nízko aktivní horniny (IAEA, 2003).

Fluktuace radioaktivity se pohybují s pravděpodobností 95,5 % v intervalu $\pm 2\sigma$ od střední hodnoty a s pravděpodobností 99,7 % v intervalu $\pm 3\sigma$ od střední hodnoty (Løvborg, Mose, 1987).

Při radiometrickém terénním měření na profilech je rozptyl dat způsoben kromě fluktuací radioaktivity také nehomogenitami koncentrace radionuklidů, nehomogenním charakterem hornin (hustota, vlhkost) a nerovnostmi reliéfu. Za předpokladu normálního rozdělení terénních dat radioaktivity lze pro odlišení anomálních hodnot A použít kritérium

$$A > \bar{N} + 2s \text{ nebo}$$

$$A > \bar{N} + 3s, \text{ kde}$$

\bar{N} je aritmetický průměr dat radioaktivity

s je výběrová směrodatná odchylka dat radioaktivity

Kritérium $\bar{N} + 2s$ odděluje 2,3 % nejvyšších hodnot, kritérium $\bar{N} + 3s$ odděluje 0,1 % nejvyšších hodnot (Afzal et al., 2012, Davis, 2002).

3 Výzkum na lokalitách s anomální koncentrací uranu

Terénní experimenty byly prováděny na třech lokalitách s anomální koncentrací uranu. V prvním kroku bylo pro každou lokalitu definováno plošné rozložení koncentrace uranu v zájmové ploše. V druhém kroku bylo studováno pole gama záření v dané výšce nad zemí. Terénní experimenty byly prováděny na těchto objektech:

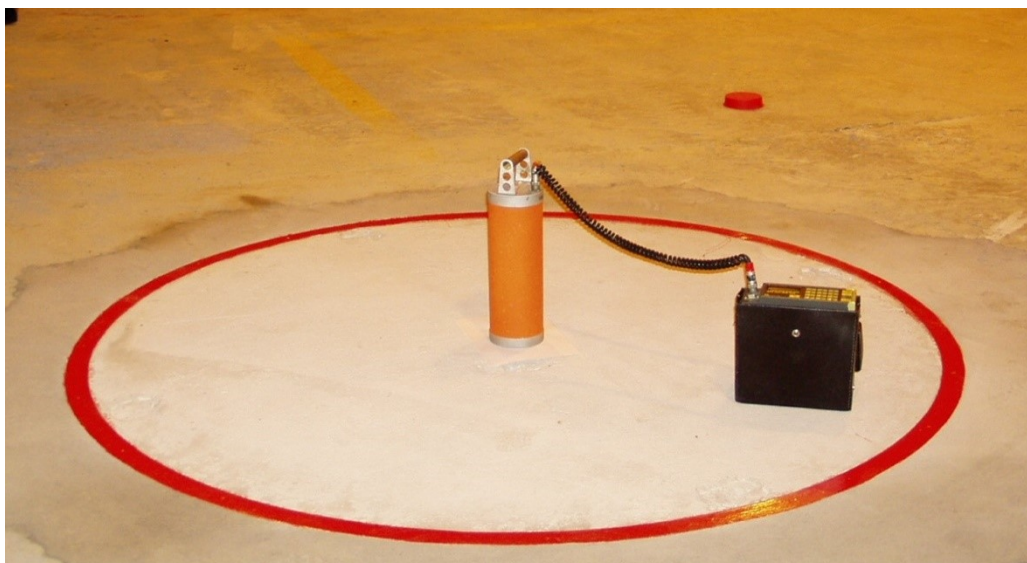
1. Kalibrační standard uranu na kalibrační základně pro pozemní a karotážní radiometrické přístroje v s.p. DIAMO ve Stráži pod Ralskem
2. Přírodní uranová mineralizace u Dolní Černé Studnice u Jablonce n. Nisou
3. Přírodní uranová mineralizace u obce Třebsko okr. Příbram

Pole gama záření uvedených objektů bylo studováno do výšky dva metry s pomocí přenosného gama spektrometru GS-256. Pole gama záření uranové mineralizace na lokalitě Třebsko bylo navíc studováno do výšky 40 m s pomocí mini-leteckého měření.

Gama spektrometr GS-256 (výrobce Geofyzika Brno) je přenosný terénní 256 kanálový gama spektrometr se scintilačním detektorem NaI(Tl) velikosti 76×76 mm. Automatická stabilizace spektra je zajištěna sledováním píku referenčního zdroje ^{137}Cs s energií 662 keV. Kalibrace gama spektrometru GS-256 byla provedena na kalibrační základně DIAMO s.p. ve Stráži pod Ralskem standardním způsobem v souladu s doporučeními Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA, 2003). Zájmové okno energie úhrnné gama aktivity odpovídá přibližně 860 – 3060 keV, zájmové okno energie draslíku bylo nastaveno na 1370 – 1573 keV, zájmové okno energie pro uran bylo zvoleno 1636 – 1890 keV a zájmové okno energie pro thorium bylo nastaveno na 2472 – 2777 keV. Citlivost přístroje byla stanovena 2,19 imp/s na 1 ppm Uekv. v okně úhrnné gama aktivity, 3,12 imp/s na 1 % K v okně draslíku, 0,31 imp/s na 1 ppm eU v okně uranu a 0,11 imp/s na 1 ppm eTh v okně thoria. Přístroj GS-256 je zobrazen na Obr. 2 a Obr. 3.

3.1 Kalibrační standard uranu s.p. DIAMO, Stráž p. Ralskem

Kalibrační standard uranu má válcovitý tvar, průměr 1,9 m a výšku 0,62 m. Koncentrace uranu v betonovém standardu je 29,2 ppm eU. Hustota standardu je $1,8 \text{ kg/m}^3$. Standard je zapuštěn do podlahy (Obr. 3). Betonová podlaha v okolí standardu má koncentraci uranu cca 5 ppm eU. Kalibrační základna je umístěna v zastřešené hale (Matolín et al., 2011).

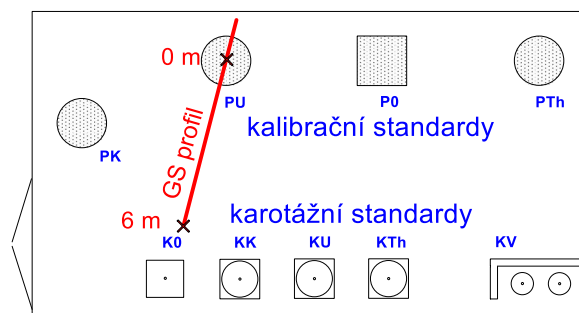


Obr. 3. Gama spektrometr GS-256 a Kalibrační standard uranu na kalibrační základně DIAMO s.p. Stráž pod Ralskem.

Schéma kalibrační základny zobrazující uranový standard (PU) a profil měření procházející jeho středem jsou zobrazeny na Obr. 4 (Matolín et. al, 2015). Kalibrační standardy draslíku (PK) a thoria (PTh) neovlivňují gama spektrometrické měření v oblasti energie 1,76 MeV uranové přeměnové řady. Karotážní standardy, modely vrtů K0, KK, KU, KTh jsou zapuštěny pod úroveň podlahy a pravděpodobně neovlivňují měření na povrchu.

Měření na profilu bylo realizováno gama spektrometrem GS-256 s počátečním krokem na profilu 0,5 m, a ve větší vzdálenosti od U standardu s krokem 1 m. Měření na profilu bylo provedeno ve čtyřech různých výškách detektoru, na zemi a ve výškách 0,5 m, 1 m a 2 m nad zemí. Měření ve výšce byla provedena s pomocí stojanu (Obr. 12). Čas měření na jednom bodě byl 5 min.

Výsledky měření koncentrace uranu a úhrnné gama aktivity na uranovém standardu jsou uvedeny v kapitole 5.1.



Obr. 4. Schéma kalibrační základny pro terénní radiometrické přístroje ve s.p. DIAMO, Stráž pod Ralskem a poloha studovaného profilu přes U standard (PU) (upraveno podle Matolín et al., 2015)

3.2 Přírodní uranová mineralizace u Dolní Černé Studnice

Přírodní uranová mineralizace u Dolní Černé Studnice se nachází uvnitř tělesa tanvaldského granitu a leží s velkou pravděpodobností na tektonickém zlomu, který je zakreslen v geologické mapě na Obr. 5. Poloha anomálie koncentrace uranu na zlomu je také v souladu s výsledky elektrické odporové tomografie.

Elektrická odporová tomografie byla měřena na dvou profilech kolmých k předpokládanému směru tektonických struktur přístrojem Ares, výrobce GF-Instruments (Obr. 6). Délka obou geoelektrických profilů byla 62 m, rozestup elektrod 2 m. Uspořádání elektrod bylo Wenner-Schlumberger. Umístění geoelektrických profilů ukazuje Obr. 8, profily procházejí metrážemi 20 m a 40 m horizontální osy. Výsledky elektrické odporové tomografie (Obr. 7) ukazují existenci výrazného odporového rozhraní, které pravděpodobně souvisí s předpokládaným tektonickým rozhraním. Zpracování elektrické odporové tomografie provedl RNDr. PhDr. Jiří Dohnal.

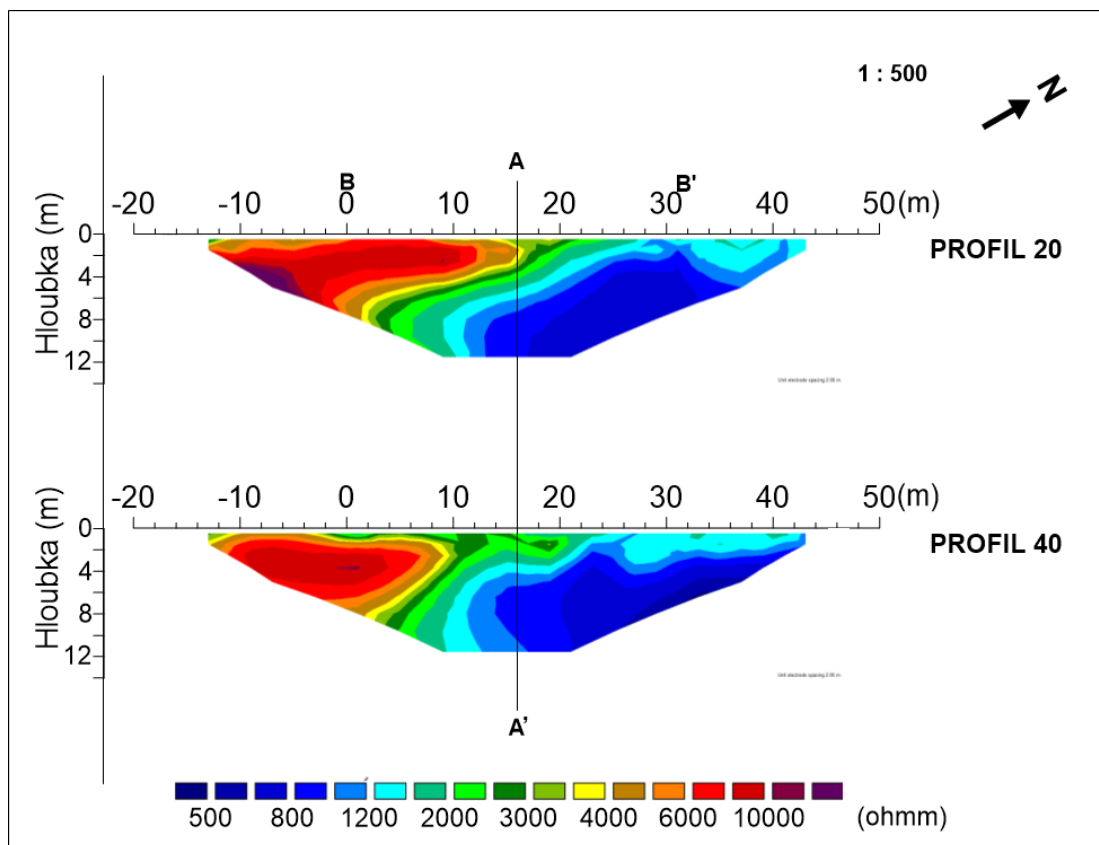
V zájmovém území velikosti 40 m × 32 m byly pomocí gama spektrometrického měření stanoveny koncentrace K, U a Th v husté síti měřících bodů. Měřící síť byla pravidelná s hustotou bodů volenou podle homogenity koncentrace uranu. V homogenní části vymezené plochy byla měřící síť 2,5 m × 2,5 m, v blízkosti anomálie koncentrace uranu byla volena měřící síť 1 × 1 m a v oblasti nejvyšších gradientů koncentrace uranu byla měřící síť zahuštěna až na 0,5 m × 0,5 m. Měřící body jsou zobrazeny na Obr. 8. jako křížky. Měření bylo provedeno gama spektrometrem GS-256. Čas měření byl 2 až 4 minuty, podle intenzity pole gama záření. Výsledky měření jsou zobrazeny ve formě mapy izolinií na Obr. 8.



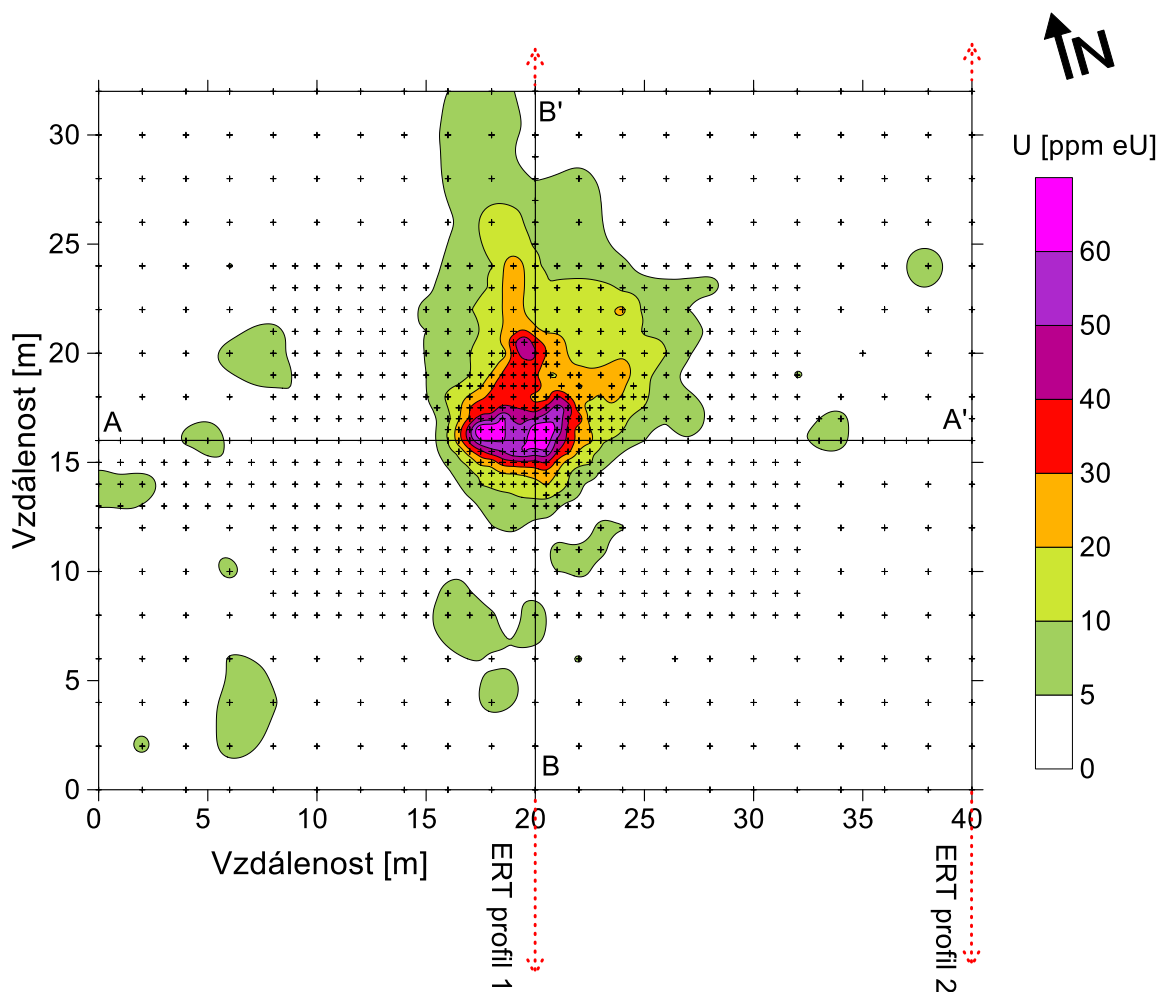
Obr. 5. Geologická mapa širšího okolí Dolní Černé Studnice (Česká geologická služba, 2018), upraveno.



Obr. 6. Elektrická odporová tomografie měřená přístrojem Ares (GF-Instruments) na lokalitě Dolní Černá Studnice.



Obr. 7. Výsledky elektrické odporové tomografie na lokalitě Dolní Černá Studnice.



Obr. 8. Mapa izolinií koncentrace uranu na lokalitě Dolní Černá Studnice. Body měření jsou zobrazeny jako křížky. Poloha elektrických odporových profilů je zobrazena čárkovanou červenou čarou.

Pole gama záření anomálie koncentrace uranu bylo studováno na dvou kolmých profilech AA' a BB' vyznačených na Obr. 8. Měření s gama spektrometrem GS-256 bylo realizováno s detektorem umístěným na zemi, ve výšce 0,5 m, 1 m a 2 m. Čas měření na jednom bodě byl 6 min.

Na lokalitě Dolní Černá Studnice byla také na profilu AA' a BB' stanovena objemová aktivita radonu v půdním vzduchu. Objemová aktivita radonu byla stanovena přístrojem LUK 3A (SMM Prague) se scintilačními Lucasovými komůrkami. Přístroj byl kalibrován v radonové komoře SÚJCHBO, Milín. Vzorky půdního vzduchu byly odebrány z hloubky 0,8 m. Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 5.2.

3.3 Přírodní uranová mineralizace u obce Třebsko

Lokalita náleží k příbramskému uranovému revíru. Příbramský uranový revír se nachází v prostoru exokontaktu středočeského plutonického komplexu v metasedimentech Barrandienu. Hydrotermální žilná uranová mineralizace se objevuje v zóně tektonicky deformovaných neoproterozoických hornin 1–2 km široké a 25 km dlouhé (Škácha et al, 2017).

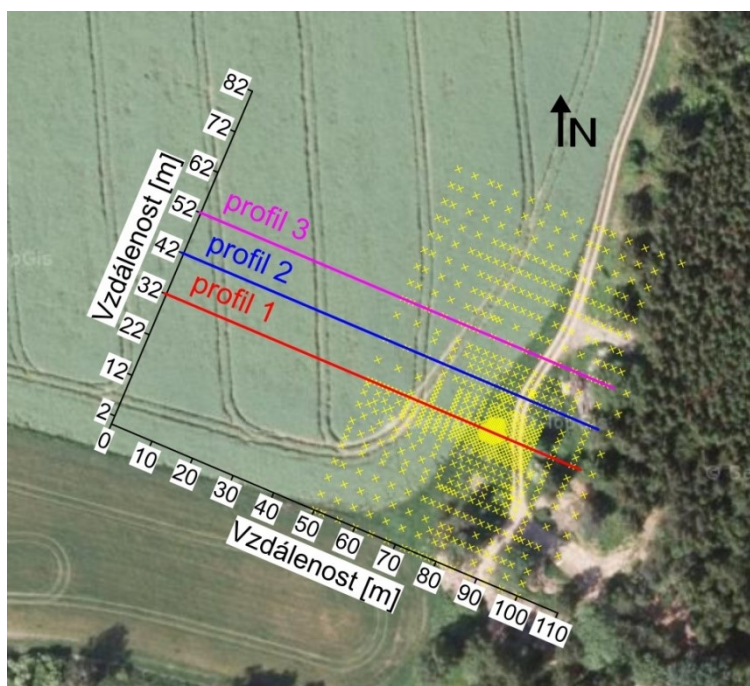
Anomální koncentrace uranu na zkoumané lokalitě Třebsko je vázána na vycházející žílu s uranovou mineralizací, která byla v minulosti zkoumána a těžena povrchovou rýhou. Radiometrická anomálie byla zmapována měřením úhrnné gama aktivity přístrojem GT-30. Terénní přenosný gama spektrometr GT-30 (výrobce Georadis s.r.o.) má scintilační NaI(Tl) detektor velikosti 51 mm × 51 mm. Přístroj zaznamenává 1024 kanálová spektra gama záření a údaje o poloze z GPS lokátoru připojeném přes bluetooth. Automatická stabilizace spektra energií gama záření využívá energie přírodních radionuklidů. Mapování úhrnné gama aktivity území bylo provedeno v dynamickém módu v nepravidelné síti měření. Výsledky mapování úhrnné gama aktivity posloužili k vymezení zájmového území, které bylo následně detailně zkoumáno pomocí bodového gama spektrometrického měření v pravidelné síti. Výsledky mapování radiometrické anomálie přístrojem GT-30 ukazuje mapa izolinií úhrnné gama aktivity v imp/s (Obr. 9).



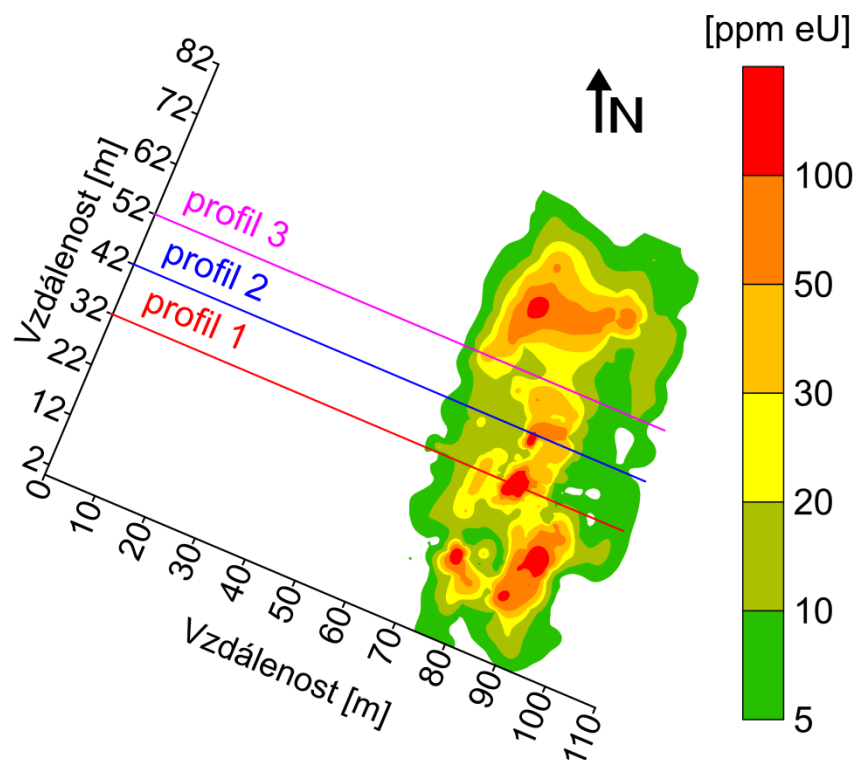
Obr. 9. Mapa izolinií úhrnné gama aktivity na lokalitě Třebsko.

Ve vymezeném prostoru anomálie koncentrace uranu bylo provedeno detailní pozemní gama spektrometrické měření s přístrojem GS-256 a sondou přístroje umístěnou na zemi. Pozemní měření, s cílem analyzovat koncentrace přírodních radionuklidů v hornině, bylo realizováno na bodech v pravidelné síti se vzdáleností bodů 0,5 m až 4 m podle homogenity koncentrace uranu. Měřicí síť je zobrazena na Obr. 10. Čas měření byl 2 minuty, na bodech s vysokým obsahem uranu byla doba měření zkrácena na 60 s nebo 30 s. Přístroj GS-256 využívá automatickou stabilizaci spektra podle píku 662 keV ^{137}Cs . Zvýšená přítomnost uranu může způsobit poruchy stabilizace spektra přístroje následkem interference gama záření ^{214}Bi , produktu přeměnové řady ^{238}U , o energii 609 keV do oblasti píku 662 keV ^{137}Cs . Na bodech s vysokou koncentrací uranu bylo měření realizováno s vypnutou automatickou stabilizací spektra. V takovém případě je zachováno nastavení zesílení z poslední provedené stabilizace spektra mimo zónu s vysokou radioaktivitou.

Koncentrace draslíku a thoria nevykázali anomální hodnoty, proto byla analyzována jen data koncentrace uranu. Terénní data byla interpolována pomocí programu Surfer (Golden Software) metodou kriging v síti 0,1 m \times 0,1 m. Vzniklý grid byl vykreslen jako mapa izolinií koncentrace uranu (Obr. 11).



Obr. 10. Situace umístění měřících bodů a profilů na lokalitě Třebsko.



Obr. 11. Mapa izolinií koncentrace uranu na lokalitě Třebesko z pozemního gama spektrometrického měření. Zobrazena je také poloha tří profilů pro studium pole gama záření nad zemí.



Obr. 12. Gamaspektrometrické měření na lokalitě Třebско s detektorem ve výšce 2 m.

Pole gama záření anomálie koncentrace uranu na lokalitě Třebско bylo studováno v různých výškách umístění detektoru nad zemí. Měření s gama spektrometrem GS-256 bylo realizováno na profilu 1 s detektorem umístěným na zemi a ve výškách 0,5 m, 1 m a 2 m nad zemí. Měření ve výšce 2 m dokumentuje Obr. 12. Krok měření na profilu byl 1 m. Čas měření byl 2 min.

Na lokalitě Třebско byla také stanovena objemová aktivita radonu v půdním vzduchu na profilu 1. Objemová aktivita radonu byla stanovena přístrojem LUK 3A. Vzorky půdního vzduchu byly odebrány z hloubky 0,8 m. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu potvrzuje anomální koncentrace uranu v hornině. Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 5.3.

3.4 Mini-letecký průzkum

Pro získání údajů o poli gama záření ve větších výškách nad dva metry bylo uplatněno mini-letecké měření s hexakoptérou Kingfisher a gama spektrometrem D230A. Mini-letecké měření bylo provedeno na přírodní uranové mineralizaci Třebско.

Hexakoptéra Kingfisher

Dálkově řízená hexakoptéra Kingfisher (výrobce Robodrone Industries s.r.o.) posloužila jako letecký prostředek pro mini-letecké gama spektrometrické měření. Hexakoptéra má maximální nosnost 5 kg, rozměry 120×140×22 cm, maximální doba letu s plně nabitou baterií bez zatížení je 45 min., maximální doba letu se zátěží 4 kg je podle údajů výrobce 16 min, maximální rychlost je 70 km/h. Hexakoptéra umožňuje provozovat lety při větru do rychlosti 10 m/s (Robodrone Industries s.r.o., 2017). Pilotování letu může být manuální nebo autonomní. Autonomní režim naviguje let mezi předem definovanými průletovými body pomocí GPS navigace a čidla výškoměru. Každý průletový bod je definován pomocí souřadnic zeměpisné šířky, zeměpisné délky a výšky letu nad zemí. Výška letu nad zemí je měřena čidlem atmosférického tlaku MS5611-01BA03, které je určené pro výškoměry a variometry s výškovým rozlišením 10 cm (TE Connectivity, 2017). Tlakový výškoměr je kalibrován na zemi před každým letem na nulovou výšku. Hexakoptéra s připojeným gama spektrometrem v letu je zobrazena na Obr. 13.

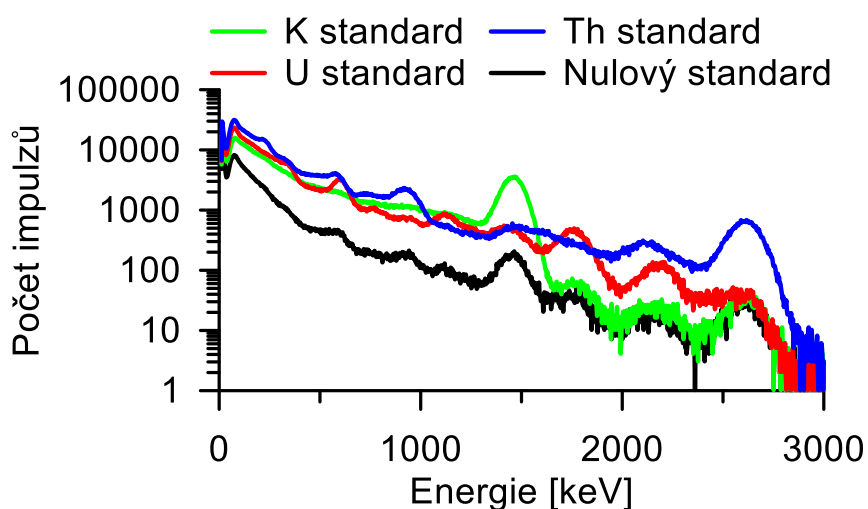
Gama spektrometr D230A

Mini-letecký 1024 kanálový gama spektrometr D230A (výrobce Georadis s.r.o.) má vestavěné dva BGO scintilační detektory, každý s objemem 103 cm³. Spektrometr využívá automatickou stabilizaci spektra s využitím píků přírodních radionuklidů. Energiové rozlišení je 13 % pro energii 662 keV ¹³⁷Cs. Váha přístroje včetně dobíjecí baterie a duralového držáku sloužícího pro připojení k letounu je přibližně 4 kg. Kalibrační konstanty gama spektrometru D230A pro geometrii měření na zemi byly určeny na kalibrační základně DIAMO s.p. ve Stráži pod Ralskem. Detailní parametry kalibrační základny včetně koncentrací přírodních radionuklidů ve standardech byly publikovány (Matolín et al., 2011). Postup stanovení kalibračních konstant byl proveden v souladu s doporučeními Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA, 2003). Zájmové okno energie úhrnné gama aktivity bylo zvoleno 400 – 2810 keV, zájmové okno energie draslíku bylo nastaveno na 1370 – 1570 keV, zájmové okno energie pro uran bylo zvoleno 1660 – 1860 keV a zájmové okno energie pro thorium bylo nastaveno na 2410 – 2810 keV. Jednotlivá třicetiminutová spektra registrovaná na draslíkovém, uranovém, thoriovém a nulovém standardu jsou zobrazena na Obr. 14. Citlivost přístroje byla stanovena 7,52 imp/s na 1 ppm Uekv. v okně úhrnné gama aktivity, 5,72 imp/s na 1 % K v okně draslíku, 0,55 imp/s na 1 ppm eU v okně uranu a 0,26 imp/s na 1 ppm eTh v okně thoria. Pro účely této práce je citlivost přístroje pro danou energii v dané výšce

odvozená z citlivosti určené na kalibračních standardech na zemi pomocí teoretického přepočtu podle funkce E_2 . Kalibrační profily pro experimentální stanovení citlivostí mini-leteckých přístrojů v různých výškách měření nad zemí nejsou v současnosti připravené. Pozadí bylo stanoveno na vodní ploše. Oprava na pozadí zahrnovala opravu na kosmické záření, vnitřní radioaktivitu přístroje a přibližnou opravu na vzdušný radon.



Obr. 13. Hexakoptéra Kingfisher s připojeným gama spektrometrem D230A v letu.



Obr. 14. Spektra gama záření registrovaná na draslíkovém, uranovém, thoriovém a nulovém standardu kalibrační základny DIAMO s.p. přístrojem D230A. Doba měření 30 minut.

Metodika měření a zpracování dat

Mini-letecké měření bylo provedeno na třech 100 m dlouhých paralelních profilech ve směru SZ-JV kolmo na delší osu radiometrické anomálie. Profil č. 1 prochází maximem anomálie koncentrace uranu na metrů 80 m od počátku profilu. Vzdálenost mezi jednotlivými mini-leteckými profilemi je 10 m (Obr. 10 a Obr. 11).

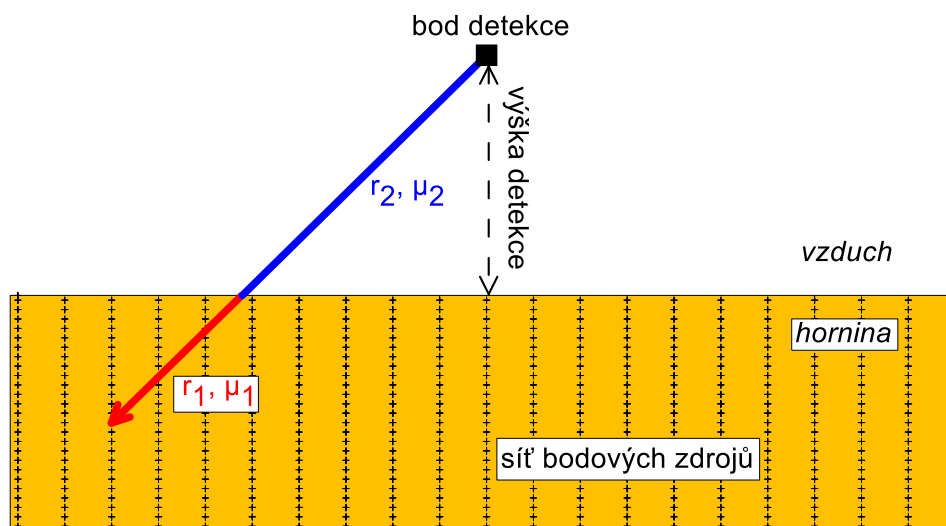
Mini-letecké měření bylo provedeno na každém ze tří profilů v osmi různých výškách nad zemí od 5 m do 40 m s výškovým krokem 5 m. Rychlost letu byla 1 m/s a interval záznamu spektra byl 1 s. Lety po profilech byly realizovány v autonomním režimu navigace pomocí GPS. Vzlet a přistání byly pilotovány manuálně. Výsledkem mini-leteckého měření byla 1 sekundová 1024 kanálová spektra, ze kterých byly vyhodnoceny koncentrace uranu a úhrnná gama aktivita. Koncentrace uranu byly vypočteny maticovou metodou (IAEA, 2003).

Gama spektra mini-leteckého měření ve výškách od 5 m do 40 m nad zemí byla zpracována pomocí citlivosti stanovené na zemi s opravou citlivosti gama spektrometru na pokles intenzity gama záření ve vzduchu podle funkce E_2 .

V nižších výškách letu nebylo v některých případech možné provádět lety na celé délce profilů kvůli přítomnosti vegetace, proto nejsou profilová data v některých případech úplná.

4 Modelování pole gama záření

Pole gama záření terénních existujících i pomyslných radioaktivních zdrojů bylo modelováno pomocí zjednodušení pro monoenergetické gama záření. Tento přístup je v literatuře rozšířen (King, 1912; Grasty, 1975, 1979; Grasty et al., 1979; Kogan, 1971; Pitkin, Duval, 1980). Výpočet pole gama záření vychází z modelu intenzity gama záření bodového zdroje ve dvouvrstevném nehomogenním prostředí, který uvádí rovnice (1) (Mareš et al., 1990). Trojrozměrný geologický zdroj ve tvaru desky byl aproximován hustou trojrozměrnou sítí bodových zdrojů. Výsledná intenzita gama záření v bodě detekce byla počítána jako suma příspěvků od všech bodových zdrojů aproximujících zdrojovou desku. Schéma výpočtu intenzity gama záření v bodě detekce nad zdrojovou deskou zobrazuje Obr. 15. Intenzitu gama záření bodového zdroje popisuje rovnice (1).

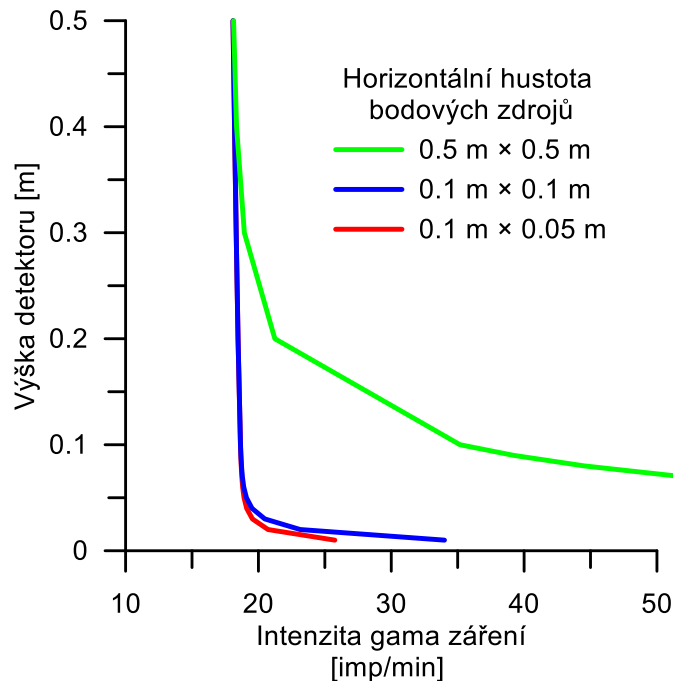


Obr. 15. Schéma výpočtu intenzity gama záření v bodě detekce nad zdrojovou deskou.

Bodové zdroje aproximující zdrojovou desku musí být rozmístěny v dostatečně husté síti. Vystává otázka, jaká vzdálenost mezi bodovými zdroji je optimální v horizontálním a vertikálním směru. Příliš velká vzdálenost mezi bodovými zdroji způsobí pravděpodobně vysokou chybu modelu a nedostatečnou shodu modelovaného a reálného pole gama záření. Příliš malá vzdálenost mezi bodovými zdroji, aproximujícími zdrojovou desku, způsobí rapidní nárůst jejich počtu a vede k neúměrnému prodloužení času výpočtu. Optimální hustota bodových zdrojů pro modelování pole gama záření geologického zdroje radioaktivity byla určena podle několika experimentálních výpočtů pole gama záření nad zdrojovou deskou.

4.1 Horizontální hustota bodových zdrojů gama záření

Optimální horizontální hustota bodových zdrojů byla studována na trojrozměrném zdroji ve tvaru desky s rozměry $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 0,5\text{ m}$. Byly vypočítány intenzity gama záření v různých výškách nad středem tří zdrojových desek s odlišnou hustotou bodových zdrojů v horizontálním směru. První deska má hustotu bodových zdrojů v horizontální rovině $0,1\text{ m} \times 0,05\text{ m}$. Druhá deska má hustotu bodových zdrojů v horizontální rovině $0,1\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ a třetí deska má hustotu bodových zdrojů v horizontální rovině $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$. Vertikální hustota bodových zdrojů byla ve všech třech případech $0,001\text{ m}$. Výsledná intenzita gama záření odpovídá odezvě gama spektrometru GS-256 (imp/min), který má citlivost $18,9\text{ imp/min}$ na 1 ppm eU , pro koncentraci uranu ve zdrojové desce 1 ppm eU . Výsledky experimentálních výpočtů jsou zobrazeny na Obr. 16. Výsledky ukazují, že vypočtené intenzity gama záření jsou odlišné pouze v blízké vzdálenosti od povrchu modelové desky do určité výšky. Nelineární části křivek (s intenzitou gama záření nad hodnotou citlivosti $18,9\text{ imp/min}$) nejsou reálné a neodpovídají obecnému vztahu pro intenzitu gama záření nad nekonečným poloprostorem, vztah (2). Efektivní výška detekce nad zemským povrchem při měření se sondou gamaspektrometru položenou na zemi byla uvažována 10 cm . Jako optimální se jeví hustota bodových zdrojů v horizontální rovině $0,1 \times 0,1\text{ m}$, která byla v této práci používána pro další výpočty.



Obr. 16. Vypočtená intenzita gama záření nad středem modelové desky $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ s rozdílnou horizontální hustotou bodových zdrojů gama záření $0,05 \times 0,1\text{ m}$, $0,1 \times 0,1\text{ m}$ a $0,5 \times 0,5\text{ m}$ (501×1001 , 501×501 a 101×101 bodů), vertikální hustota bodových zdrojů 1 mm (500 bodů ve vertikální dimenzi).

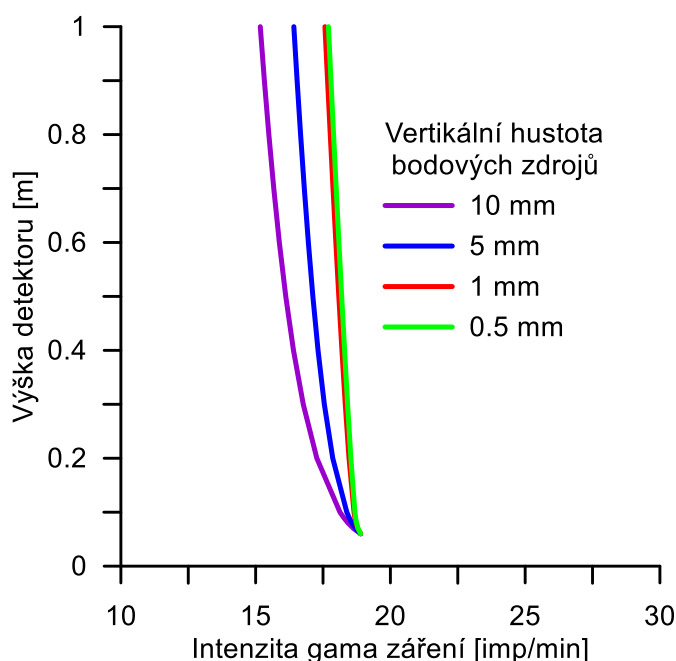
4.2 Vertikální hustota bodových zdrojů gama záření

Lze předpokládat, že s rostoucí vertikální hustotou bodových zdrojů ve zdrojové desce aproximující geologický zdroj gama záření, se výpočet pole gama záření přibližuje k reálnému poli. Byly vypočteny intenzity gama záření v různých výškách detekce nad středem čtyř homogenních desek s rozměry $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ s různou vertikální hustotou bodových zdrojů. Vertikální vzdálenost bodových zdrojů ve zdrojové desce byla zvolena 10 mm , 5 mm , 1 mm a $0,5\text{ mm}$. To odpovídá počtu 50 , 100 , 500 a 1000 bodových zdrojů ve vertikální dimenzi. V horizontální rovině byla hustota bodových zdrojů $10 \times 10\text{ cm}$. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny na Obr. 17.

Vypočtená intenzita gama záření roste s vertikální hustotou bodových zdrojů v modelové desce. Výsledky experimentálních výpočtů ukazují, že vertikální hustoty bodových zdrojů 10 mm a 5 mm nejsou dostatečné. Vypočtené intenzity gama záření nad deskou s vertikální hustotou bodových zdrojů 1 mm jsou jen málo odlišné od výsledků pro desku s vertikální hustotou bodových zdrojů $0,5\text{ mm}$. Na základě těchto výsledků lze předpokládat, že

nepřesnost modelových výpočtů gama záření při použití vertikální hustoty bodových zdrojů 1 mm není příliš významná.

Mocnost modelové desky vychází ze zákonitostí útlumu gama záření ve hmotě. Většina gama záření hornin pochází z 30 cm vrstvy pod povrchem (IAEA, 1989). Pro další výpočty v této práci byla zvolena mocnost modelové desky 1 m, vertikální hustota bodových zdrojů 1 mm a hustota bodových zdrojů v horizontální rovině $0,1 \times 0,1$ m. Takováto zdrojová deska představuje vhodnou aproximaci geologického zdroje radioaktivity.



Obr. 17. Vypočtená intenzita gama záření nad středem modelové zdrojové desky $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ s rozdílnou vertikální hustotou bodových zdrojů gama záření 10 mm, 5 mm, 1 mm and 0,5 mm (50, 100, 500 a 1000 bodů ve vertikální dimenzi). Horizontální hustota bodových zdrojů $10 \times 10 \text{ cm}$.

4.3 Kalibrace modelu, postup modelování

Pro kalibraci modelu zdrojové desky je posouzen vztah mezi intenzitou gama záření jednotlivého bodového zdroje a celkovým součtem účinků všech bodových zdrojů v bodě detekce. Pro účel kalibrace modelu je uvažována homogenní zdrojová deska. Každý bodový zdroj má stejnou intenzitu gama záření v jednotkové vzdálenosti ve vakuu, která je popsána součinem km ve vztahu (1). Konstanta k ve vztahu (1) je nazvána konstanta bodového zdroje. Hmotnost m radioaktivní látky je možné nahradit koncentrací C , neboť bodový zdroj reprezentuje objem $0,1 \times 0,1 \times 0,001 \text{ m}$ zdrojové desky, vztah (7).

Modelová zdrojová deska je aproximována počtem Q bodových zdrojů. Příspěvek gama záření každého bodového zdroje, značený I^q , do bodu detekce je odlišný a je dán vzdálenostmi r_1^q, r_2^q a koncentrací C^q podle vztahu (7) a Obr. 15. Intenzita pole gama záření v bodě detekce, značena I^D , je dána sumací účinků všech bodových zdrojů aproximujících zdrojovou desku:

$$I^D = \sum_{q=1}^Q I^q = \sum_{q=1}^Q \frac{kC^q}{(r_1^q + r_2^q)^2} \exp(-\mu_1 r_1^q - \mu_2 r_2^q) \quad (7)$$

Při kalibraci modelu hledáme hodnotu konstanty bodového zdroje k takovou, aby v bodě detekce ve středu modelové desky ve výšce 0,1 m (efektivní výška detekce pro měření se sondou na zemi byla zvolena 0,01 m), při jednotkové koncentraci radioaktivní látky v homogenní zdrojové desce $C=1$, vycházela intenzita pole gama záření I^D rovna jedné. Intenzitu pole gama záření v bodě detekce $I^D=1$ lze potom chápat jako četnost impulzů detekovaných v daném zájmovém okně gama energie na povrchu nekonečného poloprostoru s jednotkovou koncentrací radioaktivního izotopu s přístrojem s jednotkovou citlivostí.

Konstantu bodového zdroje k pro $I^D=1$ a $C^q=1$ lze vyjádřit ze vztahu (7) jako:

$$k = \frac{1}{\sum_{q=1}^Q \frac{1}{(r_1^q + r_2^q)^2} \exp(-\mu_1 r_1^q - \mu_2 r_2^q)} \quad (8)$$

Intenzitu pole gama záření v bodě detekce I^D pro nehomogenní zdrojovou desku s proměnnou koncentrací uranu lze získat zadáním libovolné koncentrace C^q do vztahu (7) pro každý bodový zdroj.

Četnost impulzů n registrovanou v bodě detekce konkrétním přístrojem s citlivostí pro geometrii měření na zemi 0S ($h=0,1$ m) lze získat jako součin:

$$n = I^D \times {}^0S \text{ [imp/s]} \quad (9)$$

Pokud chceme uvést výsledek intenzity pole gama záření v bodě detekce, nacházejícím se v libovolné výšce h nad zdrojovou deskou, v jednotkách koncentrace uranu C_U , platí:

$$C_U = \frac{n}{h_S} \text{ [ppm eU]}, \text{ kde}$$

n je četnost impulzů daná vztahem (9).

hS je citlivost konkrétního přístroje pro výšku h (četnost impulzů imp/s na 1 ppm eU)

Je nutno mít na paměti, že citlivost každého přístroje, zjištěná kalibrací přístroje na standardu, je vázána na kalibrační geometrii měření a mění se tedy také s výškou detekce nad zemí h .

Pro výpočty pole gama záření ve výškách do 100 m by byla modelová zdrojová deska s rozměry 50 m \times 50 m \times 0,5 m, použitá v kapitolách 4.1 a 4.2, vzhledem k šířkovému dosahu gama záření, nedostatečná. Rozměry modelové zdrojové desky simulující velkoplošný geologický zdroj pro modelování pole gama záření anomálií koncentrace uranu byly zvoleny 1000 m \times 1000 m, mocnost 1 m. Zdrojová deska je, pro hustotu bodových zdrojů 0,1 \times 0,1 \times 0,001 m, při výpočtu reprezentována trojrozměrnou maticí velikosti 10001 \times 10001 \times 1000 prvků, které odpovídají počtu $Q=100\ 020\ 001\ 000$ bodových zdrojů. Zdrojová deska se nachází v trojrozměrné pravoúhlé soustavě souřadnic. Bod detekce I^D se posouvá po zvolených profilech s voleným krokem ve zvolených výškách detekce nad modelovou zdrojovou deskou.

Definice zdroje gama záření

V případě modelování pole gama záření přírodních radioaktivních objektů je zdroj gama záření popsán daty terénního plošného gamaspektrometrického měření interpolovaného v gridu 10 \times 10 cm, tedy ve stejné horizontální hustotě jako bodové zdroje aproximující zdrojovou desku. Předpokládá se neměnná koncentrace uranu s hloubkou. Jde o identická data, která byla použita pro vykreslení map izolinií koncentrace U na lokalitě (Obr. 8, Obr. 11) a která byla snížena o hodnotu běžného neanomálního pozadí. Pozadí tvoří na celé ploše konstantní příspěvek gama záření, který není žádoucí zahrnovat do modelové zdrojové desky. Pozadí je přičteno zpět v posledním kroku modelového výpočtu. Hodnota pozadí byla určena jako průměrná hodnota koncentrace U v okrajových neanomálních částech zkoumané plochy. Pro kalibrační základnu DIAMO odpovídá pozadí 5 ppm eU, pro lokalitu Dolní Černá studnice 3,81 ppm eU a pro lokalitu Třebsko 2,44 ppm eU.

Vlastnosti prostředí

Pro výpočty koncentrace uranu jsou parametry prostředí vztaženy k energii 1,764 MeV. Lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu je uvažován pro zvolené parametry 0,0056 m⁻¹. Pro výpočty úhrnné gama aktivity byl lineární součinitel zeslabení gama záření ve

vzduchu, pro účely výpočtu pole gama záření na lokalitě Třebsko, uvažován $0,0026 \text{ m}^{-1}$ a pro účely výpočtů pole gama záření modelových objektů byl μ_2 stanoven $0,0035 \text{ m}^{-1}$ (viz kapitola 2.4). Lineární součinitel zeslabení gama záření v hornině μ_1 byl uvažován $8,53 \text{ m}^{-1}$ (viz kapitola 2.4).

Modelové výpočty pole gama záření byly prováděny v Matlabu. Výpočet je z důvodu velkého množství operací časově náročný. Doba výpočtu pole gama záření na jednom objektu trvala podle délky a počtu profilů řádově desítky hodin.

4.4 Ověření modelu pro útlum gama záření ve vzduchu

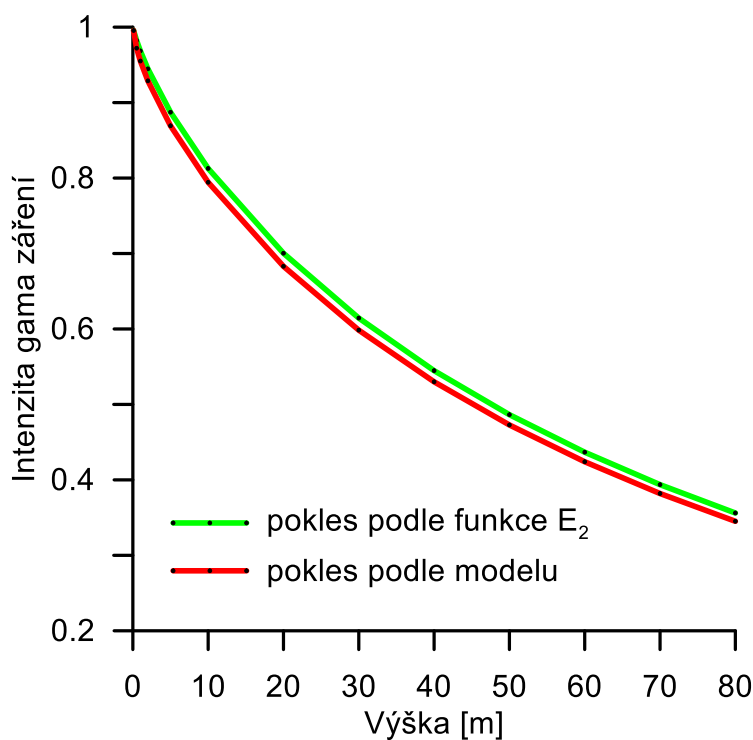
Pokles intenzity pole gama záření nad nekonečným homogenním poloprostorem v absorbujícím prostředí (vzduch) je popsán integrálně exponenciální funkcí druhého řádu E_2 , vztah (3). Hodnoty funkce $E_2(\mu h)$ byly vypočítány pro lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu μ pro energii 1764 keV, $\mu=0,0056 \text{ m}^{-1}$ a pro různé výšky h (Tabulka 1).

Pro ověření reálnosti modelu byly hodnoty funkce E_2 srovnány s vypočtenou intenzitou pole gama záření nad středem modelové zdrojové desky $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ s mocností 1 m, lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu byl uvažován shodný jako při výpočtu funkce E_2 , $\mu=0,0056 \text{ m}^{-1}$. Intenzita pole gama záření v bodě detekce I^D byla vypočítána v různých výškách detekce od 0,1 m do 80 m.

Výsledky srovnání poklesu intenzity gama záření podle funkce E_2 a podle výpočtu nad středem modelové zdrojové desky jsou zobrazeny graficky (Obr. 18) a v tabulce (Tabulka 2). Odchylka modelované intenzity pole gama záření nad zdrojovou deskou od hodnot funkce E_2 je do 3 %. Odchylka modelových hodnot od teoretické funkce E_2 by se dala pravděpodobně dále snížit zahuštěním sítě bodových zdrojů aproximujících zdrojovou desku. Pro další výpočty v této práci, vzhledem k obvyklé přesnosti terénních radiometrických dat, je odchylka modelu do 3 % uspokojivá.

Tabulka 2. Srovnání poklesu intenzity gama záření podle funkce E_2 a podle výpočtu nad středem modelové zdrojové desky pro energii 1764 keV.

výška [m]	fce E_2	model	rozdíl [%]
0.1	0.996	0.996	0.00
0.5	0.982	0.972	1.04
1	0.968	0.955	1.38
2	0.945	0.929	1.68
5	0.887	0.869	2.02
10	0.813	0.794	2.25
20	0.700	0.683	2.47
30	0.614	0.598	2.60
40	0.545	0.530	2.71
50	0.486	0.473	2.80
60	0.437	0.424	2.90
70	0.394	0.382	2.99
80	0.356	0.345	3.08



Obr. 18. Srovnání poklesu intenzity gama záření podle funkce E_2 a podle výpočtu nad středem modelové zdrojové desky pro energii 1764 keV.

4.5 Diskuze

Způsob modelování uvažující monoenergetické záření je zjednodušující. Do zájmového okna uranu (pro gamaspektrometr GS-256: 1636 – 1890 keV) ve skutečnosti nepřispívá pouze hlavní energetický pík 1764 keV ^{214}Bi ale také například, prostřednictvím Comptonova

rozptylu, další méně intenzivní pík 2204 keV ^{214}Bi . Zájmové okno energie uranu je široké 260 keV, lineární součinitel zeslabení gama záření, který závisí na energii gama, se však považuje pro celou šířku okna za konstantní. Příspěvky radionuklidů thoriové přeměnové řady a kosmické záření nejsou v modelu uvažovány. Citlivost S [imp/s na 1 ppm eU] je výsledkem standardní kalibrace gamaspektrometru a vliv interference různých energií gama záření je v ní již zahrnut.

Aplikace monoenergetického způsobu modelování na pole úhrnné gama aktivity je výrazným zjednodušením. Energetické okno úhrnné gama aktivity zahrnuje široký interval energií (pro gamaspektrometr GS-256 860 – 3060 keV, pro gamaspektrometr D230A 400 – 2810 keV). V okně úhrnné gama aktivity se uplatní mnoho píků energií přírodních radionuklidů, izotop ^{40}K a izotopy přeměnových řad U i Th. Výrazně se také uplatní odražené a rozptýlené gama záření. Lineární součinitel zeslabení ve vzduchu μ_2 pro úhrnnou gama aktivitu lze stanovit formálně pomocí experimentálního měření v různých výškách detekce, nicméně jeho hodnota závisí na mnoha faktorech, poměru K, U a Th v hornině, diskriminační hladině gamaspektrometru a také na výšce detekce. V této práci byla použita experimentální hodnota μ_2 pro situaci mini-leteckého průzkumu na lokalitě Třebsko a průměrná literární hodnota pro modelování pole úhrnné gama aktivity modelových objektů (viz kapitola 2.4). Citlivosti pro draslík, uran a thorium v okně úhrnné gama aktivity S_K^{TC} , S_U^{TC} , S_{Th}^{TC} pro geometrii měření na zemi jsou známé z kalibrace přístrojů GS-256 a D230A.

Způsob kalibrace modelu a využití experimentálně stanovené citlivosti přístroje, získané měření na kalibračním standardu, minimalizuje chyby plynoucí ze zjednodušeného monoenergetického přístupu. Studium pole úhrnné gama aktivity pomocí experimentálních měření v různých výškách detekce a pomocí simulací Monte Carlo je námětem k dalšímu výzkumu.

Další zjednodušení modelu spočívá v nahrazení detektoru bodem detekce. Reálný detektor má citlivý objem detektoru, tvořený scintilačním krystalem, který je stíněn vlastními obalovými materiály detektoru. Reálné detektory vykazují závislost účinnosti detektoru na směru přicházejících gama paprsků. Výpočet pole gama záření popsanou metodou uvažuje pouze intenzitu gama záření v bodě detekce, citlivost detektoru se uvažuje jako nezávislá na směru přicházejících gama paprsků. Løvborg a Kirkegaard (1974) uvádí, že válcový scintilační NaI(Tl) krystal velikosti 3×3 palce je možné, pro dopadající fotony s energií větší než 0,5 MeV, považovat za detektor s konstantní směrovou účinností.

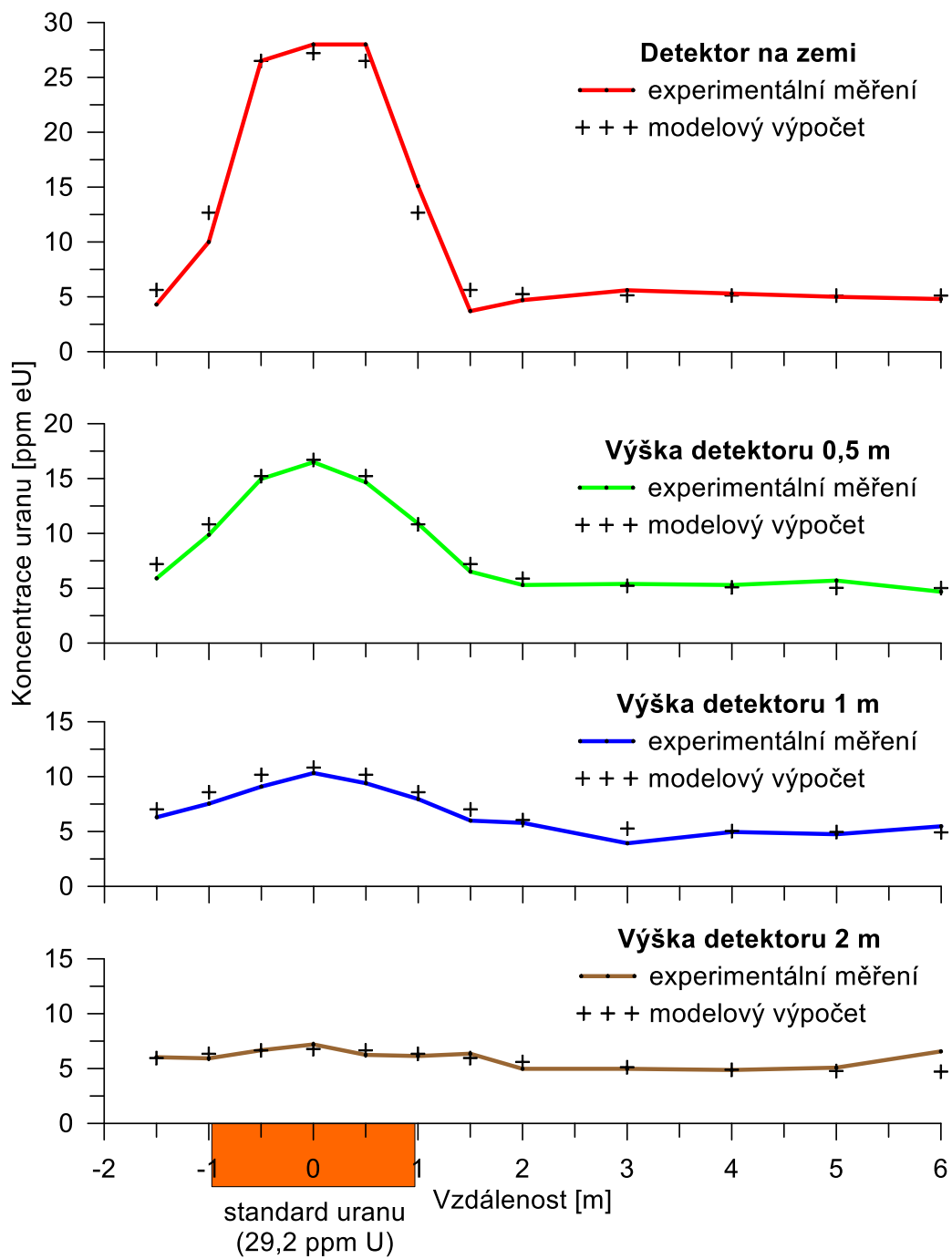
5 Výsledky na lokalitách s anomální koncentrací uranu

5.1 Výsledky experimentů a modelových výpočtů na kalibračním standardu uranu, s.p. DIAMO, Stráž pod Ralskem

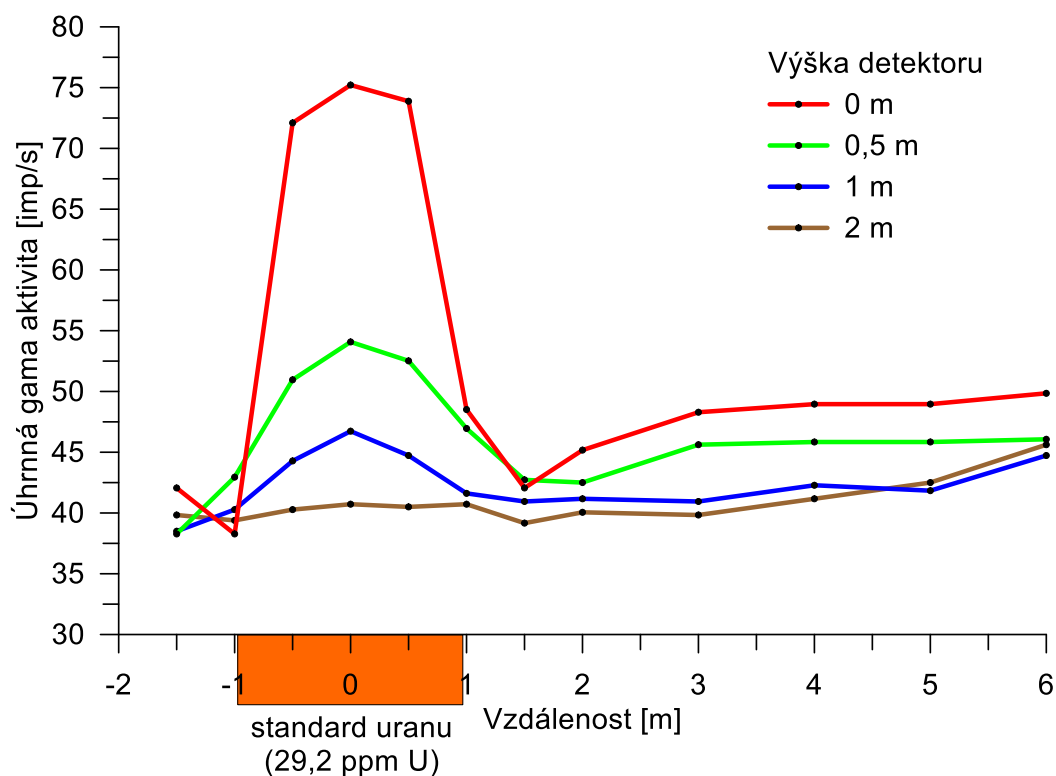
Kalibrační standard uranu a kalibrační základna s.p. DIAMO ve Stráži pod Ralskem jsou popsány v kapitole 3.1. Výsledky experimentálního měření radioaktivity s přenosným gamaspektrometrem GS-256 na U standardu v geometrii měření s detektorem na zemi, v 0,5 m, v 1 m a ve 2 m současně s výsledky výpočtu koncentrace uranu nad modelovým zdrojem s parametry uranového kalibračního standardu jsou uvedeny na Obr. 19.

Na Obr. 20 jsou uvedeny výsledky měření úhrnné gama aktivity gamaspektrometrem GS-256 na U standardu v jednotce imp/s.

Výpočet pole úhrnné gama aktivity pro situaci kalibračního standardu uranu na kalibrační základně DIAMO s.p. není uveden. Situace kalibrační základny není pro tento výpočet příznivá. Pole úhrnné gama aktivity může být ovlivněno blízkým standardem draslíku. Koncentrace K a Th jsou rozdílné v samotném kalibračním standardu a v okolních materiálech podlahy, což komplikuje odlišení neanomálního pozadí od anomálního zdroje gama záření.



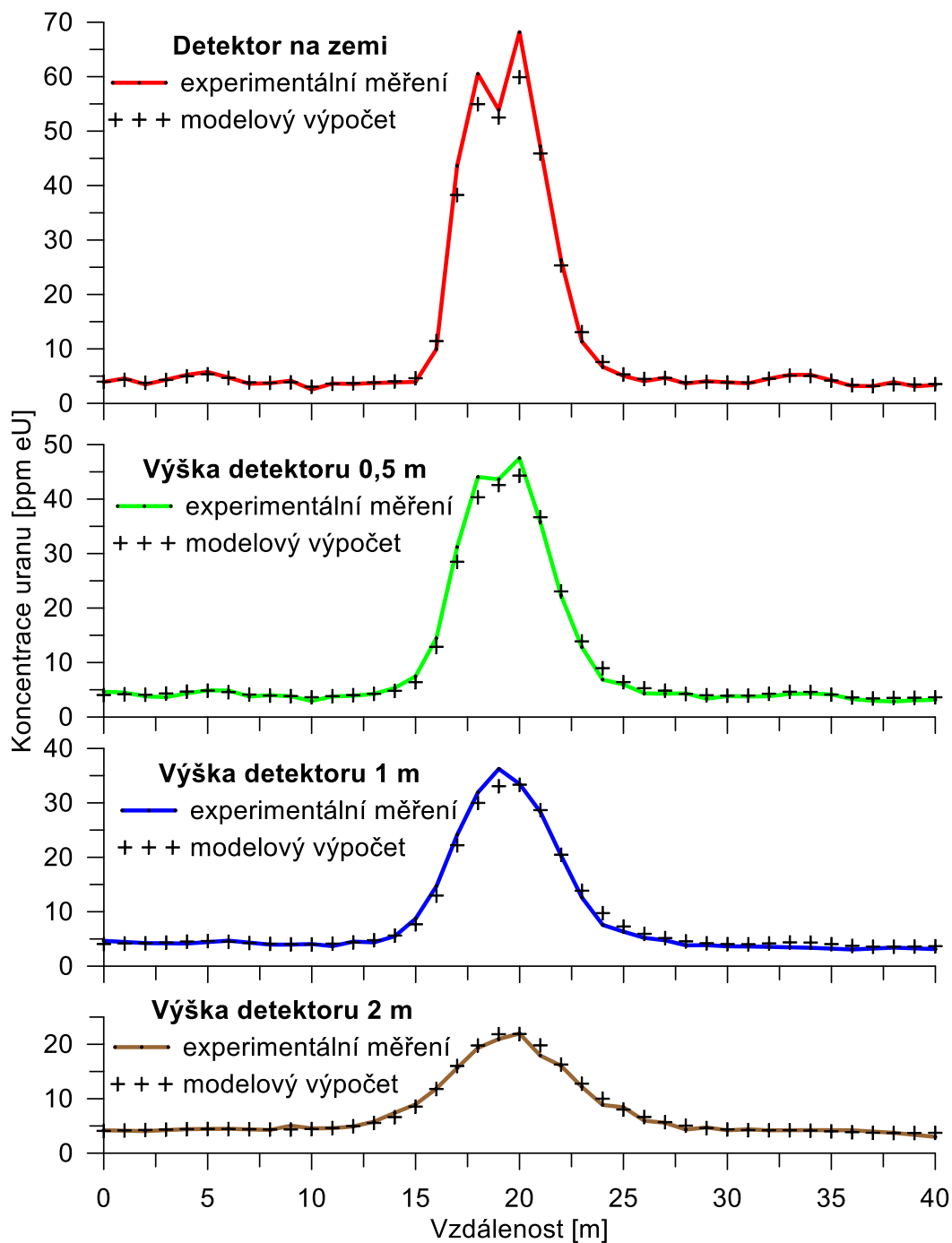
Obr. 19. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu koncentrace U na kalibračním standardu U v s. p. DIAMO, Stráž pod Ralskem.



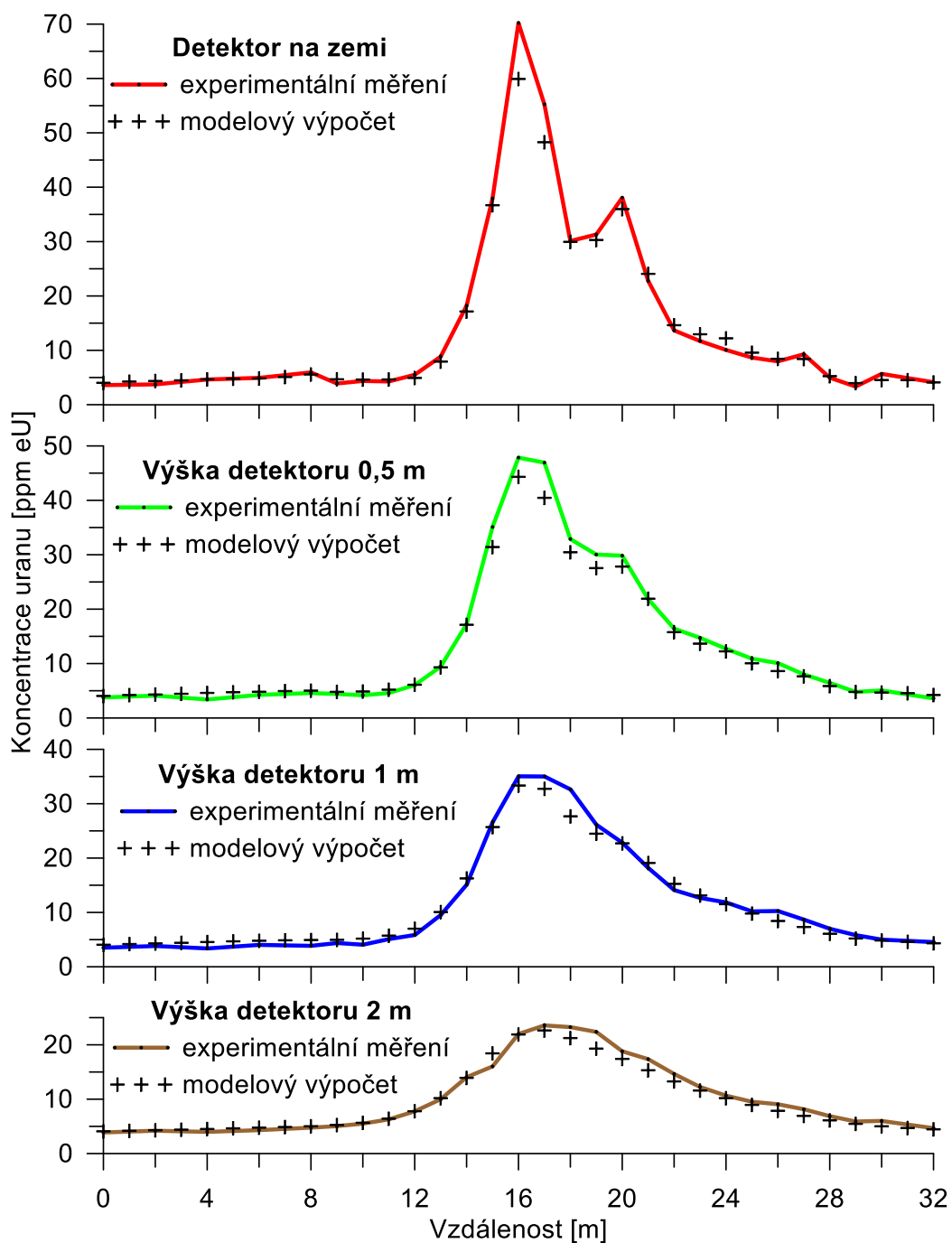
Obr. 20. Úhrnná gama aktivita stanovená gama spektrometrem GS-256 na kalibračním standardu U měřením na zemi a ve výšce 0,5 m, 1 m a 2 m vyjádřená v četnosti impulsů imp/s.

5.2 Výsledky experimentů a modelových výpočtů na přírodní uranové mineralizaci Dolní Černá Studnice

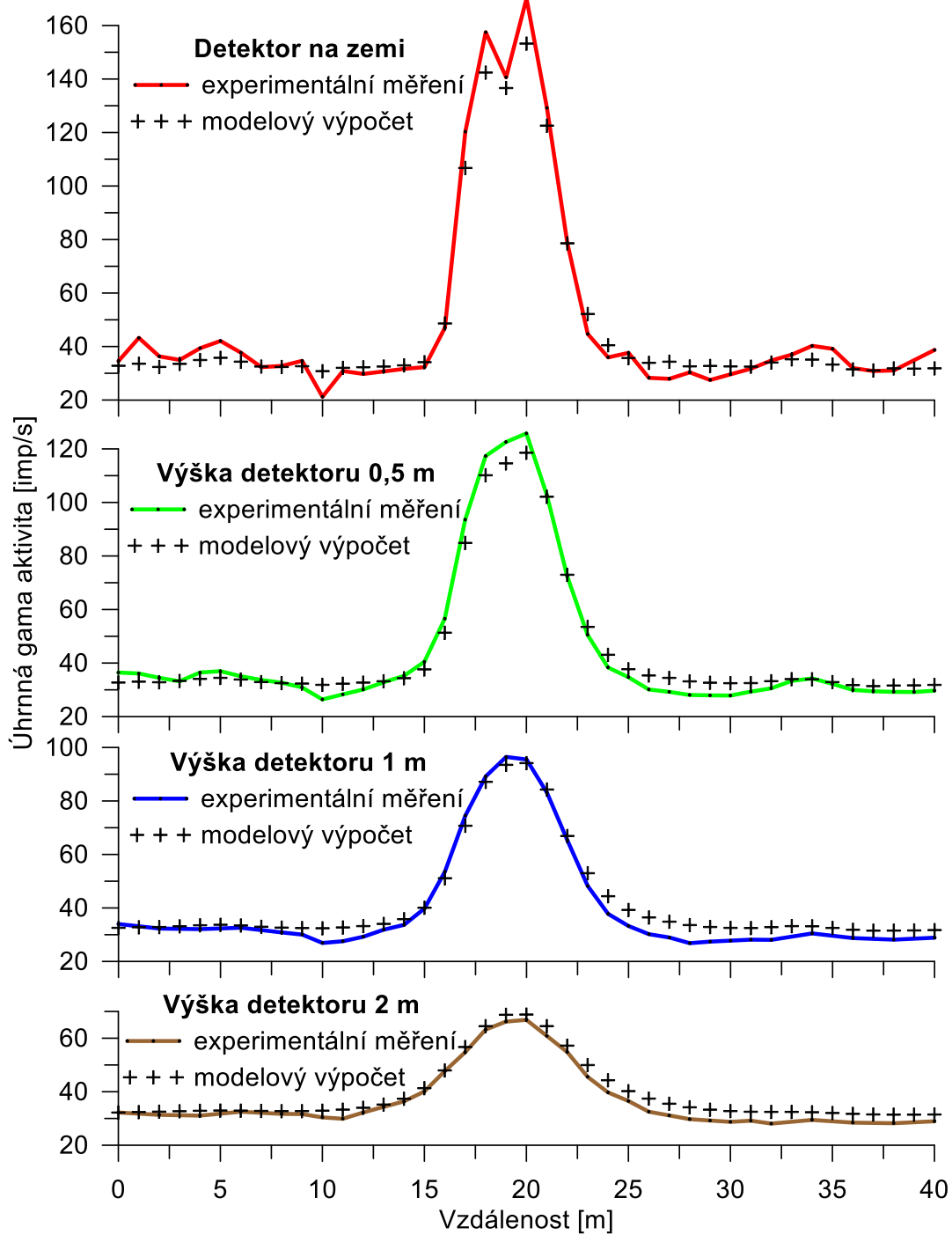
Rozložení koncentrace U a vedení profilů na lokalitě Dolní Černá Studnice zobrazuje Obr. 8. Mapa izolinií koncentrace uranu (Obr. 8) vykresluje grid s hustotou 10×10 cm získaný interpolací pozemních gamaspektrometrických dat (viz kapitola 3.2), který současně definuje koncentraci uranu v modelové zdrojové desce (viz kapitola 4.3). Výsledky experimentálního gamaspektrometrického stanovení a výsledky modelového výpočtu koncentrace U na profilu AA' jsou uvedeny na Obr. 21. a na profilu BB' na Obr. 22. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu úhrnné gama aktivity na profilu AA' jsou uvedeny na Obr. 23. a na profilu BB' na Obr. 24. Grafy zobrazují výsledky 6 minutového měření. Číselné výsledky měření koncentrace uranu s dobou měření 10 s, 1 min. a 6 min. na profilu AA' jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 3 a Tabulka 4).



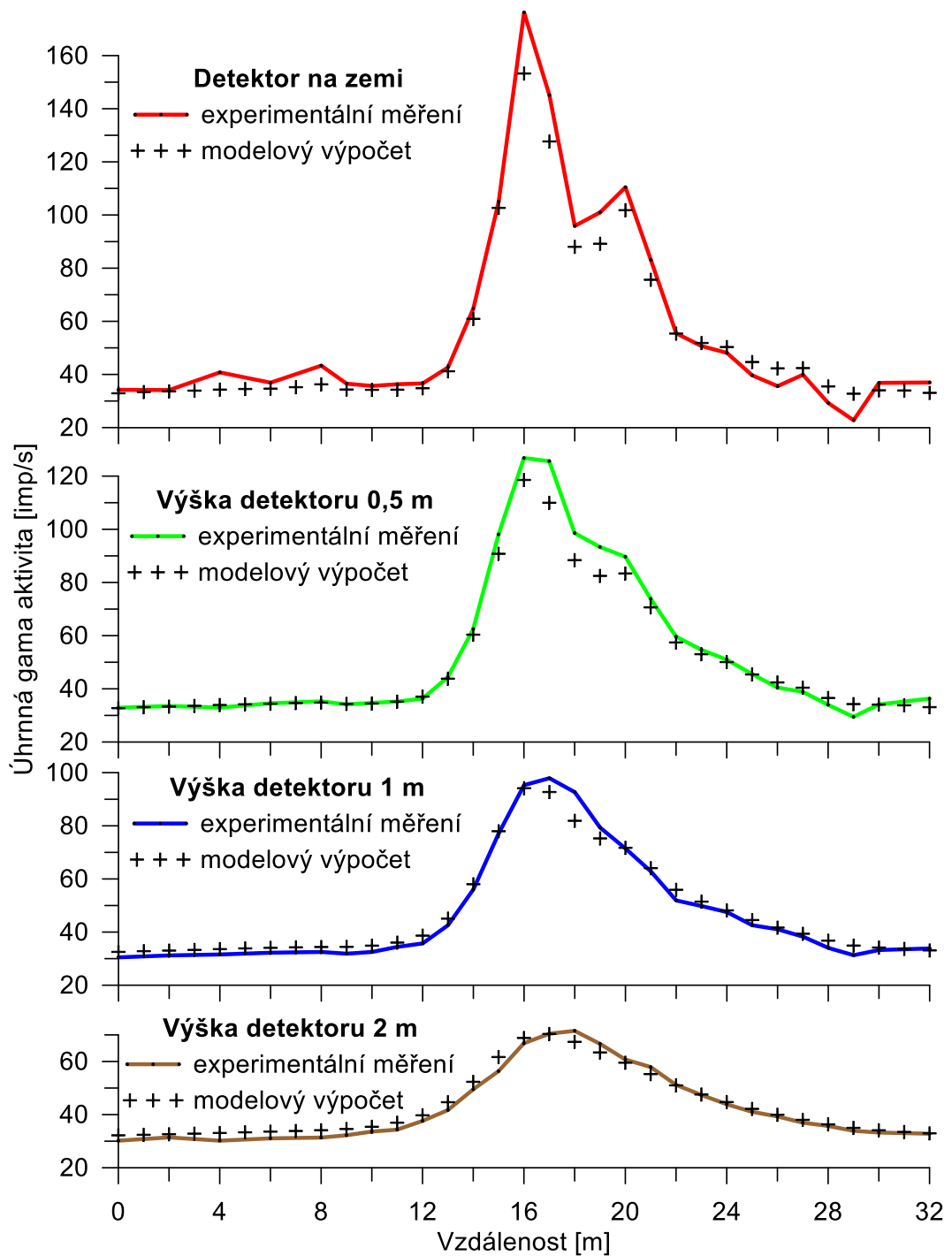
Obr. 21. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu koncentrace U na profilu AA' na lokalitě Dolní Černá Studnice.



Obr. 22. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu koncentrace U na profilu BB' na lokalitě Dolní Černá Studnice.



Obr. 23. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu úhrnné gama aktivity na profilu AA' na lokalitě Dolní Černá Studnice.



Obr. 24. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu úhrnné gama aktivity na profilu BB' na lokalitě Dolní Černá Studnice.

Tabulka 3. Hodnoty koncentrace uranu na profilu AA', lokalita Dolní Černá Studnice, detektor na zemi a ve výšce 0,5 m.

Koncentrace uranu na profilu AA'							
Doba měření:	Detektor na zemi				Detektor ve výšce 0,5 m		
	10 s	1 min	6 min		10 s	1 min	6 min
Vzdálenost X (m)	[ppm eU]	[ppm eU]	[ppm eU]		[ppm eU]	[ppm eU]	[ppm eU]
0	4.3	3.8	3.9		4.6	4.1	4.6
1	3.3	4.0	4.6		4.3	2.3	4.5
2	4.8	3.0	3.5		4.9	3.6	3.8
3	5.4	4.5	4.3		2.0	3.7	3.6
4	6.1	5.4	5.2		3.3	3.3	4.3
5	7.4	5.7	5.8		3.7	3.5	4.9
6	4.5	4.8	4.7		4.3	3.0	4.9
7	1.6	4.1	3.6		6.5	2.9	3.8
8	3.6	5.1	3.7		1.7	3.0	4.0
9	2.0	2.7	4.2		2.3	2.7	3.8
10	4.1	1.2	2.5		4.3	3.0	3.0
11	5.7	3.0	3.6		6.8	3.7	3.8
12	2.9	3.5	3.6		3.4	3.2	3.9
13	2.0	3.3	3.7		3.7	3.3	4.2
14	2.3	2.4	3.8		2.0	5.0	5.3
15	3.2	3.1	3.9		7.8	5.7	7.5
16	8.3	7.8	9.9		11.7	13.2	14.5
17	33.4	45.0	43.6		33.3	29.2	31.2
18	59.4	60.7	60.5		47.9	37.3	44.0
19	56.3	54.2	53.9		50.3	40.8	43.6
20	50.7	57.9	68.2		40.8	45.5	47.5
21	39.8	41.2	47.2		38.5	34.5	35.8
22	20.3	25.0	26.3		20.9	21.0	22.3
23	11.6	10.0	11.4		13.7	11.1	12.8
24	6.1	6.5	6.7		6.9	7.1	6.9
25	5.5	5.4	5.0		9.7	4.7	6.0
26	3.3	4.2	4.1		7.7	3.3	4.3
27	3.3	4.3	4.7		3.3	3.3	4.3
28	4.5	3.1	3.6		6.8	3.0	4.3
29	4.5	3.1	4.1		2.6	3.0	3.4
30	3.2	3.2	3.9		4.3	2.5	3.8
31	1.1	2.9	3.7		1.9	4.8	3.8
32	4.5	3.5	4.5		0.5	3.9	3.8
33	4.8	2.5	5.2		0.7	3.4	4.2
34	3.3	3.5	5.2		3.0	3.9	4.3
35	3.3	5.2	4.2		0.4	3.9	4.1
36	3.9	2.7	3.2		2.7	1.6	3.3
37	3.5	2.8	3.2		1.0	2.7	3.0
38	0.0	2.7	3.9		6.5	3.2	2.9
39	2.5	4.6	3.1		4.0	3.3	3.1
40	2.3	3.2	3.4		1.3	2.4	3.2

Tabulka 4. Hodnoty koncentrace uranu na profilu AA', lokalita Dolní Černá Studnice, detektor ve výšce 1 m a 2 m.

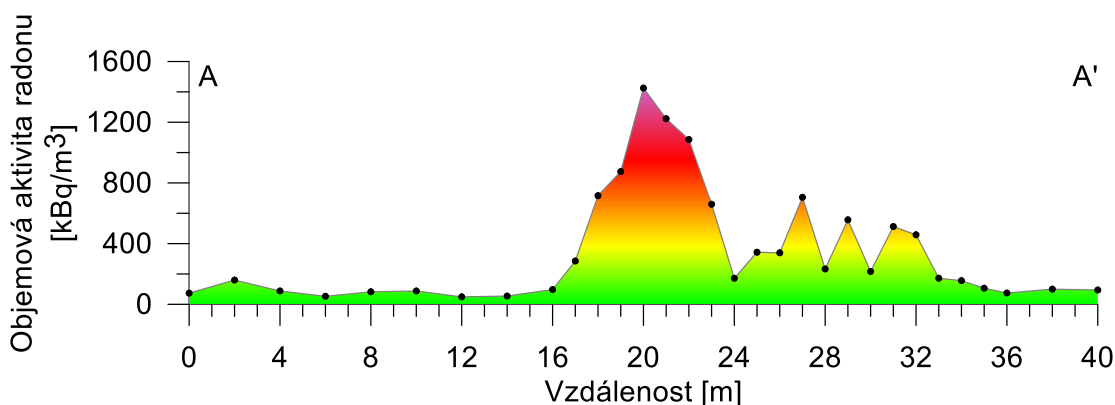
Koncentrace uranu na profilu AA'							
Doba měření	Detektor ve výšce 1 m				Detektor ve výšce 2 m		
	10 s	1 min	6 min		10 s	1 min	6 min
Vzdálenost X (m)	[ppm eU]	[ppm eU]	[ppm eU]		[ppm eU]	[ppm eU]	[ppm eU]
0	3.3	2.9	4.6		5.1	2.7	4.2
1	1.0	2.8			4.8	3.0	
2	1.7	3.1	4.2		3.5	3.3	4.1
3	1.4	4.2			3.7	1.9	
4	5.0	4.3	4.2		2.4	3.9	4.4
5	4.0	4.9			3.8	3.1	
6	3.4	2.8	4.7		2.8	3.9	4.5
7	3.3	3.6			2.1	3.7	
8	4.0	2.6	4.0		3.2	3.7	4.3
9	8.9	2.7	4.0		5.1	5.1	5.0
10	0.7	4.2	4.1		5.7	3.6	4.6
11	3.0	4.0	3.7		3.2	3.7	4.6
12	3.9	2.2	4.5		6.8	6.1	4.9
13	5.9	3.3	4.4		1.8	5.9	5.8
14	4.3	4.9	5.5		4.4	6.0	7.4
15	7.2	7.2	8.7		9.8	8.6	9.0
16	10.9	9.8	14.7		13.5	10.7	11.9
17	24.9	20.7	24.2		13.5	16.1	15.6
18	30.2	28.2	31.9		17.7	20.6	19.3
19	31.2	33.1	36.2		20.4	19.7	21.0
20	31.2	33.7	33.5		24.6	20.0	22.0
21	28.5	27.1	28.3		15.0	16.1	17.9
22	16.0	18.8	20.3		19.1	13.4	16.1
23	12.3	11.6	12.6		14.0	11.5	12.2
24	12.6	7.7	7.6		9.5	8.5	8.9
25	6.6	5.5	6.3		8.2	8.0	8.4
26	6.0	3.1	5.2		4.4	5.2	6.0
27	3.6	3.8	4.7		4.1	6.6	5.6
28	2.1	3.2	3.8		2.4	4.6	4.3
29	3.0	3.4	3.9		2.4	3.4	4.7
30	6.2	3.2	3.6		2.8	3.4	4.2
31	2.3	2.9	3.6		0.4	2.9	4.4
32	3.9	3.3	3.5		1.7	3.4	4.2
33	0.4	4.1			3.1	4.1	
34	3.7	4.5	3.4		5.1	3.9	4.2
35	8.6	2.9			8.5	4.0	
36	2.0	1.8	3.1		2.4	3.5	4.2
37	2.0	2.2			2.1	2.4	
38	3.6	4.3	3.4		1.2	3.3	3.7
39	6.6	1.7			2.8	3.9	
40	3.4	2.0	3.1		5.4	4.1	3.0

Z výsledků koncentrace uranu na profilu AA' s různou dobou měření a různou výškou detekce byly vyhodnoceny výběrové směrodatné odchylky normálního (tj. neanomálního) pole gama záření z úseků 0 – 10 m a 30 – 40 m, které jsou dostatečně daleko od uranové anomálie. Tabulka 5. ukazuje, jak výběrová směrodatná odchylka klesá s rostoucí dobou měření. Pokles výběrové směrodatné odchylky měření pro nízké výšky detekce nad povrchem ve srovnání s měřením na zemi je způsoben shlazením lokálních nehomogenit reliéfu a koncentrace U (IAEA, 2003).

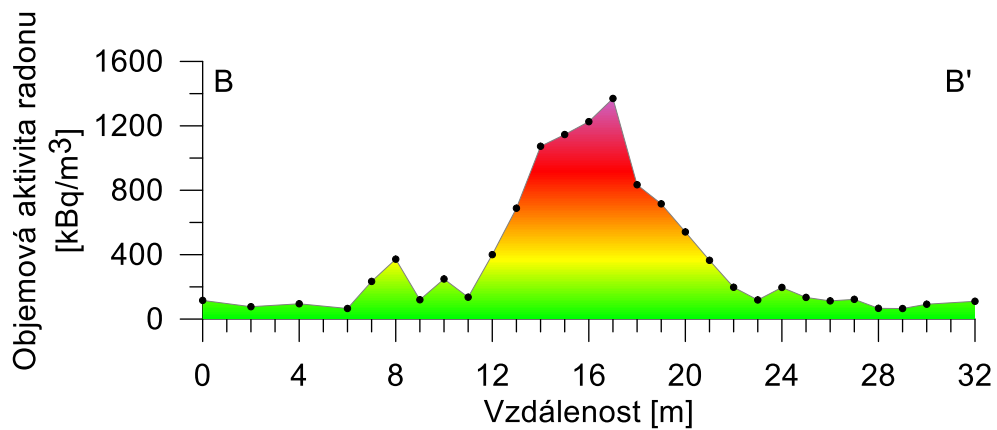
Tabulka 5. Výběrové směrodatné odchylky koncentrace U v normální (neanomální) části profilu AA' pro různé doby měření a různou výšku detekce.

Výběrová směrodatná odchylka [ppm eU]			
výška detektoru	doba měření		
	10 s	60 s	360 s
0 m	1.67	1.14	0.82
0.5 m	1.79	0.71	0.61
1 m	2.30	0.92	0.51
2 m	1.81	0.67	0.45

Výsledky měření objemové aktivity radonu v půdním vzduchu na profilech AA' a BB' jsou zobrazeny na Obr. 25 a Obr. 26. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu potvrzuje anomální koncentrace uranu v hornině. Maximální hodnoty objemové aktivity radonu souhlasí s polohou maxima anomálie gama záření a přesahují 1000 kBq/m³.



Obr. 25. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu na profilu AA', lokalita Dolní Černá Studnice.



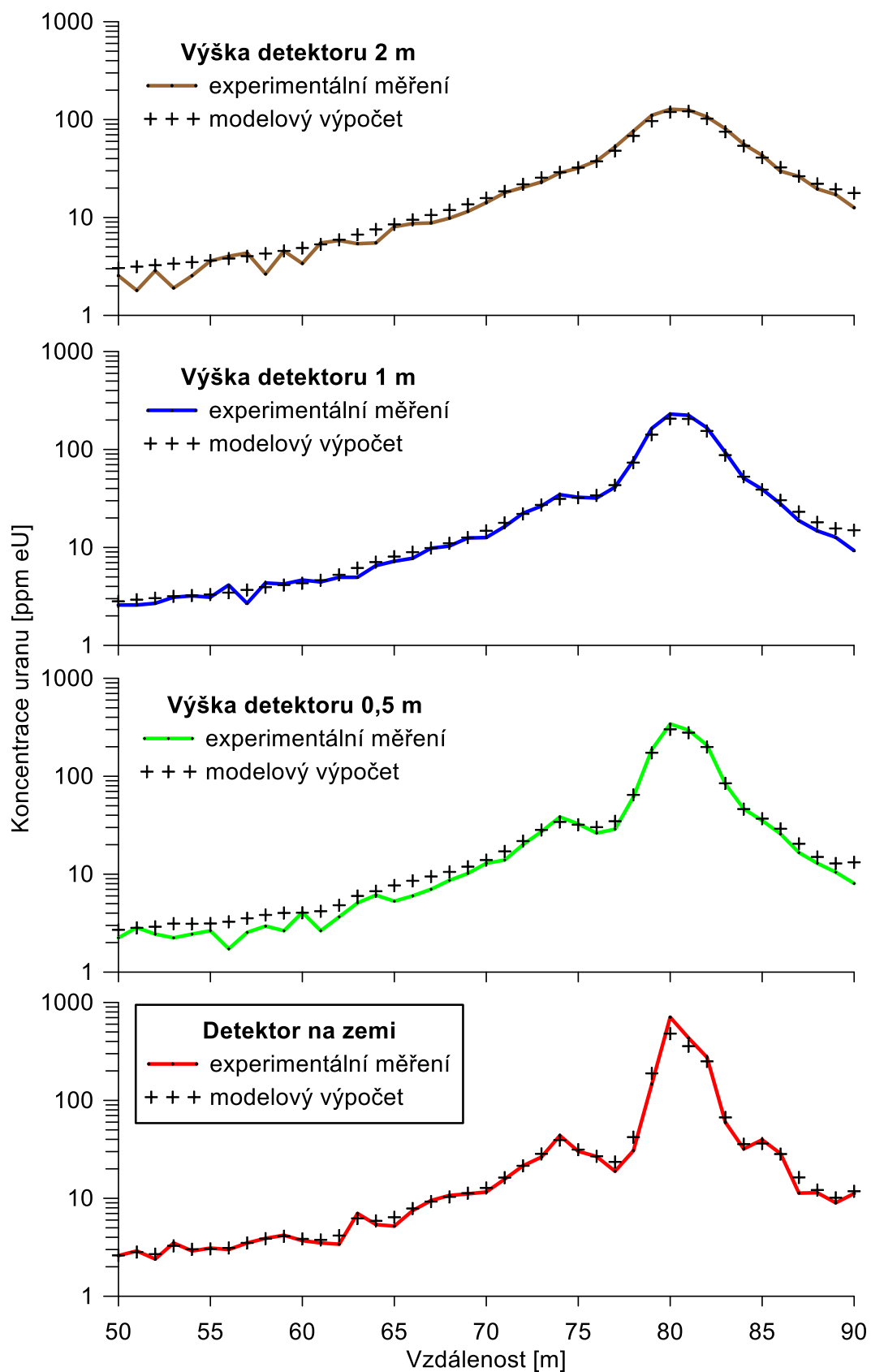
Obr. 26. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu na profilu BB', lokalita Dolní Černá Studnice.

5.3 Výsledky experimentů a modelových výpočtů na přírodní uranové mineralizaci Třebesko

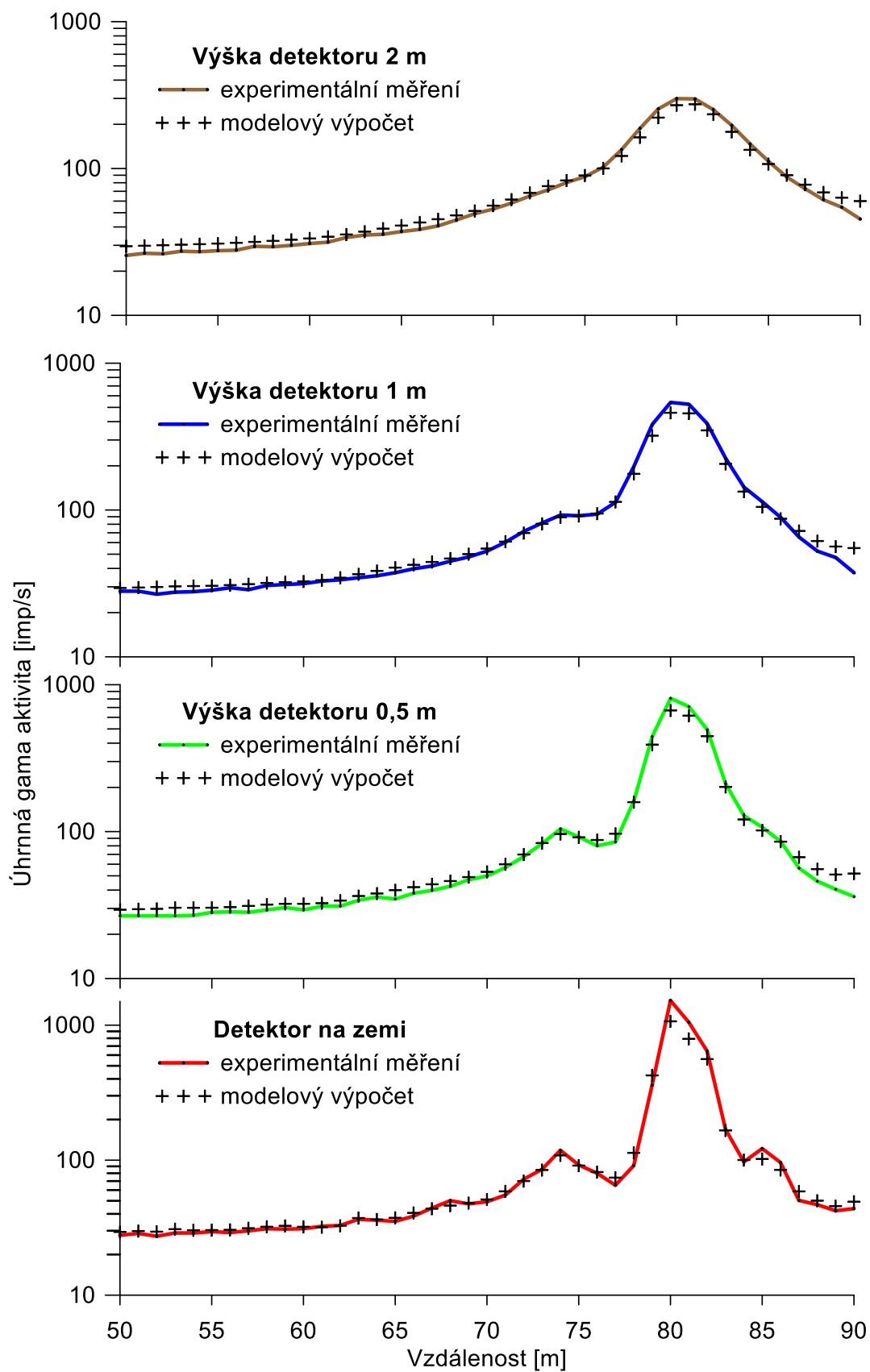
5.3.1 Výsledky pozemního průzkumu

Rozložení koncentrace U a situaci profilů na lokalitě Třebesko uvádí Obr. 10 a Obr. 11. Mapa izolinií koncentrace uranu (Obr. 11) vykresluje grid s hustotou 10×10 cm získaný interpolací pozemních gamaspektrometrických dat (viz kapitola 3.3), který současně definuje koncentraci uranu v modelové zdrojové desce (viz kapitola 4.3). Výsledky experimentálního gamaspektrometrického měření a modelového výpočtu koncentrace U do výšky 2 m na profilu 1 jsou uvedeny na Obr. 27. Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu úhrnné gama aktivity do výšky 2 m na profilu 1 jsou uvedeny na Obr. 28. Grafy zobrazují výsledky 2 min měření.

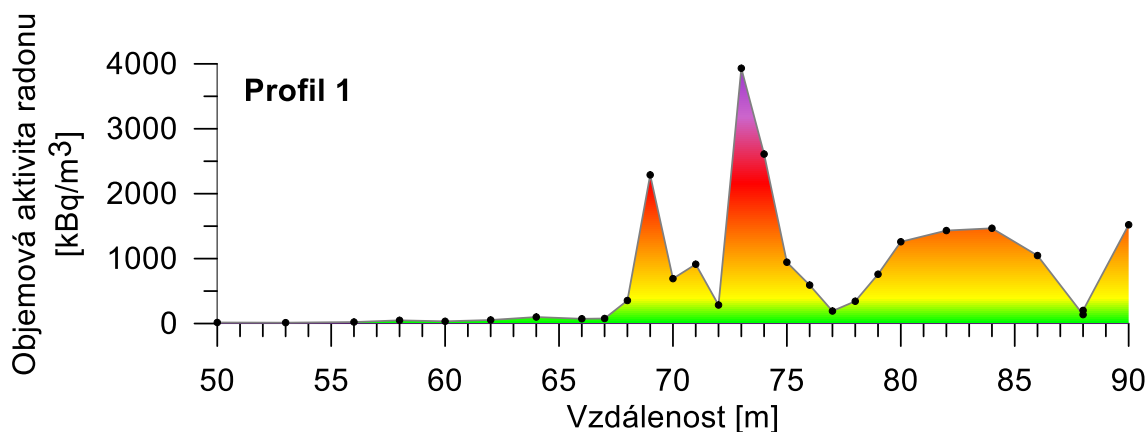
Výsledky měření objemové aktivity radonu v půdním vzduchu na profilu 1 jsou zobrazeny na Obr. 29. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu potvrzuje anomální koncentrace uranu v hornině. V úseku profilu s metráží 67 m až 90 m byly zjištěny vysoké hodnoty objemové aktivity radonu s maximem téměř 4000 kBq/m³.



Obr. 27. Výsledky pozemního experimentálního měření a modelového výpočtu koncentrace U pro výšku detektoru do výšky 2 m na profilu 1, lokalita Třebosko.



Obr. 28. Výsledky experimentálního gamaspektrometrického měření a modelového výpočtu úhrnné gama aktivity pro výšku detektoru do 2 m na profilu 1, lokalita Třebosko.

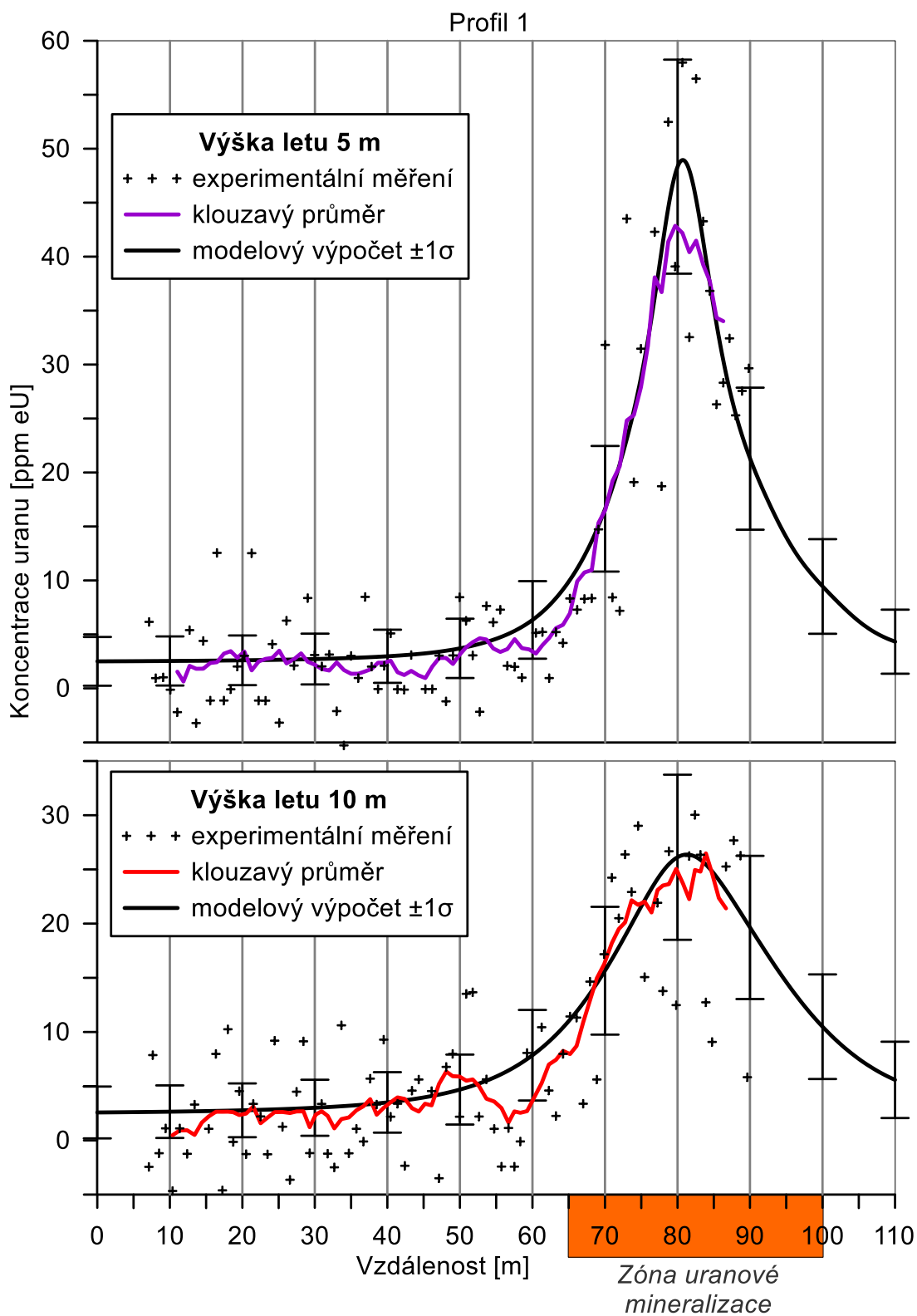


Obr. 29. Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu na profilu 1, lokalita Třebesko.

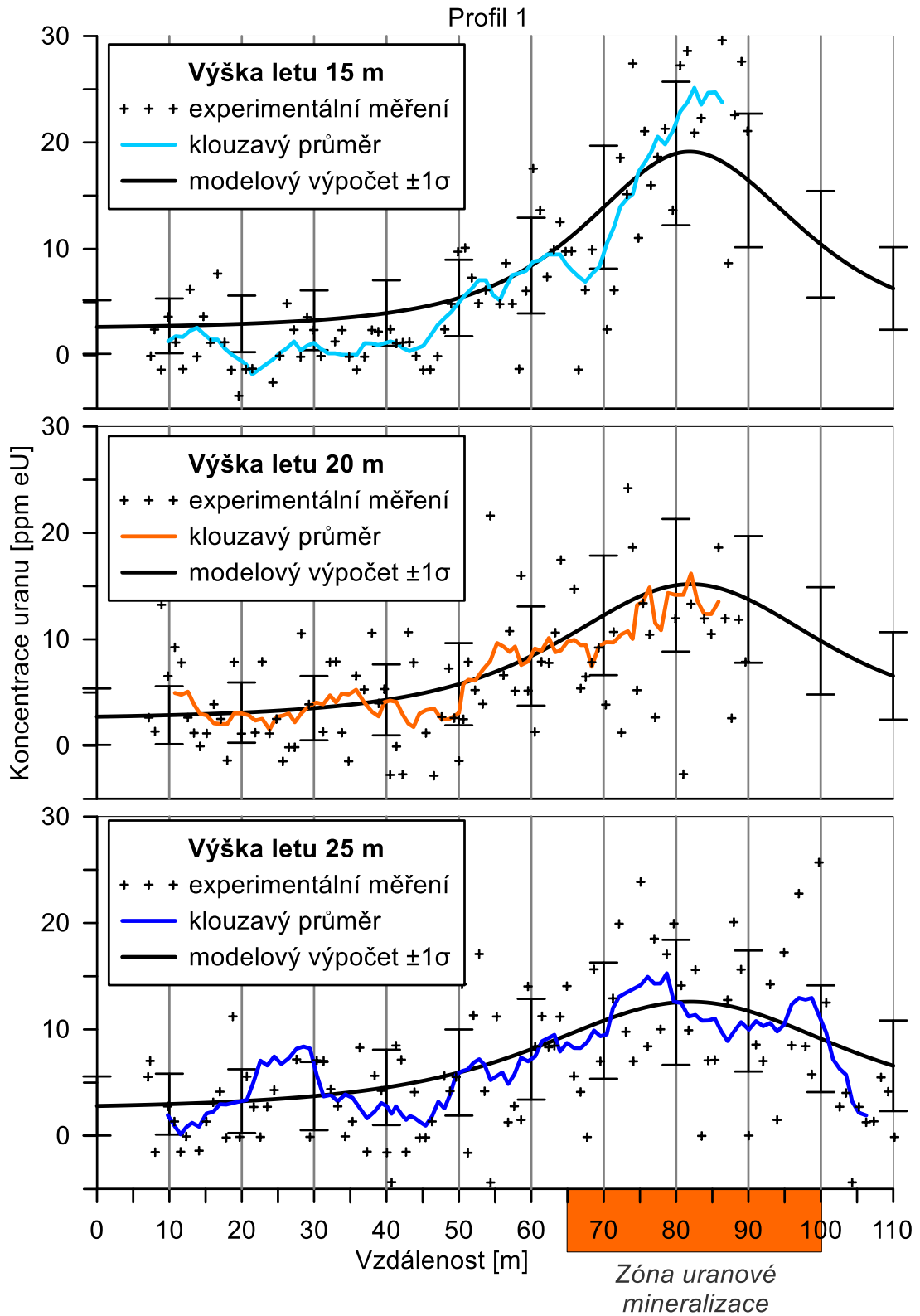
5.3.2 Výsledky mini-leteckého průzkumu

Mini-letecké měření radioaktivity hornin bylo provedeno na lokalitě Třebesko na profilech 1 až 3 ve výškách 5 m až 40 m. Výsledky experimentálního mini-leteckého gamaspektrometrického měření a modelového výpočtu koncentrace uranu jsou zobrazeny na Obr. 30 až Obr. 38. Grafy zobrazují stanovené koncentrace uranu z jednosekundových skenů spekter leteckého měření a jejich devítibodový klouzavý průměr. Výsledky modelového výpočtu koncentrace U jsou doplněny intervalem spolehlivosti v šířce jedné směrodatné odchylky. Směrodatná odchylka σ koncentrace U je odvozena z odpovídajícího počtu impulzů podle vztahu (4). Interval spolehlivosti s šířkou 1σ zahrnuje 68,3 % hodnot, které bychom teoreticky detekovali při opakovaném měření neměnného zdroje radioaktivity s přístrojem s citlivostí v U okně odpovídající přístroji D230A a s dobou měření 1 s. Některé hodnoty vycházejí v důsledku odečtení pozadí a kalibračního postupu záporné, což je v souladu se statistickým charakterem radiometrických dat (Grant, 1998).

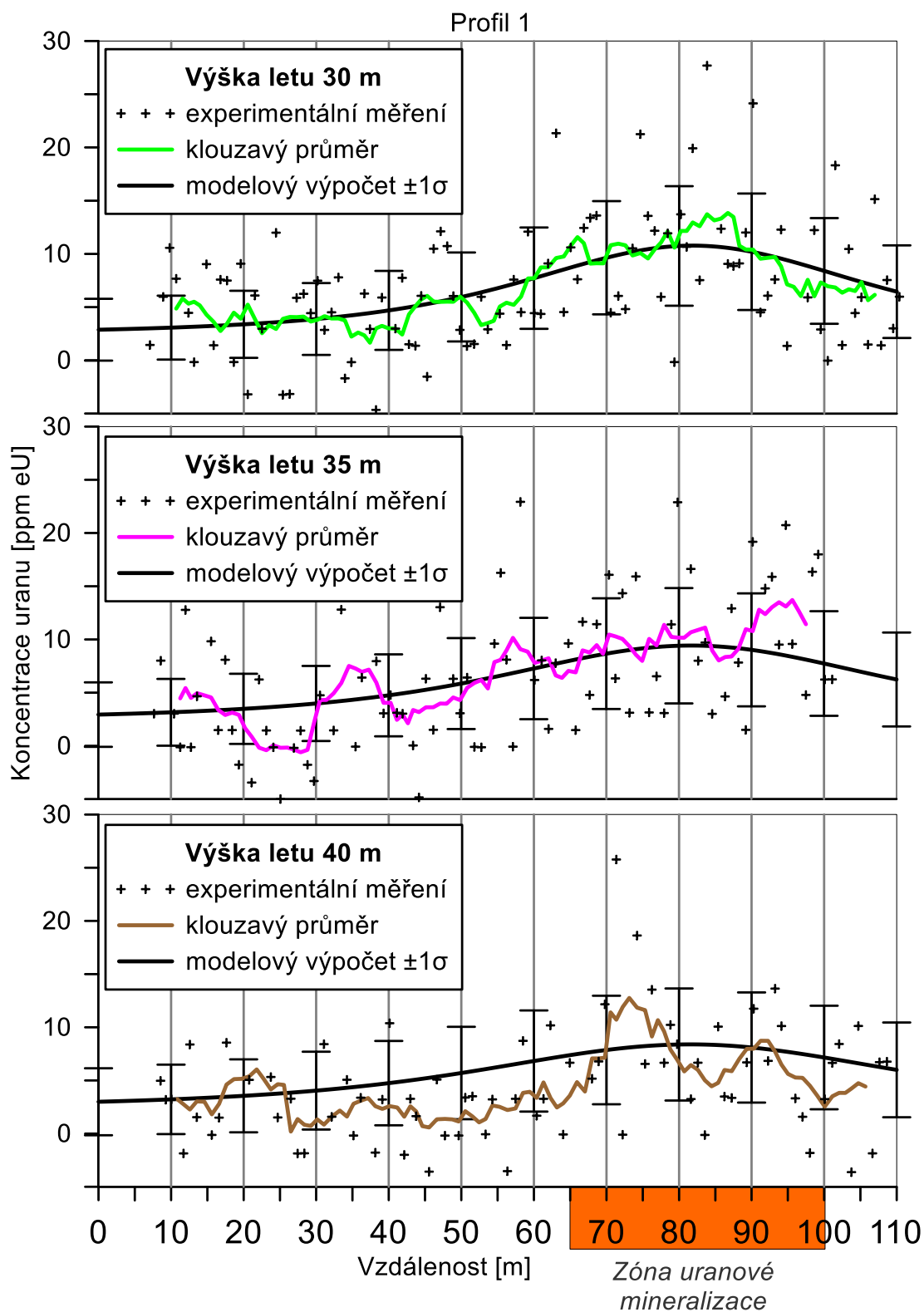
Výsledky experimentálního měření a modelového výpočtu úhrnné gama aktivity jsou zobrazeny na Obr. 39 až Obr. 44. Grafy zobrazují experimentální četnosti impulzů úhrnné gama aktivity vypočítané z jednosekundových spekter gama záření. Výsledky modelového výpočtu úhrnné gama aktivity jsou doplněny intervalem spolehlivosti v šířce $\pm 3\sigma$. Střední kvadratická chyba četnosti impulzů je odvozena podle vztahu (5). Interval spolehlivosti s šířkou $\pm 3\sigma$ zahrnuje 99,7 % hodnot, které bychom teoreticky detekovali při opakovaném měření s přístrojem s citlivostí v okně úhrnné gama aktivity odpovídající přístroji D230A a s dobou měření 1 s.



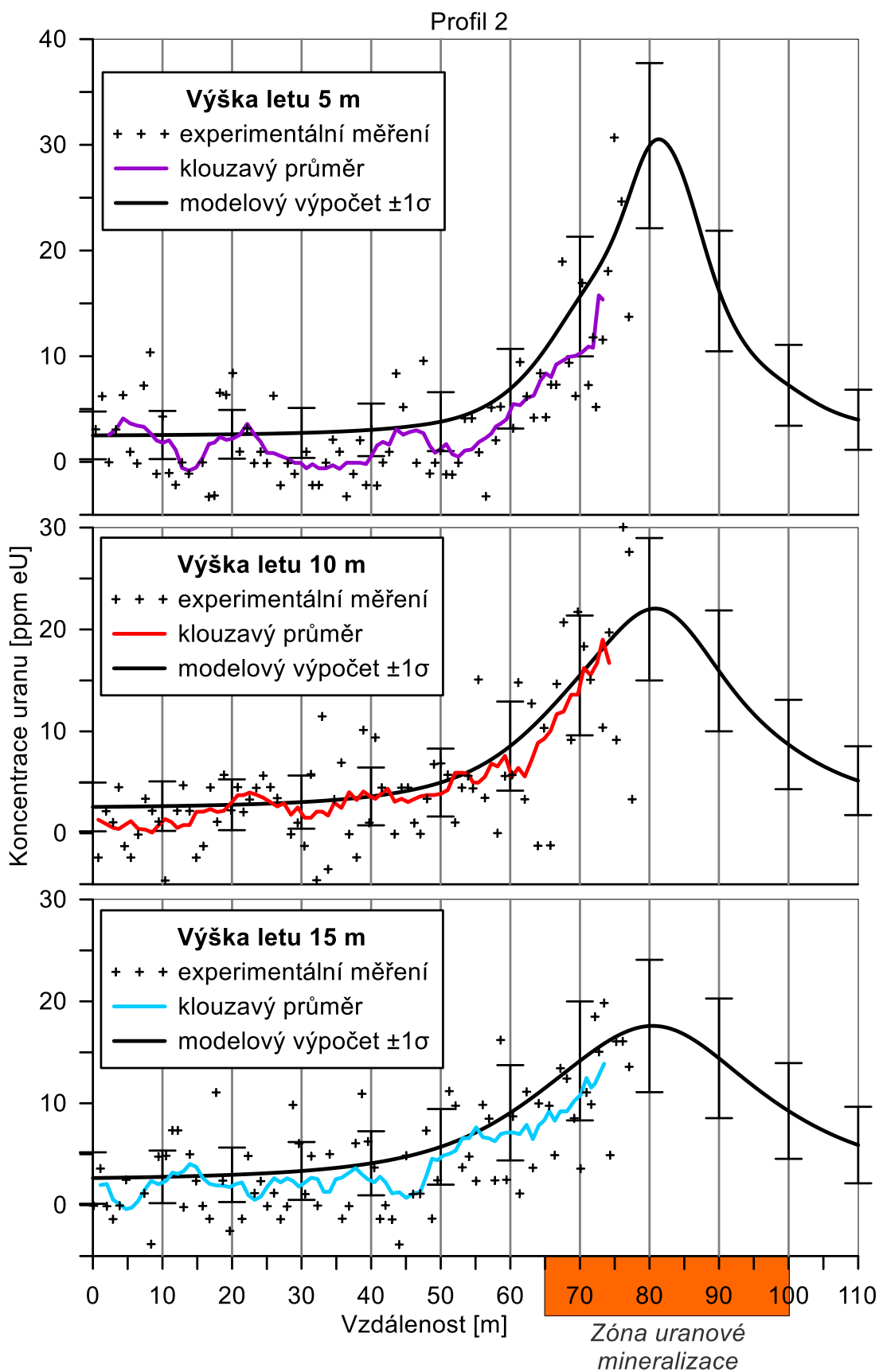
Obr. 30. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 1 ve výšce 5 a 10 m, lokalita Třebско.



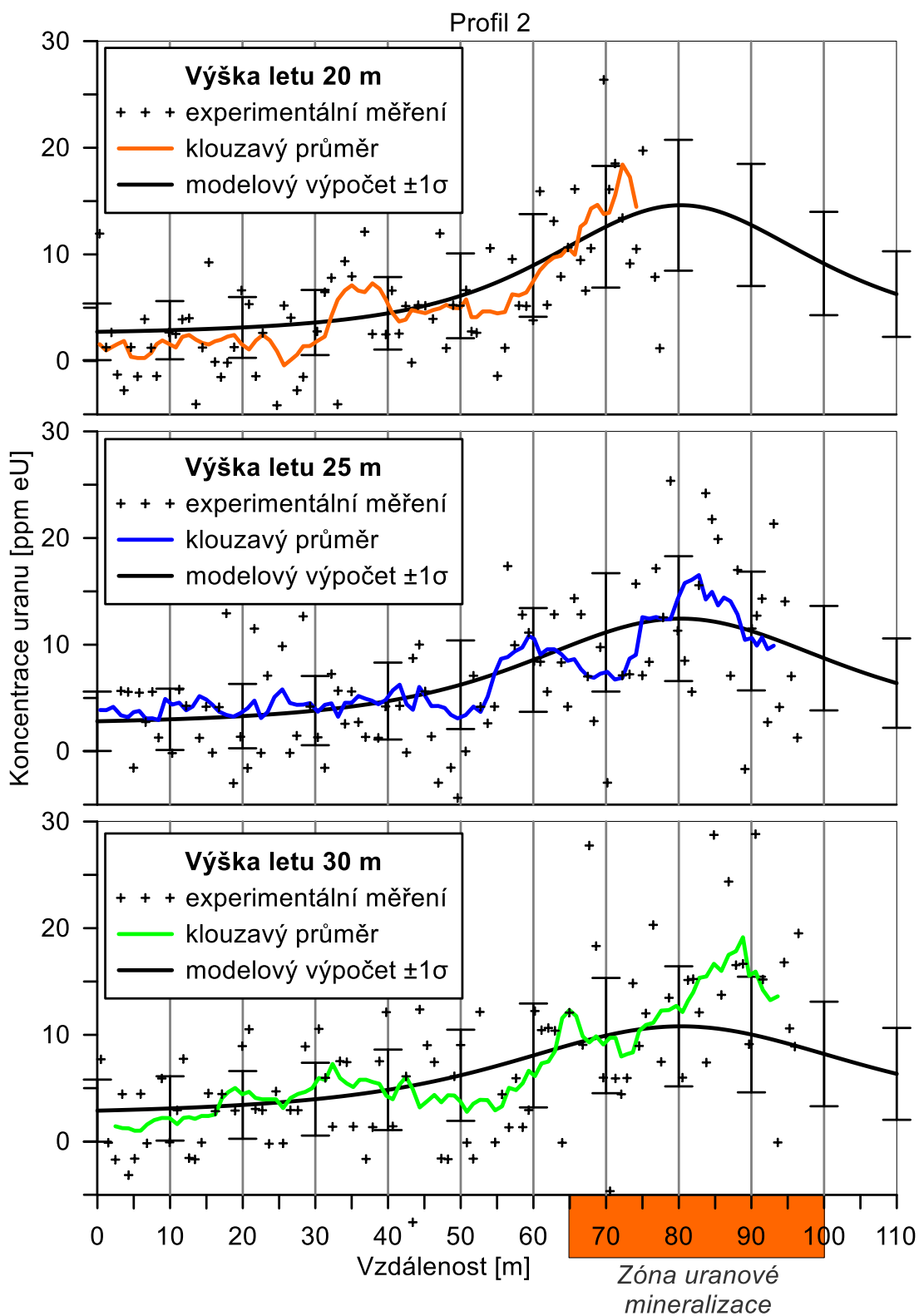
Obr. 31. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 1 ve výšce 15, 20 a 25 m, lokalita Třebosko.



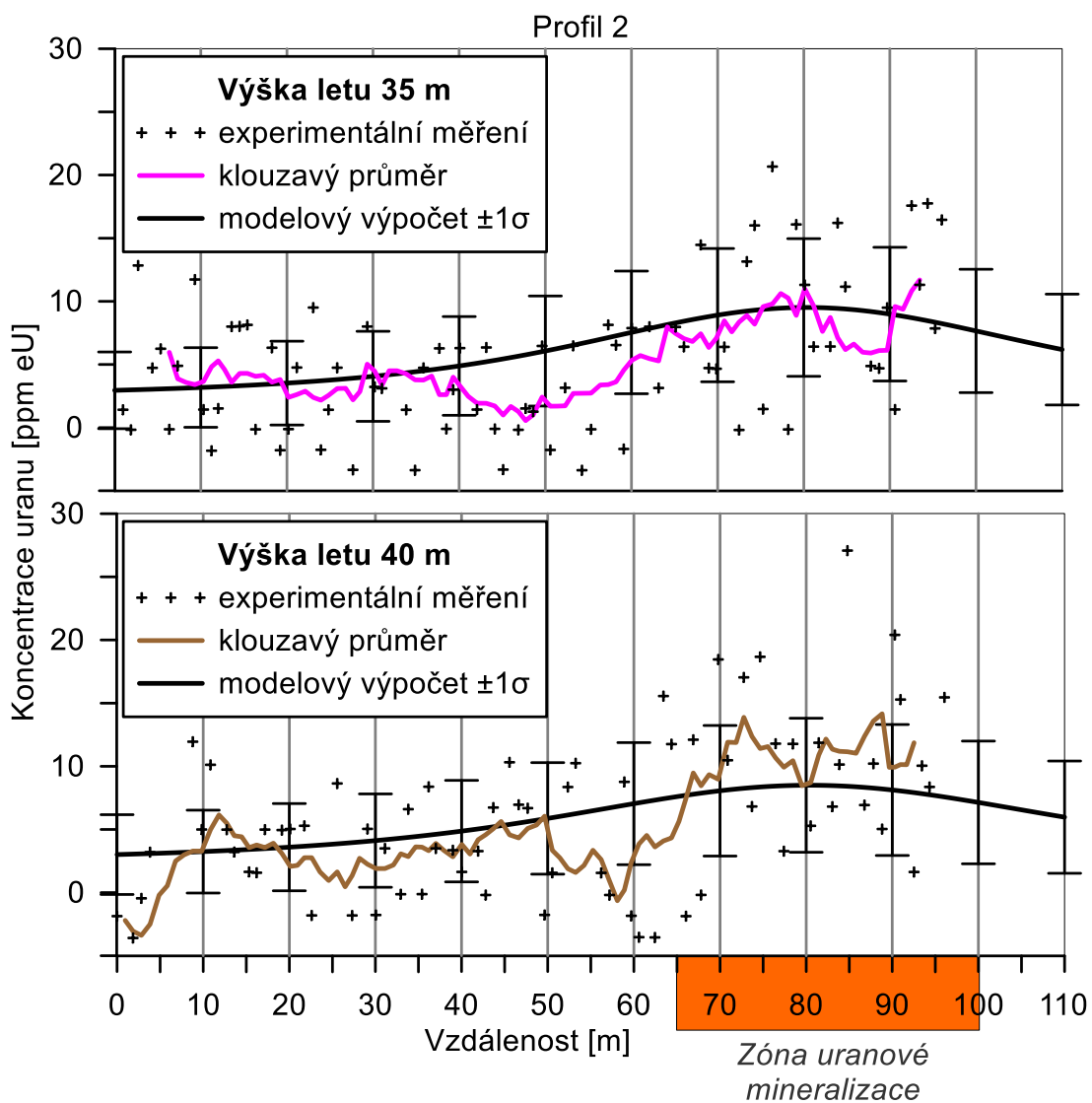
Obr. 32. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 1 ve výšce 30, 35 a 40 m, lokalita Třebsko.



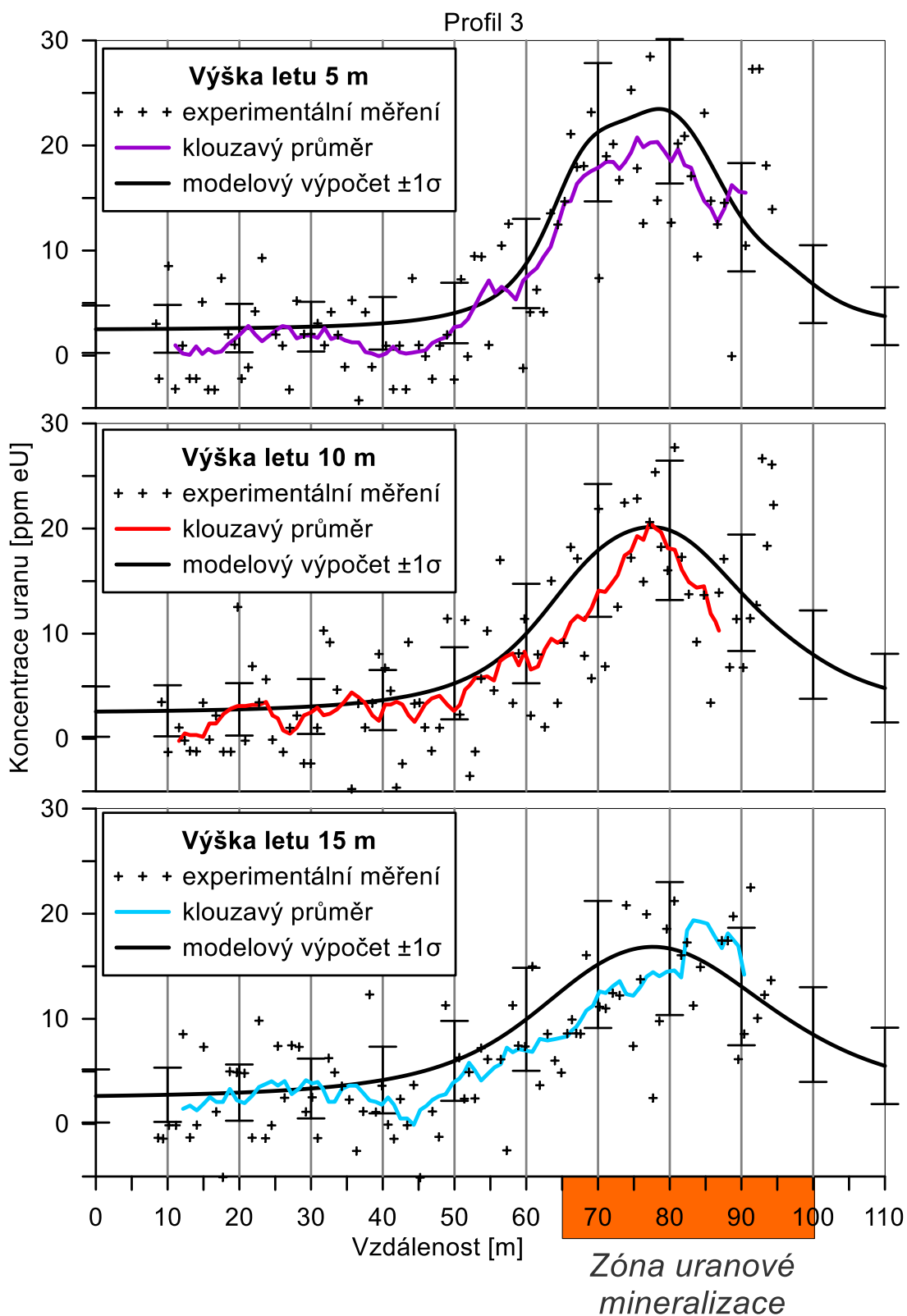
Obr. 33. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 2 ve výšce 5, 10 a 15 m, lokalita Třebosko.



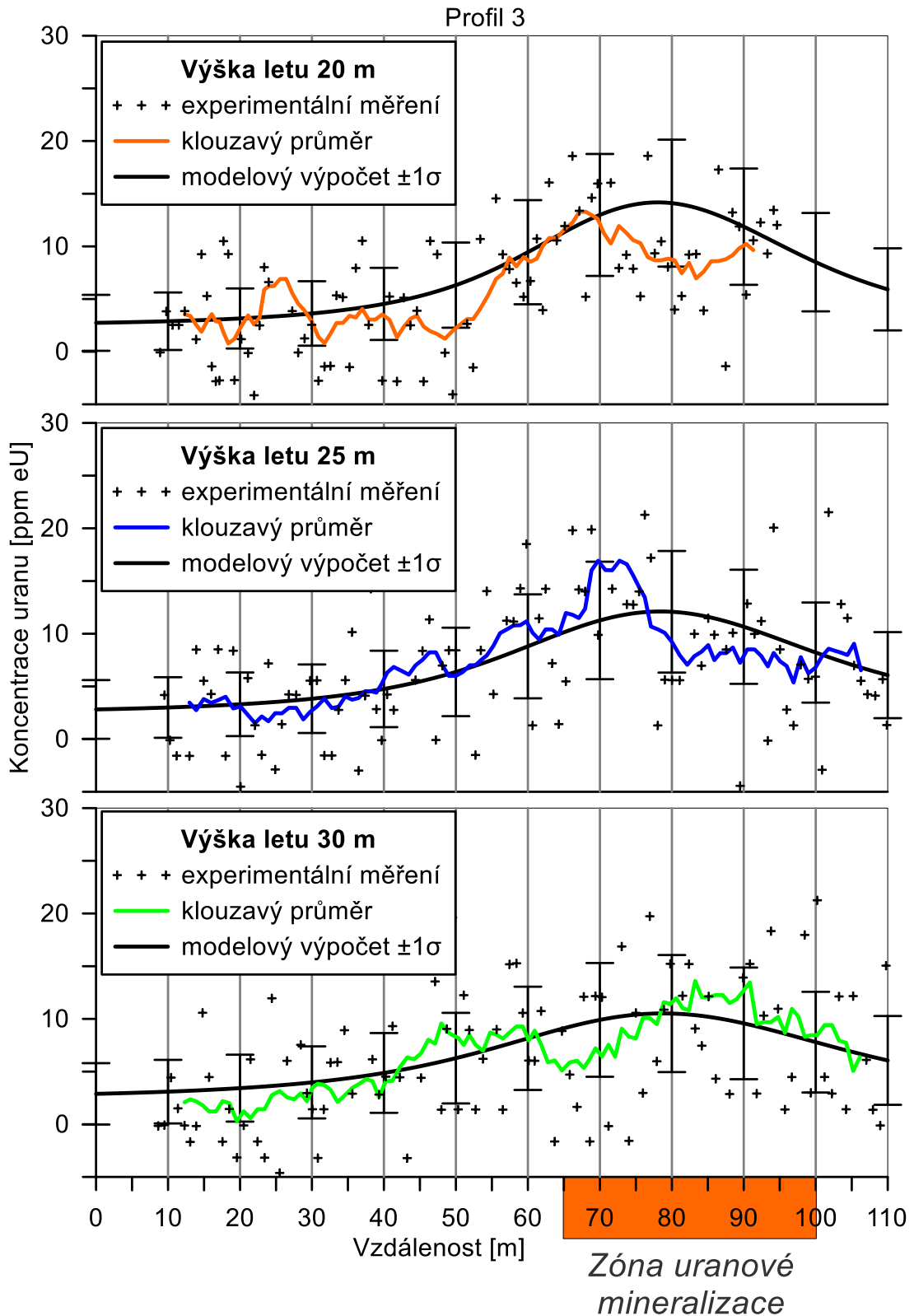
Obr. 34. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 2 ve výšce 20, 25 a 30 m, lokalita Třebско.



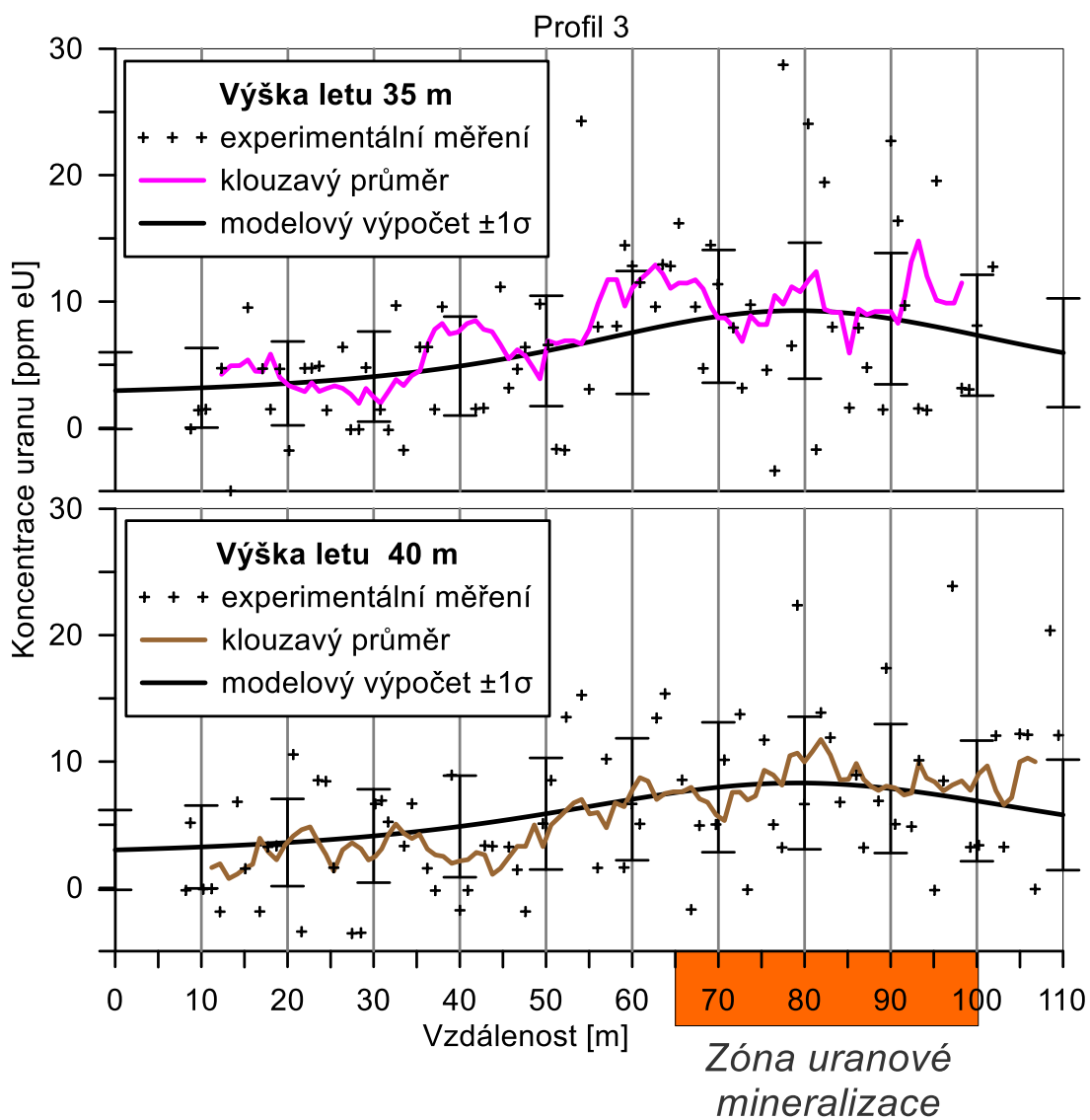
Obr. 35. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 2 ve výšce 35 a 40 m, lokalita Třebско.



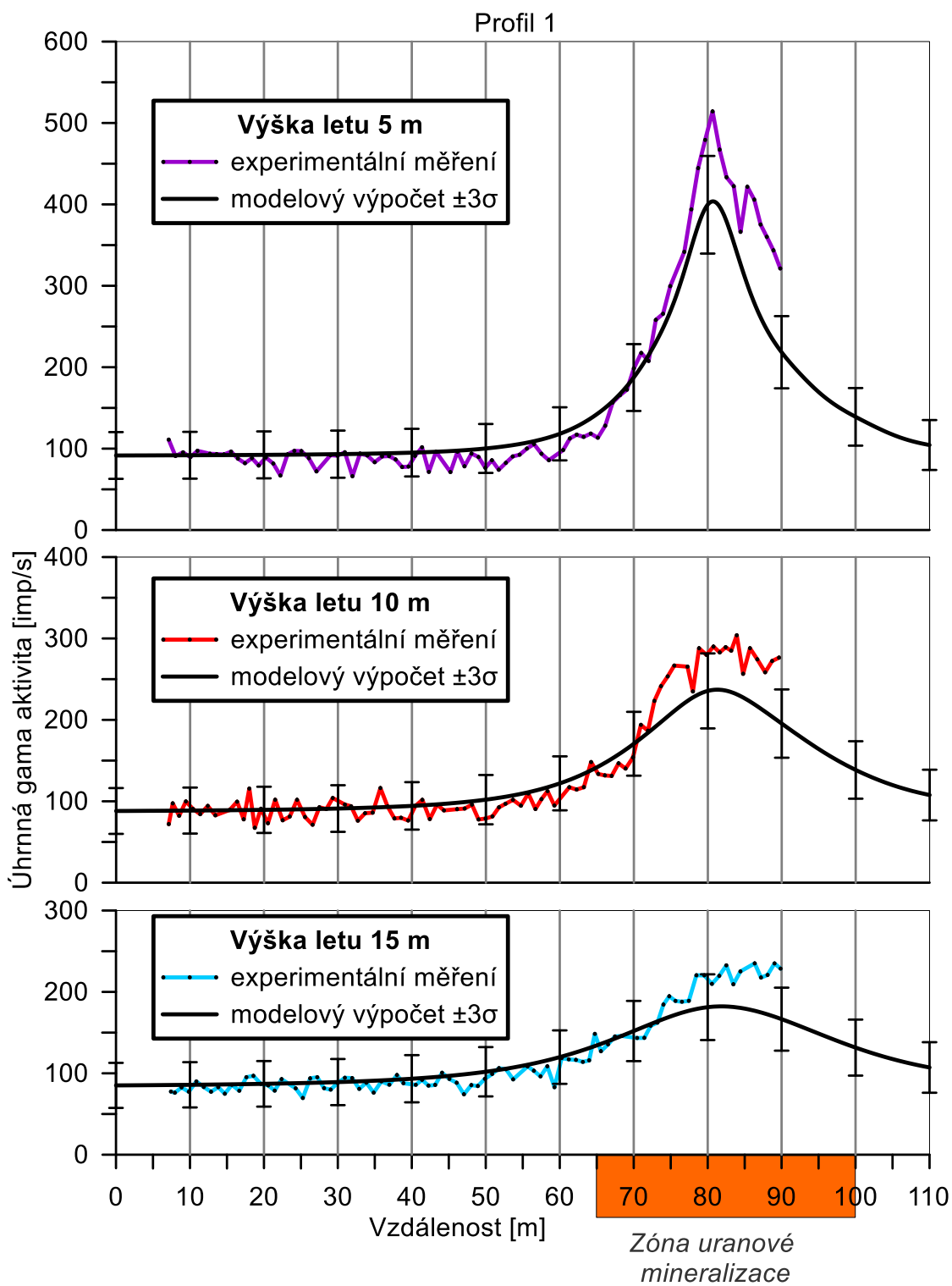
Obr. 36. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 3 ve výšce 5, 10 a 15 m, lokalita Třebско.



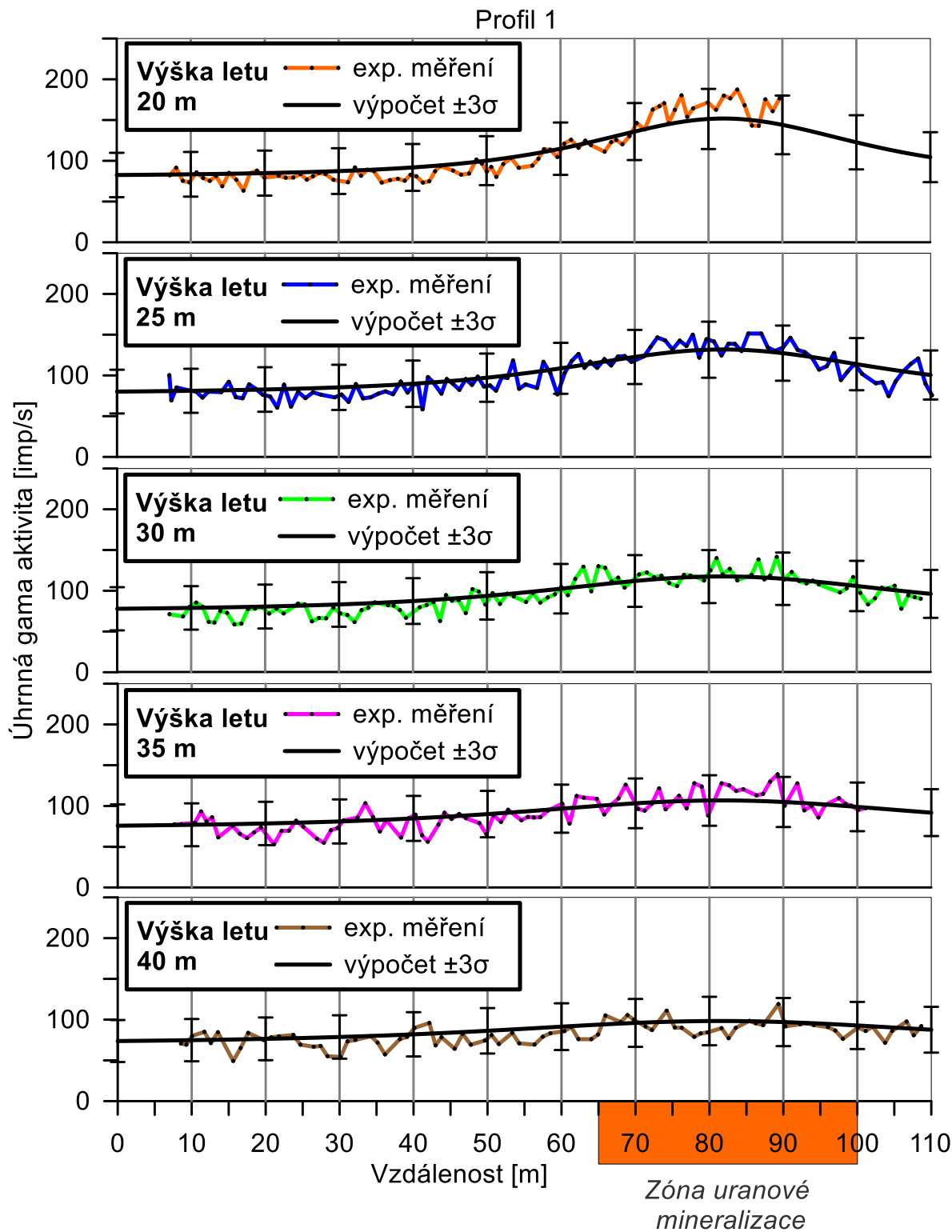
Obr. 37. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 3 ve výšce 20, 25 a 30 m, lokalita Třebско.



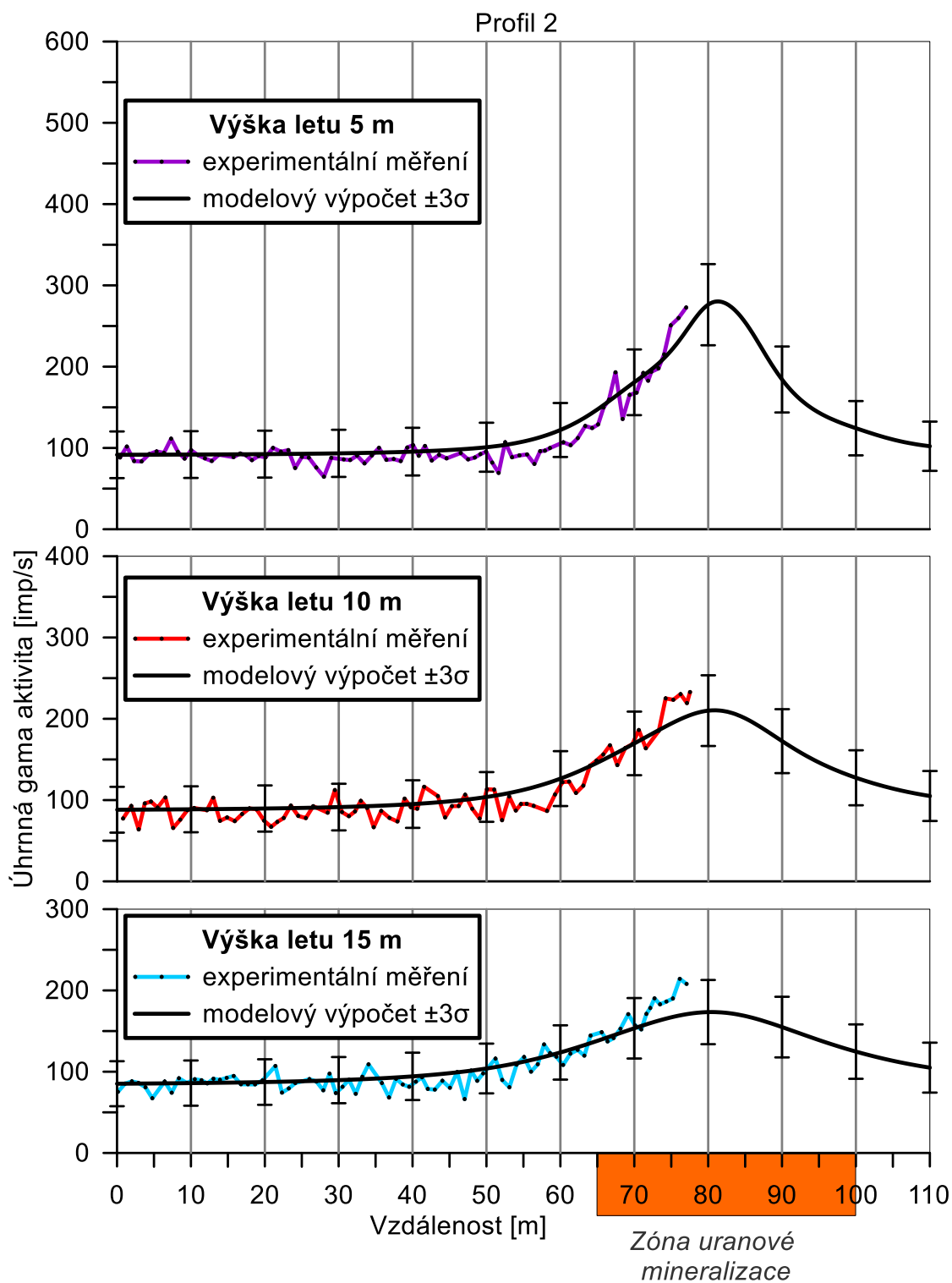
Obr. 38. Koncentrace uranu stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 3 ve výšce 35 a 40 m, lokalita Třebско.



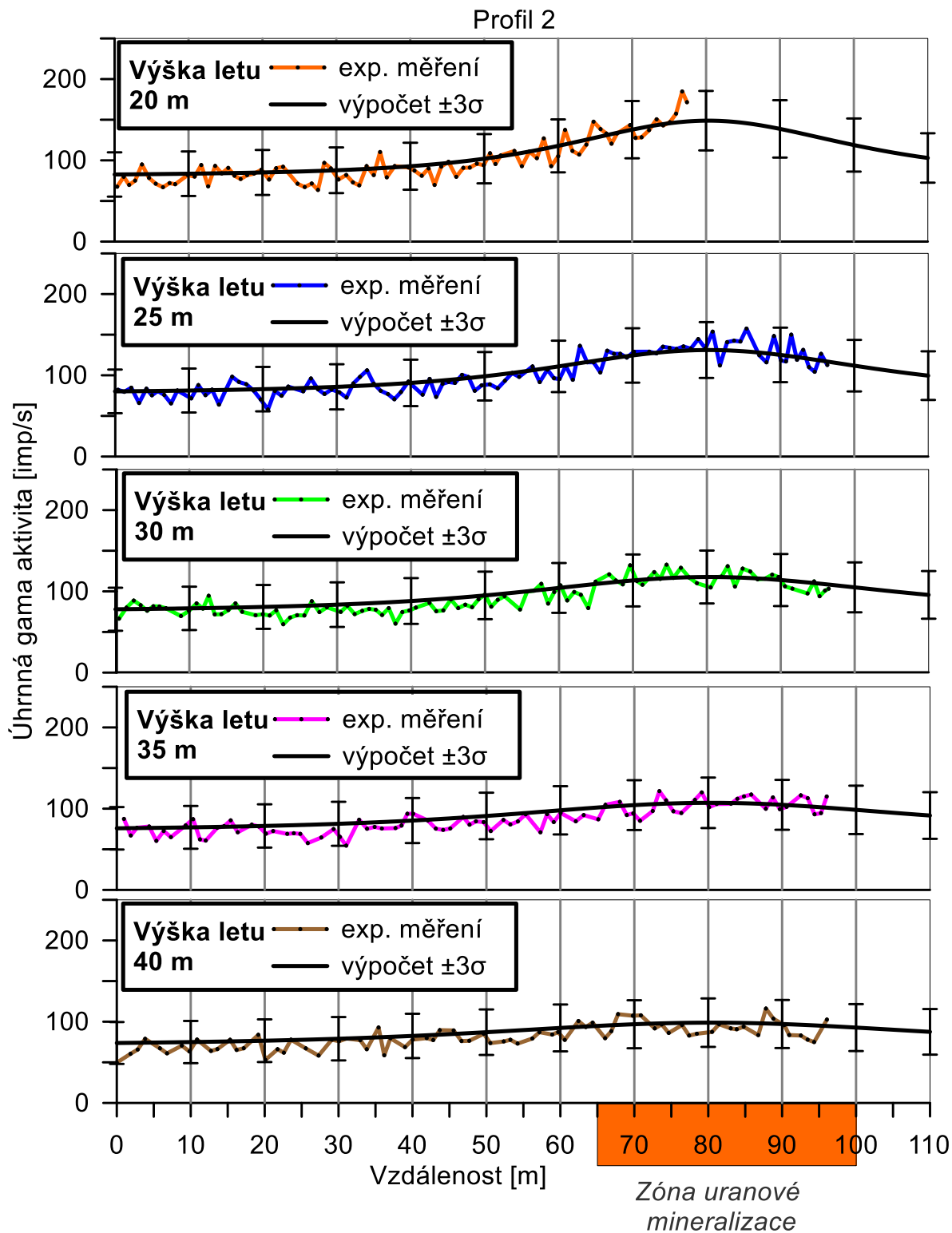
Obr. 39. Úhrnná gama aktivita stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 1 ve výšce 5 m, 10 m a 15 m, lokalita Třebosko.



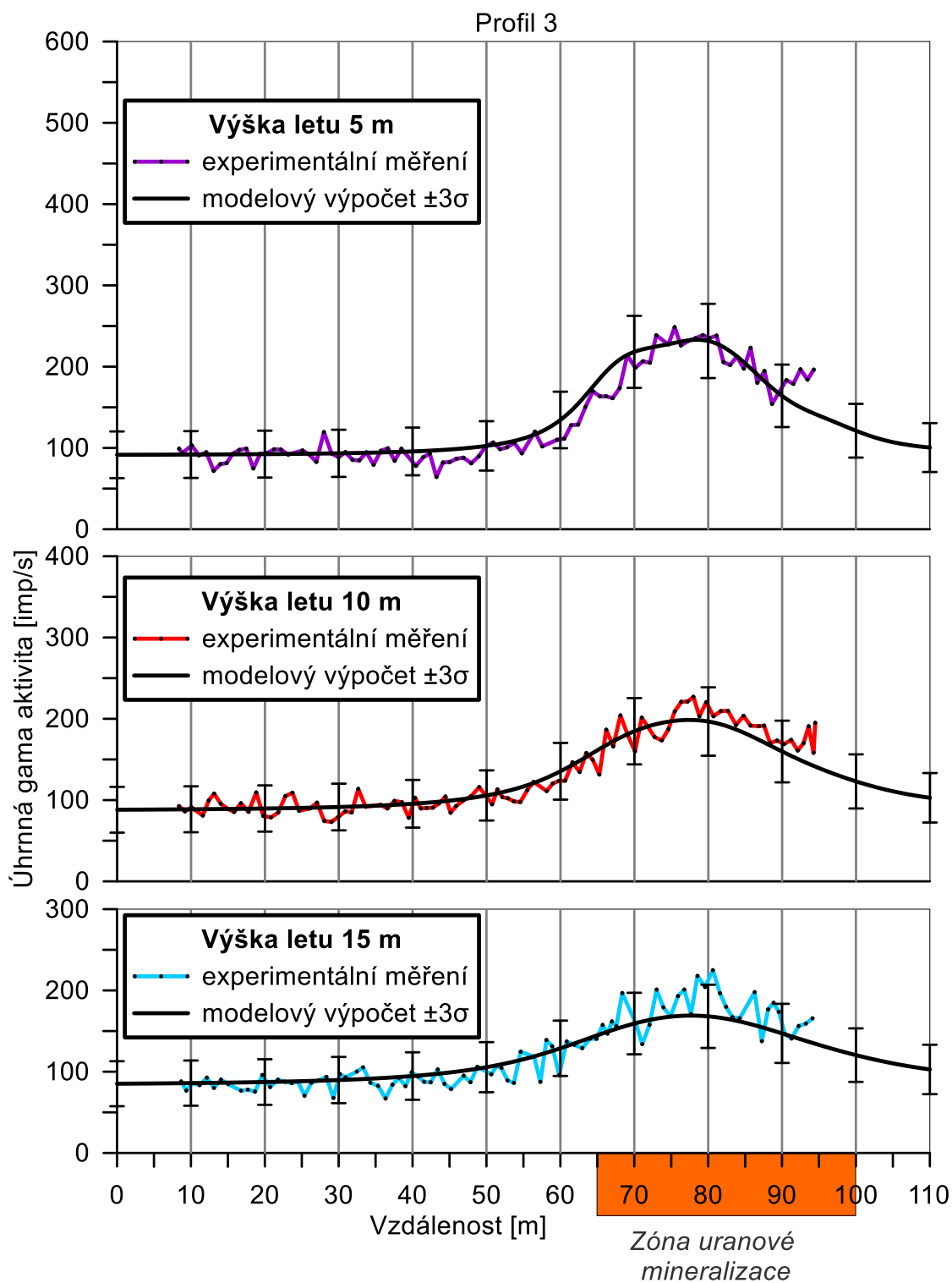
Obr. 40. Úhrnná gama aktivita stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 1 ve výšce 20 až 40 m, lokalita Třebso.



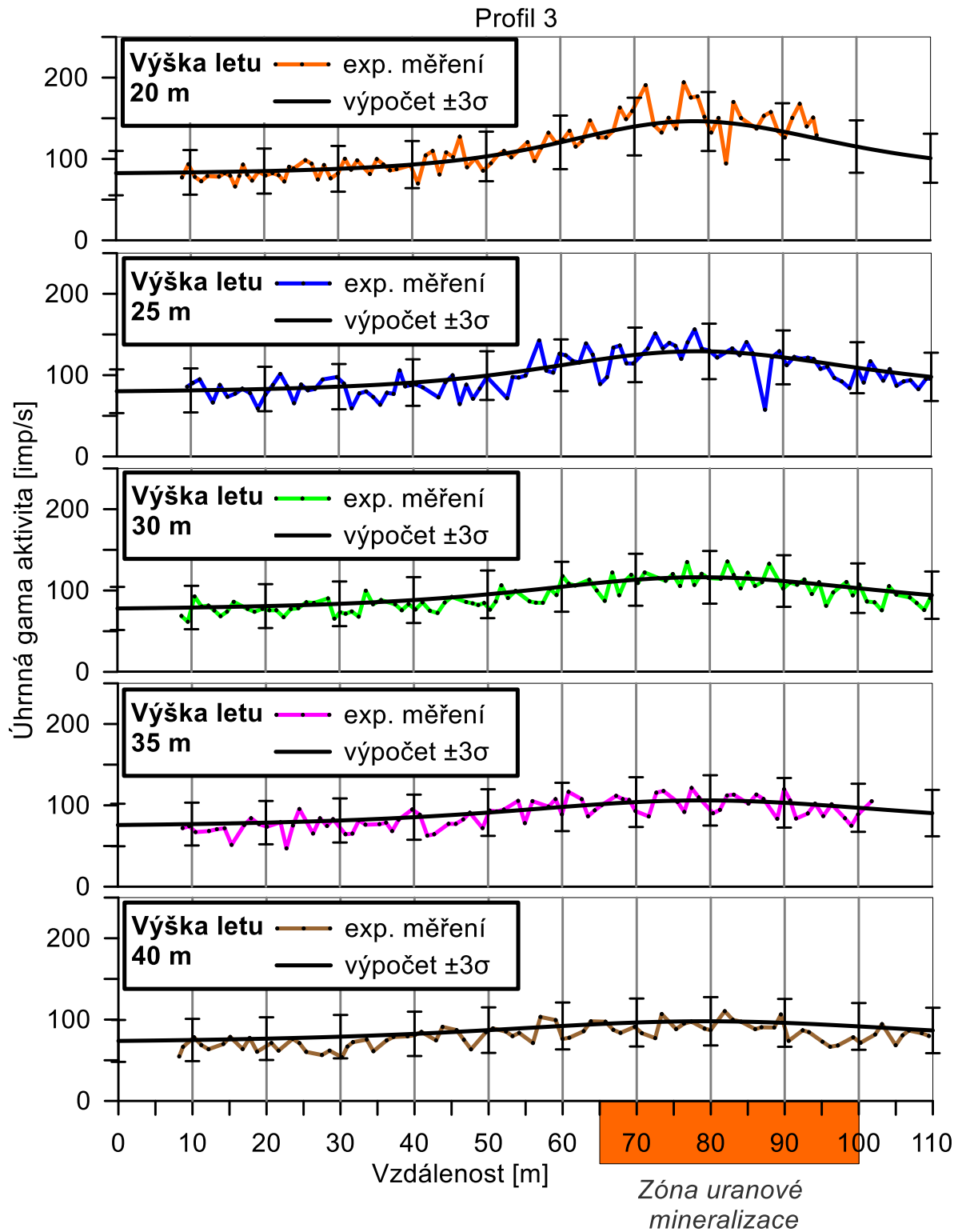
Obr. 41. Úhrnná gama aktivita stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 2 ve výšce 5 až 15 m, lokalita Třebosko.



Obr. 42. Úhrnná gama aktivita stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 2 ve výšce 20 až 40 m, lokalita Třebско.



Obr. 43. Úhrnná gama aktivita stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 3 ve výšce 5 až 15 m, lokalita Třebosko.



Obr. 44. Úhrnná gama aktivita stanovená mini-leteckým gamaspektrometrickým měřením a modelovým výpočtem na profilu 3 ve výšce 20 až 40 m, lokalita Třebso.

5.4 Posouzení shody experimentálních a modelových dat

Pro posouzení souhlasu experimentálních a modelových dat byl použit interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ kolem modelových hodnot. Směrodatná odchylka σ byla stanovena podle vztahu (4) pro modelovou koncentraci uranu, danou citlivost přístroje a dobu měření. Takto stanovené směrodatné odchylky popisují fluktuace radioaktivity. Výběrové směrodatné odchylky s stanovené z experimentálních profilových dat zahrnují další zdroje chyb a jsou o něco vyšší.

5.4.1 Kalibrační standard U

Grafické zobrazení výsledků měření radioaktivity na kalibračním standardu uranu uvádějí Obr. 19 a Obr. 20. Doba měření na jednom bodě byla 5 min, měření má tedy vysokou přesnost. Interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ se pro neanomální oblast pohybuje v rozmezí $\pm 0,7$ ppm eU a pro měření nad standardem U až $\pm 1,6$ ppm eU pro maximální hodnoty koncentrace U. Modelový výpočet a experimentální data jsou v souladu v rámci intervalu spolehlivosti, pouze ojedinělé body se mírně odchyľují. Snížená naměřená koncentrace uranu na zemi v metráži 1,5 m je pravděpodobně způsobena přítomností 5 mm silného ocelového pláště kalibračního standardu a jeho stínícím efektem.

5.4.2 Lokalita Dolní Černá Studnice

Úhrnná gama aktivita na profilu AA' a BB'

Grafické zobrazení situace profilů AA', BB' na lokalitě Dolní Černá Studnice uvádí Obr. 8, výsledky měření radioaktivity a modelových výpočtů radioaktivity uvádějí Obr. 21 až Obr. 24. Doba měření na jednom bodě byla 6 min, měření má tedy vysokou přesnost. Interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ kolem modelových hodnot odpovídá šíři mezi $\pm 0,9$ imp/s a ± 2 imp/s. Pro oba kolmé profily platí, že pro výšky měření na zemi a ve výšce 0,5 m je modelový výpočet oproti experimentálním datům v oblasti maxima mírně podhodnocen. Pro měření na zemi dosahuje modelový výpočet v maximu anomálie gama záření přibližně 90 % měřené hodnoty. Pro měření ve výšce 0,5 m dosahuje modelový výpočet v maximu anomálie přibližně 94 % měřené hodnoty. Pro měření ve výškách 1 m a 2 m je rozdíl mezi modelovým výpočtem a experimentálními daty do 3 %.

Koncentrace uranu na profilu AA' a BB'

Interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ kolem modelových hodnot má šířku mezi ± 1 ppm eU pro neanomální hodnoty a $\pm 4,4$ ppm eU pro maximální hodnoty.

Pro srovnání výběrová směrodatná odchylka experimentálních dat z neanomální části profilů je uvedena v tabulce (Tabulka 5). Pro šestiminutové měření uvádí Tabulka 5 pro výšku detekce 2 m výběrovou směrodatnou odchylku 0,45 ppm eU, interval spolehlivosti $\pm 3s$ odpovídá $\pm 1,35$ ppm eU.

Pro oba (navzájem kolmé) profily AA' a BB' platí, že pro výšky měření na zemi a ve výšce 0,5 m je modelový výpočet mírně podhodnocen v oblasti maxim oproti experimentálním datům. Pro měření na zemi dosahuje modelový výpočet v maximu anomálie koncentrace uranu přibližně 85 až 88 % měřené hodnoty. Pro měření ve výšce 0,5 m dosahuje modelový výpočet v maximu anomálie přibližně 93 % měřené hodnoty. Pro měření ve výškách 1 m a 2 m je rozdíl mezi modelovým výpočtem a experimentálními daty do 3 %.

5.4.3 Lokalita Třebsko

Pozemní průzkum, úhrnná gama aktivita

Grafické zobrazení situace profilů 1, 2, 3 na lokalitě Třebsko ukazuje obr. 10, výsledky měření radioaktivity a modelových výpočtů radioaktivity uvádějí Obr. 27 až Obr. 44. Pozemní statické měření realizované na profilu 1 s dobou měření 2 min má oproti leteckému dynamickému měření nízkou směrodatnou odchylku. Interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ odpovídá šíři v rozmezí $\pm 1,5$ imp/s pro neanomální oblast až ± 9 imp/s pro maximální hodnoty koncentrace U. Modelový výpočet je oproti experimentálním datům v oblasti anomálie gama záření ve všech výškách podhodnocen, pro měření na zemi dosahuje modelový výpočet 70 % experimentální hodnoty, pro výšku 0,5 m tvoří model 83 %, pro výšku 1 m 85 % a pro výšku 2 m 90 % experimentální hodnoty.

Pozemní průzkum, koncentrace uranu

Interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ odpovídá pro neanomální oblast šíři v rozmezí $\pm 0,8$ ppm eU a pro oblast maximálních hodnot koncentrace U šíři v rozmezí ± 11 ppm eU. Modelový výpočet je oproti experimentálním datům podhodnocen, pro měření na zemi dosahuje modelový výpočet v maximu uranové anomálie 68 % experimentální hodnoty, pro výšku 0,5 m tvoří model 88 %, pro výšku 1 m 90 % a pro výšku 2 m 94 % experimentální hodnoty v maximu anomálie.

Mini-letecký průzkum, úhrnná gama aktivita

Mini-letecký dynamický průzkum má vyšší směrodatnou odchylku měřených dat. Interval spolehlivosti modelových dat $\pm 3\sigma$ pro neanomální hodnoty úhrnné gama aktivity odpovídá přibližně šíři ± 25 imp/s a až ± 60 imp/s pro nejvyšší hodnoty.

Pro srovnání výběrová směrodatná odchylka experimentálních dat z neanomální části profilů z úseků 0 m až 30 m je 9,2 imp/s. Interval spolehlivosti $\pm 3s$ odpovídá $\pm 27,6$ imp/s, což se velmi blíží odvozenému intervalu spolehlivosti modelových dat $\pm 3\sigma$.

Profil 1: V oblasti maxima úhrnné gama aktivity kolem metráže 80 m je modelový výpočet oproti experimentálním údajům podhodnocen. Modelový výpočet pro výšky detekce 5 m až 15 m dosahuje přibližně 80 % experimentálních hodnot. Pro výšky detekce 20 až 40 m se modelová a experimentální data neliší v rámci intervalu spolehlivosti.

Profil 2: Data pro výšky detekce do 20 m nezachycují maximum anomálie gama záření z důvodu nemožnosti letu kvůli přítomnosti vegetace. Modelový výpočet pro výšky detekce do 20 m naznačuje mírné podhodnocení oproti experimentálním datům v oblasti maxima uranové mineralizace. Data se ale nacházejí v intervalu spolehlivosti, s výjimkou ojedinělých hodnot ve výškách detekce 15 m a 20 m, které ho těsně překračují. Pro výšky detekce 25 m až 40 m se modelová a experimentální data neliší v rámci intervalu spolehlivosti.

Profil 3: Experimentální data na profilu 3 se, až na jednotlivé výjimky, nacházejí v intervalu spolehlivosti modelových dat.

Mini-letecký průzkum, koncentrace uranu

Koncentrace uranu vyhodnocené ze záznamů jednosekundových spekter mají vysokou směrodatnou odchylku. Pás spolehlivosti kolem modelových dat v šířce $\pm 3\sigma$ je široký přibližně ± 7 ppm eU pro neanomální hodnoty a pro maximální hodnoty až 30 ppm eU. Pás spolehlivosti o šířce $\pm 3\sigma$ zahrnuje experimentální hodnoty s výjimkou jednotlivých odlehlých hodnot. Pás spolehlivosti s šířkou $\pm 1\sigma$ je zobrazen spolu s výsledky na Obr. 30 až Obr. 38.

Pro srovnání, výběrová směrodatná odchylka experimentálních dat z neanomální části profilů z úseků 0 m až 30 m je 3 ppm eU. Interval spolehlivosti $\pm 3s$ odpovídá ± 9 ppm eU, což se blíží odvozenému intervalu spolehlivosti modelových dat $\pm 3\sigma$.

Pro posouzení shody modelového výpočtu a experimentálních dat je uvažován interval spolehlivosti klouzavého průměru koncentrace uranu. Na každou hodnotu klouzavého průměru z devíti jednosekundových měření lze pohlížet jako na četnost impulzů registrovanou

po devět sekund. Střední kvadratickou chybu průměru lze stanovit podle vztahu (5). Četnost impulzů n odpovídá citlivosti přístroje a modelové koncentraci uranu.

Ze vztahu (5) vyplývá, že pro devítisekundové okno klouzavého průměru je interval spolehlivosti šířky $\pm 3\sigma$ pro posouzení klouzavého průměru koncentrace uranu identický s intervalem spolehlivosti neshlazené koncentrace uranu šíře $\pm 1\sigma$.

Interval spolehlivosti klouzavého průměru šířky $\pm 3\sigma$ odpovídá pro neanomální hodnoty šíři v rozmezí přibližně $\pm 2,3$ ppm eU koncentrace U a pro nejvyšší hodnoty koncentrace U až ± 10 ppm eU. Klouzavý průměr koncentrace uranu jen v několika případech mírně vybočuje z intervalu spolehlivosti $\pm 3\sigma$.

5.4.4 Diskuze

Shoda experimentálních a modelových dat je zejména pro geometrie měření s detektorem na zemi a v nízké výšce nad zemí ovlivněna interpolací zdrojových plošných dat koncentrace U. Zkoumané plochy byly analyzovány v husté síti bodových měření až $0,5 \times 0,5$ m. Zahuštění dat pro potřeby výpočtů do gridu $0,1 \times 0,1$ m již proběhlo pomocí interpolace. Dá se tedy předpokládat, že v místech vysokého gradientu koncentrace uranu ve zdroji, v maximech, bude nesouhlas experimentálních a modelových dat na zemi a v nízké výšce nad zemí nepřesností interpolace nejvíce ovlivněn.

Rozdíly mezi experimentálními a modelovými daty na lokalitách Dolní Černá Studnice a Třebesko mohou být také způsobeny časovými změnami ve vlhkosti hornin v době mezi prováděním počátečního průzkumu anomálně radioaktivní plochy terénním měřením gama záření, ze kterého vychází zdrojová data pro modelový výpočet, a pozdějším prováděním experimentálních studií pole gama záření v různých výškách detekce na profilech. Změny vlhkosti půd mohou způsobit časové variace gama záření v řádu desítek procent (IAEA, 2003; Minty, 1988).

Celkově je shoda modelových výpočtů pole gama záření a experimentálních dat uspokojivá. Podhodnocení modelových dat v nízkých výškách lze vysvětlit nepřesností interpolace dat koncentrace uranu na modelované ploše, v důsledku čehož modelová zdrojová deska nepopisuje reálný zdroj dostatečně přesně v detailním měřítku. Toto vysvětlení podporuje fakt, že vzhledem ke způsobu kalibrace modelu by výpočty pro geometrii měření s detektorem na zemi měly být teoreticky nejpřesnější. Ve skutečnosti jsou ale odchylky pro geometrii měření na zemi největší a s výškou detekce se snižují. Další příčinou odchylek

můžou být časové změny ve vlhkosti hornin v důsledku srážek mezi jednotlivými fázemi výzkumu. Rozdíly mezi výsledky modelových výpočtů a experimentálních dat nejsou systematické, v některých případech je shoda dokonalá. Při hodnocení statistické variability experimentálních dat radioaktivity, absolutních velikostí odchylek mezi výpočtem pole gama záření a výsledky terénních měření a s úvahou uvedených možných příčin odchylek lze považovat použitou metodu modelování pole gama záření za vyhovující.

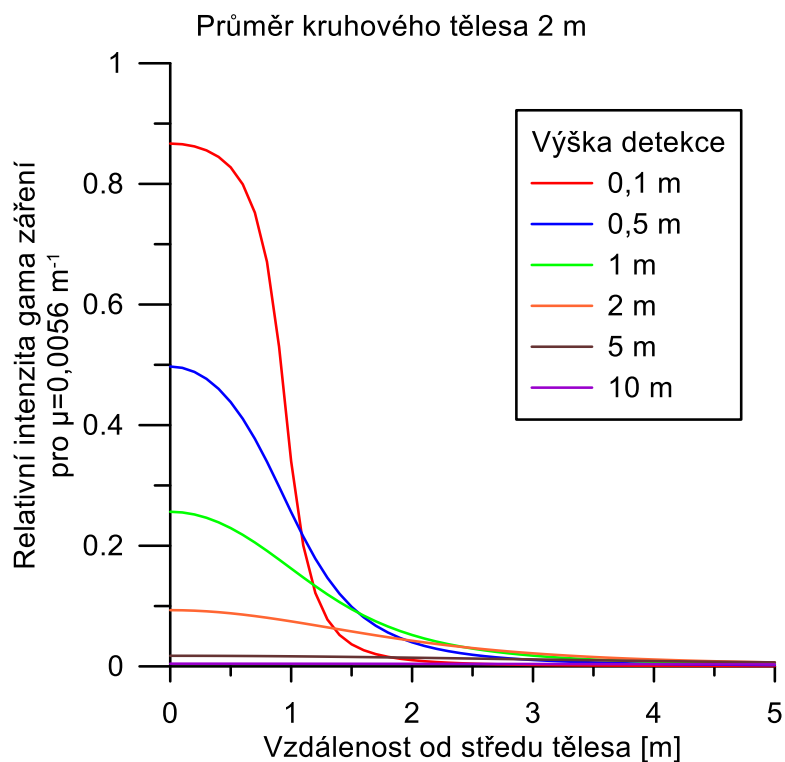
6 Výsledky výpočtu pole gama záření modelových objektů

Pro analýzu pole gama záření za účelem odhadu vzdálenosti možné lokalizace zdrojů radioaktivity bylo výpočtem stanoveno pole gama záření různých modelových objektů. Pole gama záření bylo vypočteno pro kruhová tělesa průměru 2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 40 m a 60 m na profilu jdoucím přes jejich střed v různých výškách detekce 0,1 m až 80 m nad povrchem. Koncentrace uranu je uvažována v kruhovém tělese homogenní. Výsledky jsou zobrazeny jako bezrozměrná relativní intenzita gama záření $i(x)$, která nabývá hodnot z intervalu (0, 1). Nuly nabývá v nekonečné vzdálenosti od modelového zdroje radioaktivity. Jedné nabývá ve výšce detekce 0,1 m ve středu modelového bloku s koncentrací U 1 ppm eU (odpovídá nekonečnému poloprostoru). Relativní intenzita gama záření $i(x)$ odpovídá intenzitě pole gama záření I^D , vztah (7), pro koncentraci radionuklidu ve zdrojovém radioaktivním objektu $C^q=1$. Výsledky jsou zobrazeny na profilu s počátkem ve středu kruhového zdroje radioaktivity. Křivky intenzity gama záření jsou symetrické.

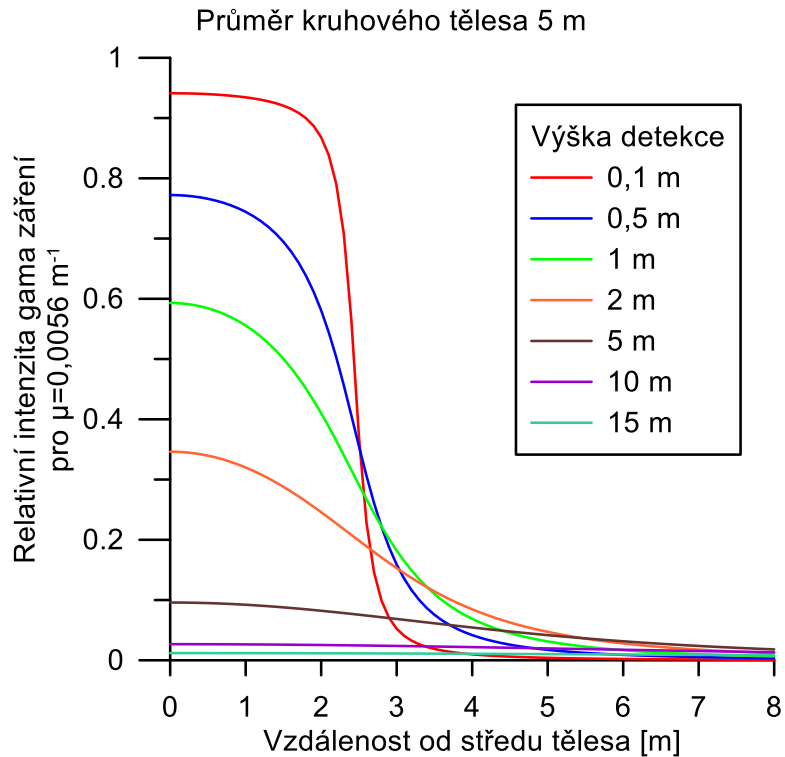
Pole gama záření modelových objektů bylo vypočítáno za užití lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu $0,0056 \text{ m}^{-1}$, odpovídajícího energii 1,76 MeV uranového okna a za užití lineárního součinitele zeslabení gama záření ve vzduchu $0,0035 \text{ m}^{-1}$ odpovídajícího intervalu energie okna úhrnné gama aktivity (kapitola 2.4).

Relativní intenzity gama záření modelových objektů v zájmovém okně uranu, nad kruhovými zdroji radioaktivity s průměrem 2 m až 60 m ve výškách detekce od 0,1 m do 80 m jsou zobrazeny na Obr. 45 až Obr. 50. Číselné hodnoty jsou uvedeny v příloze 1.

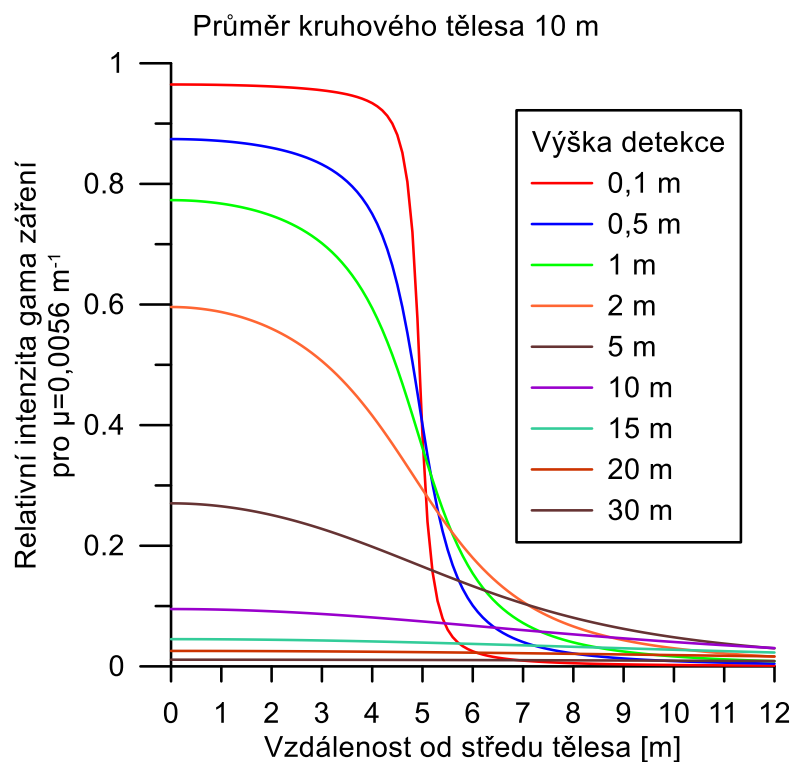
Křivky relativní intenzity gama záření modelových kruhových těles odpovídající oknu úhrnné gama aktivity jsou vizuálně velmi blízké křivkám odpovídajícím uranovému oknu, proto jsou uvedeny pouze číselné hodnoty v příloze 2. Rozdíl mezi hodnotami relativních intenzit gama záření odpovídající oknu úhrnné gama aktivity a uranovému oknu roste s průměrem anomálního zdroje radioaktivity a s výškou detekce. Pro geometrii měření na zemi jsou křivky relativní intenzity gama záření modelových kruhových těles pro úhrnnou gama aktivitu a pro interval energie gama záření uranového okna téměř shodné. S výškou detekce narůstá jejich rozdíl, ve výšce 80 m nad středem kruhového zdroje radioaktivity s průměrem 60 m je rozdíl až 20 %.



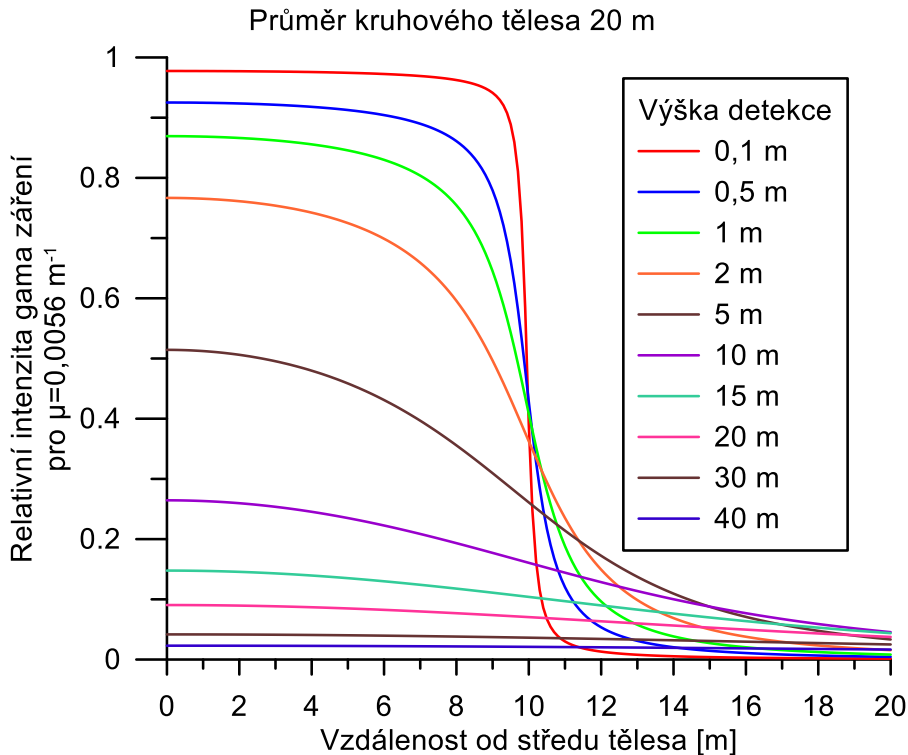
Obr. 45. Pole gama záření modelového kruhového tělesa s průměrem 2 m pro energii 1764 keV.



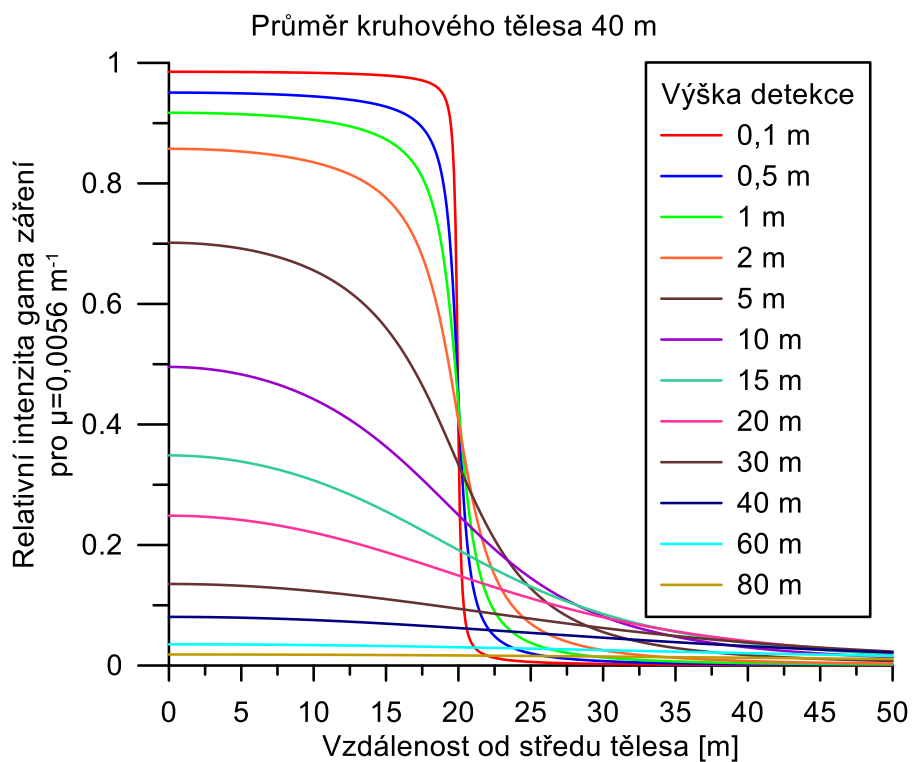
Obr. 46. Pole gama záření modelového kruhového tělesa s průměrem 5 m pro energii 1764 keV.



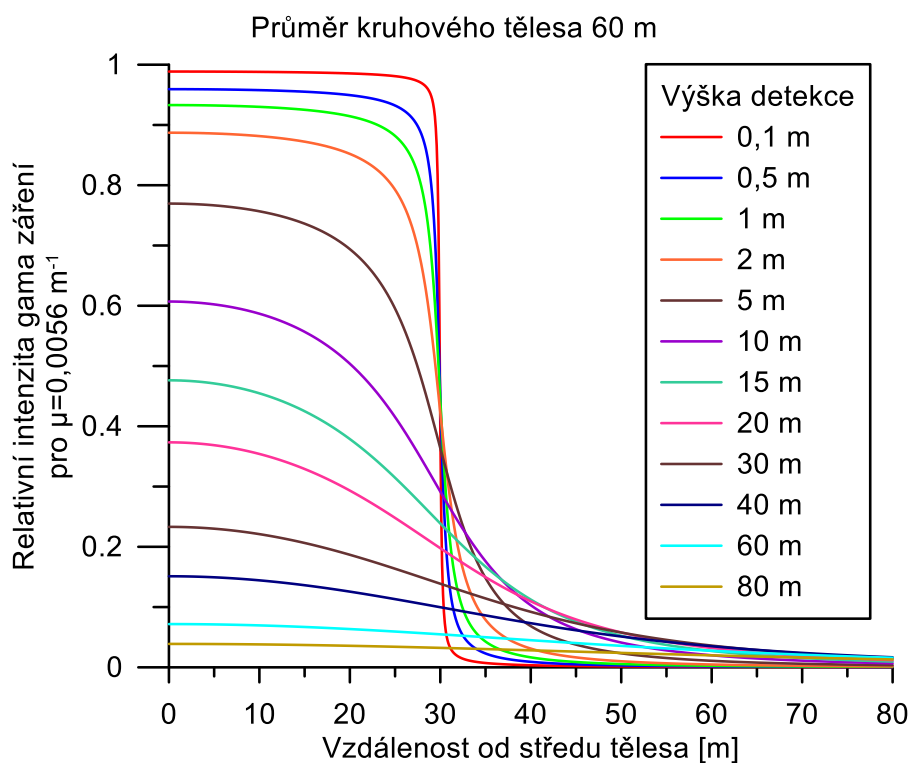
Obr. 47. Pole gama záření modelového kruhového tělesa s průměrem 10 m pro energii 1764 keV.



Obr. 48. Pole gama záření modelového kruhového tělesa s průměrem 20 m pro energii 1764 keV.



Obr. 49. Pole gama záření modelového kruhového tělesa s průměrem 40 m pro energii 1764 keV.



Obr. 50. Pole gama záření modelového kruhového tělesa s průměrem 60 m pro energii 1764 keV.

7 Posouzení možnosti lokalizace modelových objektů

7.1 Postup stanovení vzdálenosti detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením gama záření v uranovém okně

Běžnou úroveň radioaktivity hornin (pozadí P) vyjádřenou jako počet impulzů N_P^U měřenou daným přístrojem v zájmovém okně uranu, s danou dobou měření a v dané geometrii lze vyjádřit jako:

$$N_P^U = C_U^I \times S_U^U \times E_2^U \times t \text{ [imp]} , \text{ kde jsou}$$

C_U^I koncentrace uranu v běžných horninách ve zkoumaném území

S_U^U citlivost daného přístroje pro uran v zájmovém okně uranu pro energii 1,76 MeV. Počet impulzů za jednotku času na jednotkovou koncentraci eU v geometrii měření na povrchu nekonečného poloprostoru.

E_2^U hodnota zeslabení detekované energie gama 1,76 MeV ve vzduchu pro danou výšku měření, hodnota funkce E_2

t doba měření

Rozlišení běžné úrovně radioaktivity hornin od anomální radioaktivity způsobené přítomností zvýšené koncentrace přírodních radionuklidů v horninách provádíme standardně pomocí kritéria $N+2\sigma$ nebo $N+3\sigma$, které odlišuje anomálie od běžných hodnot radioaktivity na hladině pravděpodobnosti 95,5 % resp. 99,7 % (IAEA, 2003).

V této práci je uvažována hodnota kritéria pro odlišení anomálie od běžné úrovně radioaktivity v amplitudě dvou směrodatných odchylek σ :

$$N_{2\sigma} = N_P + 2\sqrt{N_P} \tag{10}$$

V předchozí kapitole byly vypočítány relativní intenzity gama záření $i(x)$ modelových kruhových těles na profilu x procházejícím jejich středem.

Počet impulzů v zájmovém okně U v poli gama záření modelovaného zdroje radioaktivity $N^U(x)$ v daném bodě profilu x měřený daným přístrojem, s danou dobou měření a v dané geometrii lze počítat jako:

$$N^U(x) = N_P^U + {}^U i(x) \times C_U^2 \times S_U^U \times t \quad (11)$$

kde jsou

${}^U i(x)$ vypočtená relativní intenzita gama záření modelovaného zdroje radioaktivity, ve vzdálenosti x od středu kruhového zdroje pro energii 1,76 MeV.

C_U^2 zvolená koncentrace uranu ve zdroji

S_U^U citlivost daného přístroje pro uran v zájmovém okně uranu pro energii 1,76 MeV

Vzdálenost x , na kterou lze s pravděpodobností 95,5% odlišit anomální radioaktivitu objektu od běžné úrovně radioaktivity okolí je vzdálenost, ve které je hodnota $N^U(x)$ rovna $N_{2\sigma}$.

Pro relativní intenzitu gama záření modelovaného tělesa rovnou hodnotě kritéria pro odlišení anomálie s danou pravděpodobností platí s použitím vzorců (10) a (11):

$${}^U i(x) = {}^U i_{2\sigma} = \frac{2\sqrt{N_P^U}}{C_U^2 \times S_U^U \times t} = \frac{2\sqrt{C_U^1 \times S_U^U \times E_2^U \times t}}{C_U^2 \times S_U^U \times t} \quad (12)$$

, kde

${}^U i_{2\sigma}$ je hodnota ${}^U i(x)$, která odpovídá nárůstu intenzity gama záření v důsledku přiblížení k anomálnímu zdroji radioaktivity na hodnotu kritéria 2σ v bodě x .

Vzdálenost x , ve které jsme schopni anomálii pro dané kritérium identifikovat, určíme jako vzdálenost, ve které křivka ${}^U i(x)$ nabývá hodnoty ${}^U i_{2\sigma}$ a tuto vzdálenost označíme $x_{2\sigma}$ a nazýváme ji vzdálenost detekovatelnosti.

$${}^U i(x) = {}^U i_{2\sigma}(x_{2\sigma})$$

Vzdálenost detekovatelnosti $x_{2\sigma}$ je udávána od okraje modelových anomálních těles nikoliv od jejich středu, jedná se o vzdálenost horizontální.

7.2 Postup stanovení vzdálenosti detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením úhrnné gama aktivity

Při zpracování úhrnné gama aktivity (total count, TC) se na běžné úrovni radioaktivity hornin podílí kromě uranu také draslík a thorium. Běžnou úroveň radioaktivity hornin N_P^{TC} měřenou daným přístrojem s danou dobou měření a v dané geometrii měření lze vyjádřit jako:

$$N_P^{TC} = (C_K \times S_K^{TC} + C_U^1 \times S_U^{TC} + C_{Th} \times S_{Th}^{TC}) \times E_2^{TC} \times t [imp], \text{ kde jsou}$$

C_K, C_U^1, C_{Th} koncentrace draslíku, uranu a thoria v běžných horninách ve zkoumaném území

$S_K^{TC}, S_U^{TC}, S_{Th}^{TC}$ citlivosti daného radiometru pro draslík, uran a thorium v okně úhrnné gama aktivity. Počet impulzů za sekundu na jednotkovou koncentraci radionuklidu v geometrii měření na povrchu nekonečného poloprostoru.

E_2^{TC} hodnota zeslabení úhrnné gama aktivity ve vzduchu pro danou výšku měření v okně úhrnné gama aktivity

Počet impulzů v okně úhrnné gama aktivity v poli gama záření modelovaného tělesa $N^{TC}(x)$ v daném bodě profilu x měřenou daným přístrojem, s danou dobou měření a v dané geometrii lze počítat jako:

$$N^{TC}(x) = N_P^{TC} + {}^{TC}i(x) \times C_U^2 \times S_U^{TC} \times t, \quad (13)$$

kde jsou:

${}^{TC}i(x)$ vypočtená relativní intenzita gama záření modelovaného tělesa, ve vzdálenosti x od středu tělesa pro okno úhrnné gama aktivity.

C_U^2 zvolená koncentrace uranu v anomálním tělese

Pro relativní intenzitu gama záření modelovaného tělesa rovnou hodnotě kritéria pro odlišení anomálie s danou pravděpodobností platí pro úhrnnou gama aktivitu ekvivalentně vztahu (12):

$${}^{TC}i(x) = {}^{TC}i_{2\sigma} = \frac{2\sqrt{N_P^{TC}}}{C_U^2 \times S_U^{TC} \times t} = \frac{2\sqrt{(C_K \times S_K^{TC} + C_U^1 \times S_U^{TC} + C_{Th} \times S_{Th}^{TC}) \times E_2^{TC} \times t}}{C_U^2 \times S_U^{TC} \times t} \quad (14)$$

${}^{TC}i_{2\sigma}$ je hodnota ${}^{TC}i(x)$, která odpovídá nárůstu intenzity gama záření v důsledku přiblížení k anomálnímu zdroji radioaktivity na hodnotu kritéria 2σ v bodě x .

Vzdálenost detekovatelnosti x , ve které jsme schopni anomálii pro dané kritérium identifikovat, určíme jako vzdálenost, ve které křivka ${}^{TC}i(x)$ nabývá hodnoty ${}^{TC}i_{2\sigma}$ a tuto vzdálenost detekovatelnosti označíme $x_{2\sigma}$.

$${}^{TC}i(x) = {}^{TC}i_{2\sigma}(x_{2\sigma})$$

Vzdálenost detekovatelnosti $x_{2\sigma}$ je udávána od okraje modelových anomálních těles nikoliv od jejich středu, jedná se o vzdálenost horizontální.

7.3 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením gama záření v uranovém okně

Vytvoření modelů intenzity gama záření kruhových těles umožňuje stanovení odhadu vzdálenosti, na kterou lze dané těleso detekovat na pozadí okolních hornin s daným radiometrickým přístrojem a dobou měření v dané výšce měření nad terénem tak, jak je popsáno v předchozí kapitole.

Vzdálenosti detekovatelnosti radioaktivního objektu od jeho okraje pro měření v různé výšce do 80 m byly posouzeny pro různé úrovně radioaktivity zdrojového objektu, doby měření a citlivosti detektoru. Průměr kruhového objektu byl uvažován 2 m až 60 m. Pro pozadí bylo zvoleno $C_U^I = 3$ ppm eU. Koncentrace U v anomálním objektu byly uvažovány od 10 ppm eU do 2000 ppm eU. Doby měření byly uvažovány od 1 s do 360 s. Citlivosti přístroje byly uvažovány 0,1 imp/s až 15 imp/s na 1 ppm eU. Pro tyto předpoklady byly vypočítány vzdálenosti detekovatelnosti od okraje radioaktivního objektu, ve kterých intenzita gama záření, za daných podmínek měření, překračuje úroveň pozadí podle kritéria $N+2\sigma$. V následujících podkapitolách jsou výsledky uvedeny pro tři vybrané způsoby radiometrického průzkumu. Výsledky pro všechny kombinace parametrů jsou uvedeny v příloze 3. Vzdálenosti detekovatelnosti jsou vypovídající pro statické měření. Předpokládá se, že detektor se během měření nepohybuje v nehomogenním poli gama záření. Pro krátkou dobu měření 1 s a pomalou rychlost pohybu 1 m/s lze pohyb detektoru zanedbat a považovat vzdálenosti detekovatelnosti od okraje anomálního radioaktivního objektu za vypovídající také pro dynamické měření.

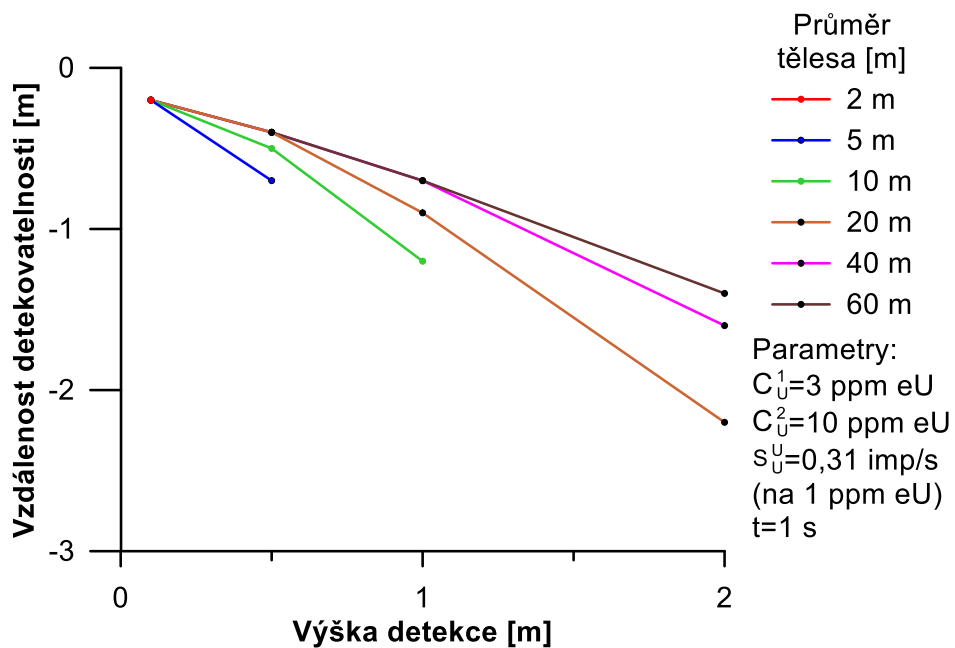
7.3.1 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní dynamický průzkum

Na Obr. 51 až Obr. 56. jsou zobrazeny vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých radioaktivních kruhových těles pro čas měření $t=1$ s, citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU a pro různé koncentrace uranu $C_U^2=10$ ppm eU až 2000 ppm eU v anomálním objektu. Takto zvolené parametry odpovídají průzkumu s přístrojem s NaI(Tl) detektorem velikosti 76×76 mm v dynamickém vyhledávacím módu s frekvencí záznamu 1 s. Pro předpokládanou rychlost pohybu při pěším průzkumu kolem 1 m/s lze změnu polohy detektoru v poli gama záření zanedbat.

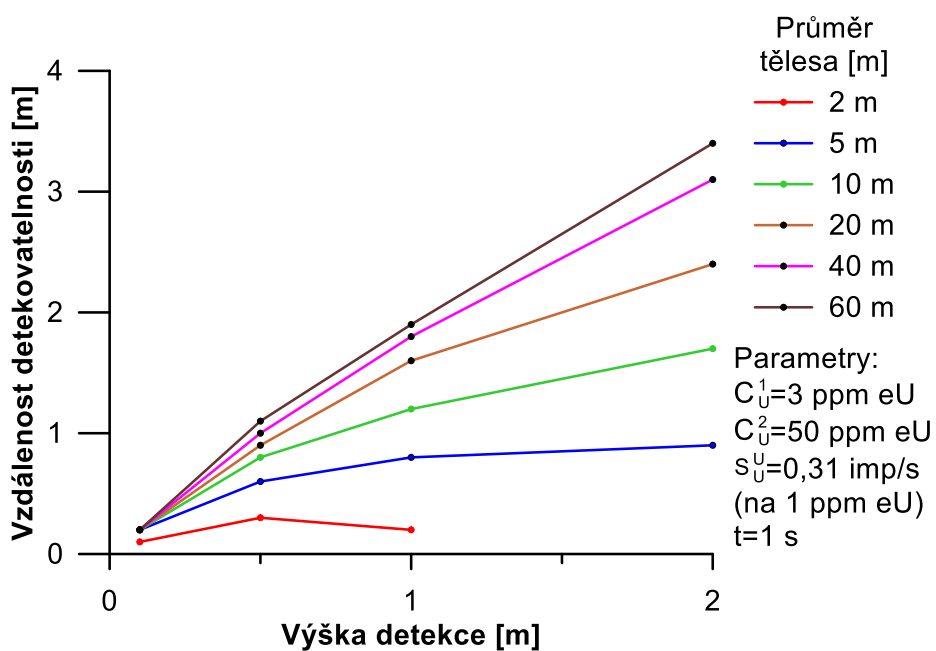
Obr. 51 pro nízkou koncentraci uranu 10 ppm eU v anomálním tělese ukazuje, že takovéto radioaktivní těleso nelze detekovat v jeho blízkosti ale až přímo nad ním (záporná vzdálenost od okraje). Optimální výška detekce je co nejbližší zdroji, tedy na zemi.

Obr. 52. až Obr. 56. ukazují, že pro vyšší koncentrace U v modelových tělesech vzdálenost detekovatelnosti roste s výškou měření a s koncentrací uranu v tělese na jednotky až desítky metrů. Výhodná geometrie měření je s detektorem umístěným ve výšce kolem 2 m.

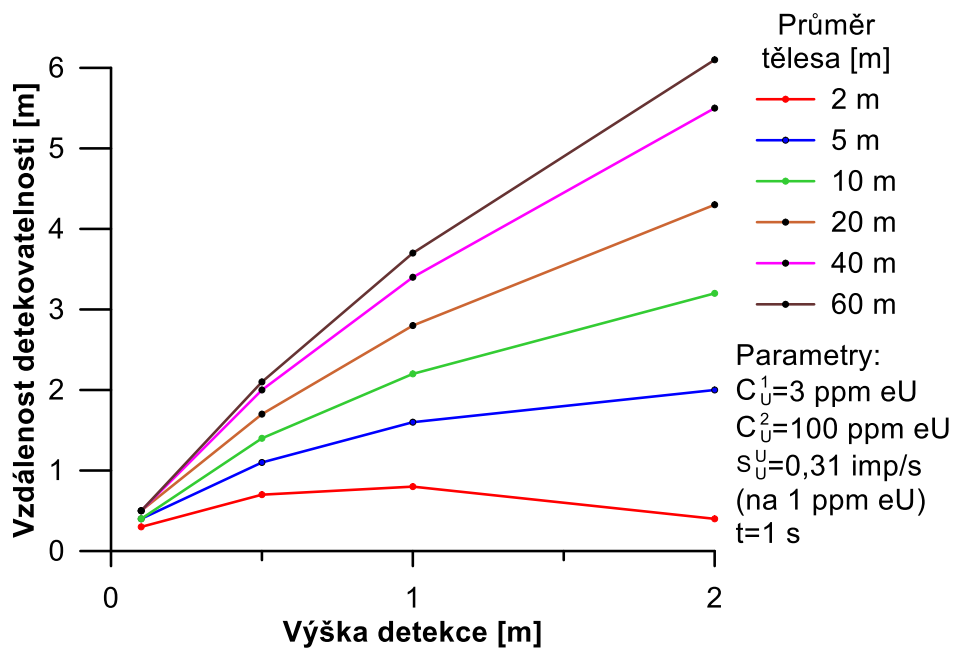
Pro radioaktivní tělesa malého průměru 2 m s koncentrací U 50 ppm eU je optimální výška detekce při průzkumu 0,5 m a pro 100 ppm eU je optimální výška detekce při průzkumu 1 m. Ve vyšší výšce se vzdálenost detekovatelnosti tělesa opět snižuje v důsledku poklesu intenzity gama záření se vzdáleností.



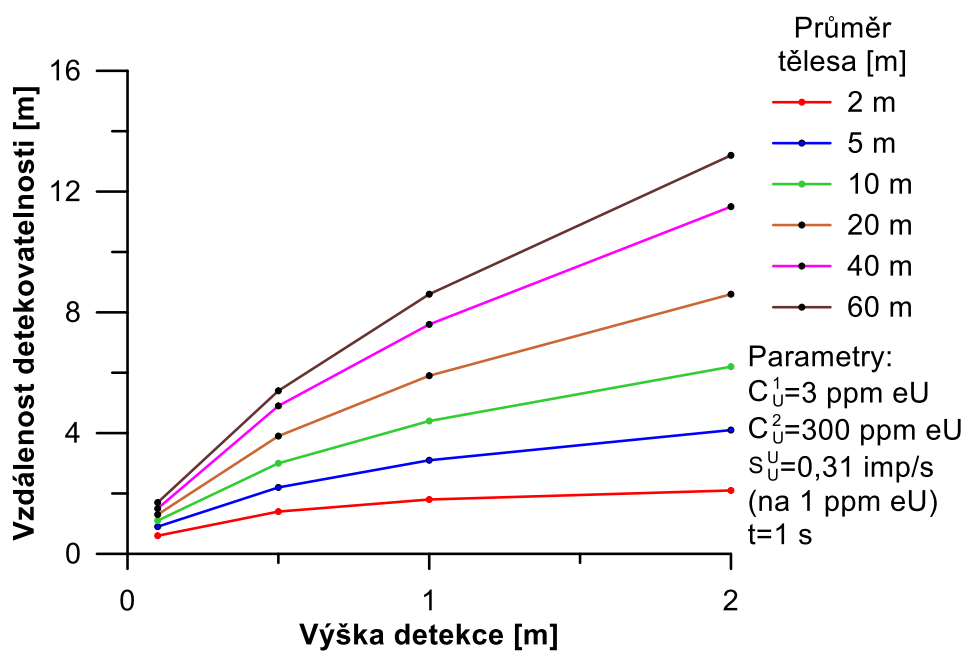
Obr. 51. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 10 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,31 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



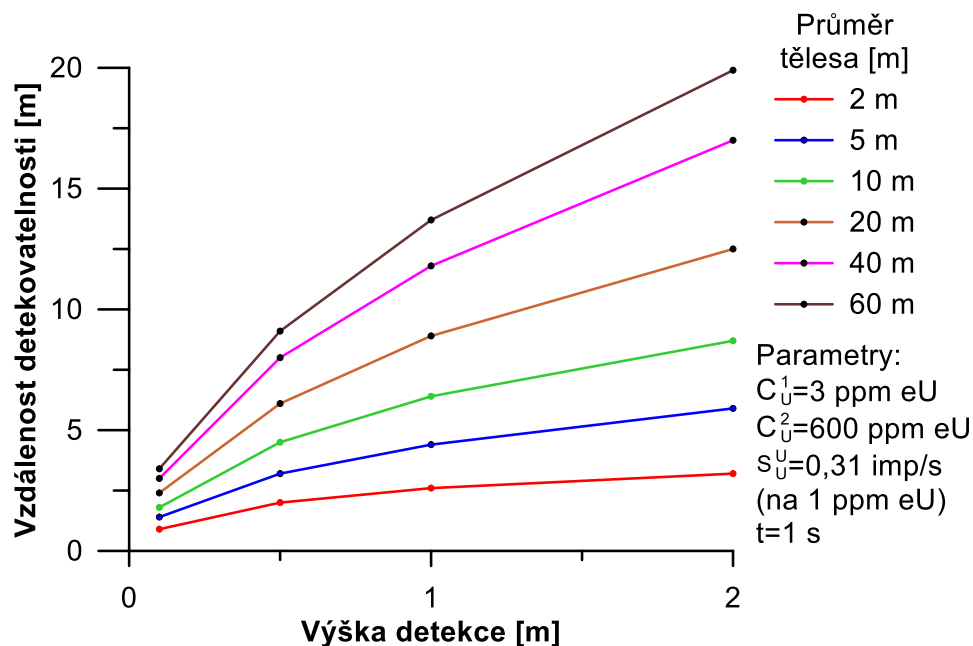
Obr. 52. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 50 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,31 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



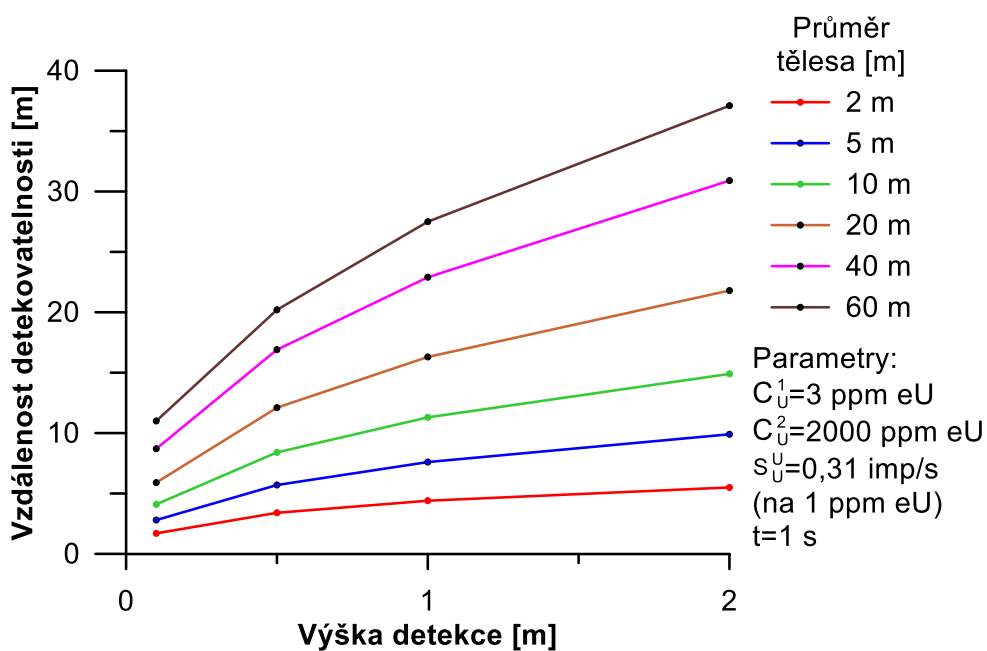
Obr. 53. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 100 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,31 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 54. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 300 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,31 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 55. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 600 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,31 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.

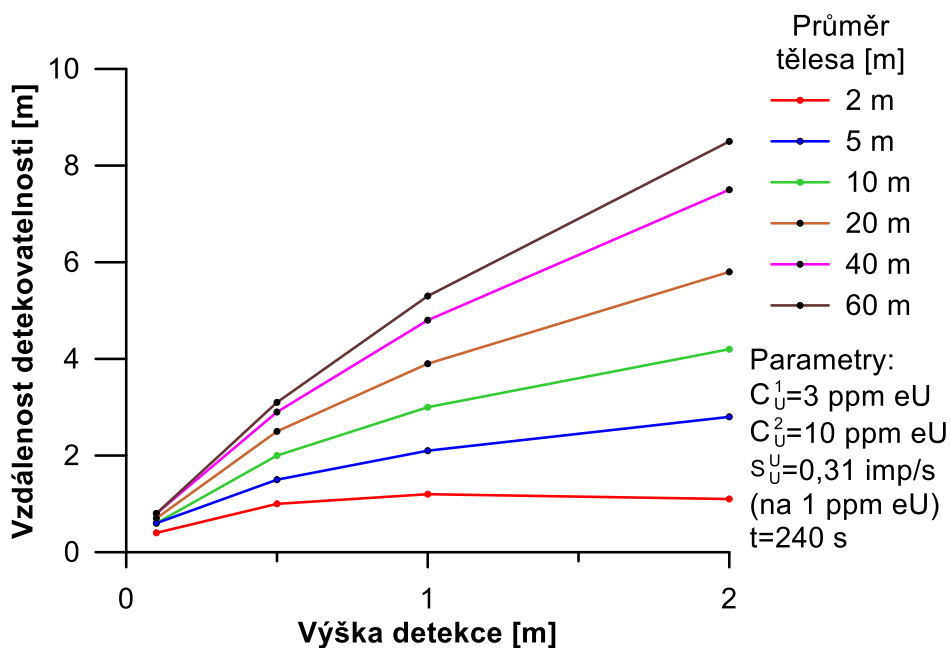


Obr. 56. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 2000 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,31 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.

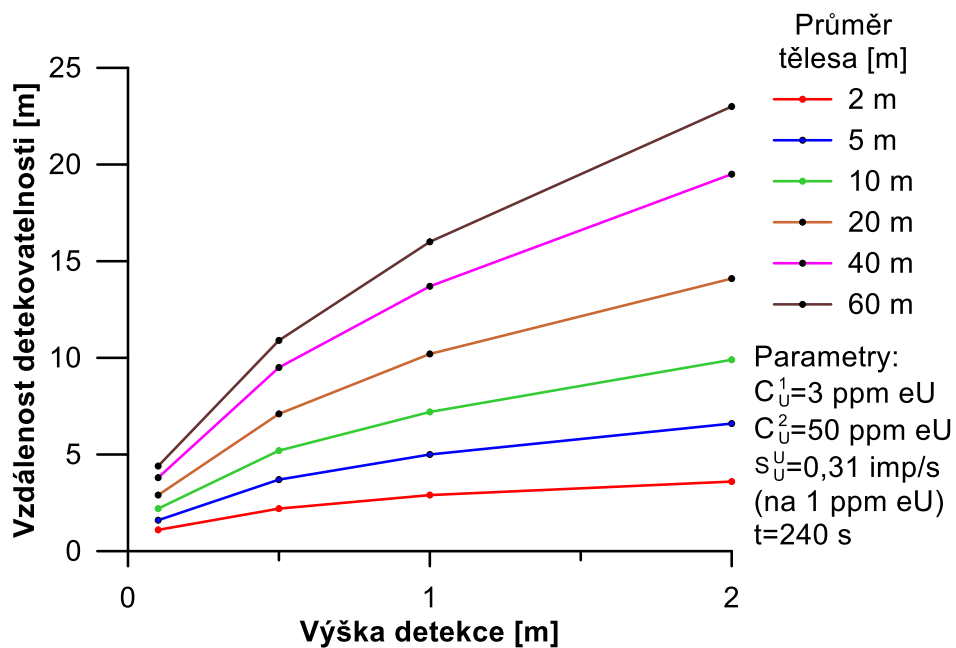
7.3.2 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní statickou analýzu

Na Obr. 57 až Obr. 62. jsou zobrazeny vzdálenosti detekovatelnosti od okraje modelových radioaktivních těles pro čas měření $t=240$ s a citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU. Takto zvolené parametry odpovídají statickému bodovému měření s přístrojem s NaI(Tl) detektorem velikosti 76×76 mm. Takový průzkum se používá k analýze koncentrací K, U a Th v horninách.

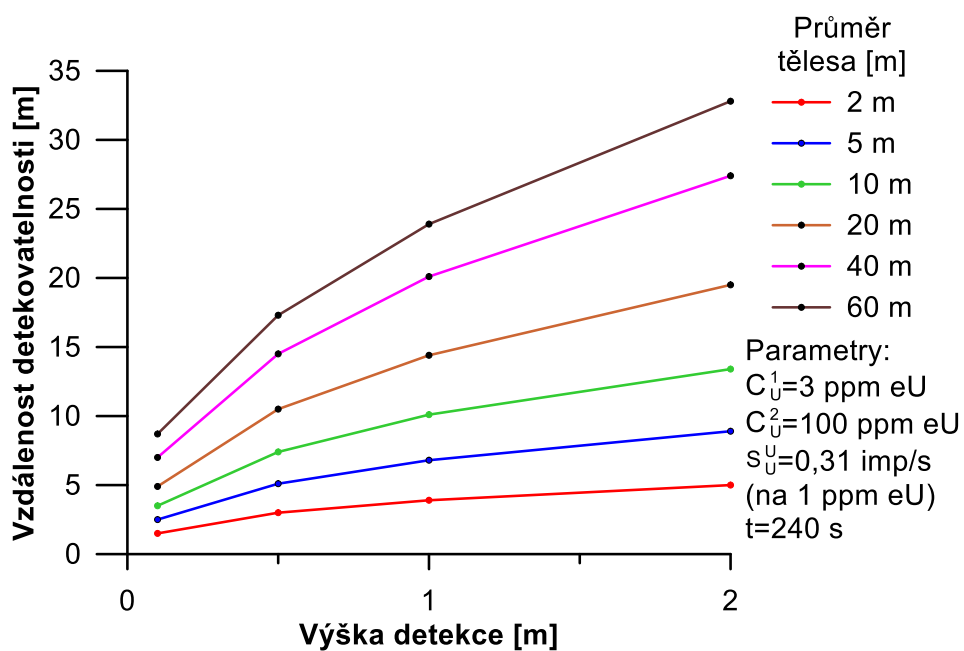
Výsledky ukazují, že pro vyšší koncentrace U v anomálním objektu vzdálenost detekovatelnosti roste s výškou měření a s koncentrací uranu v objektu. Delší doba měření a tedy vyšší přesnost výsledků oproti jednosekundovému měření (předchozí kapitola) se projevila na několikanásobně větší vzdálenosti detekovatelnosti modelových objektů.



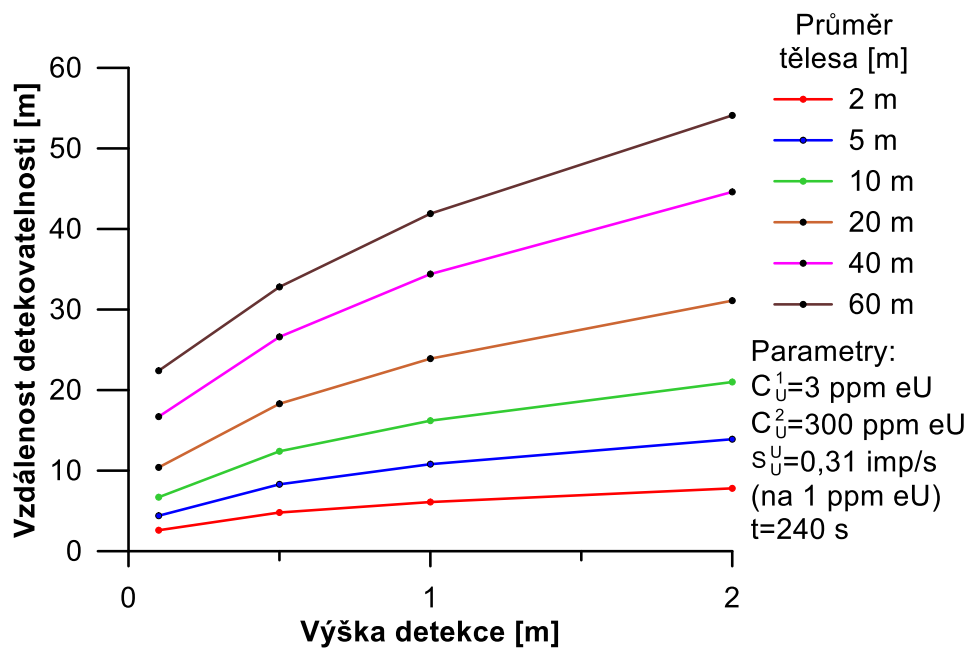
Obr. 57. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 10 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU.



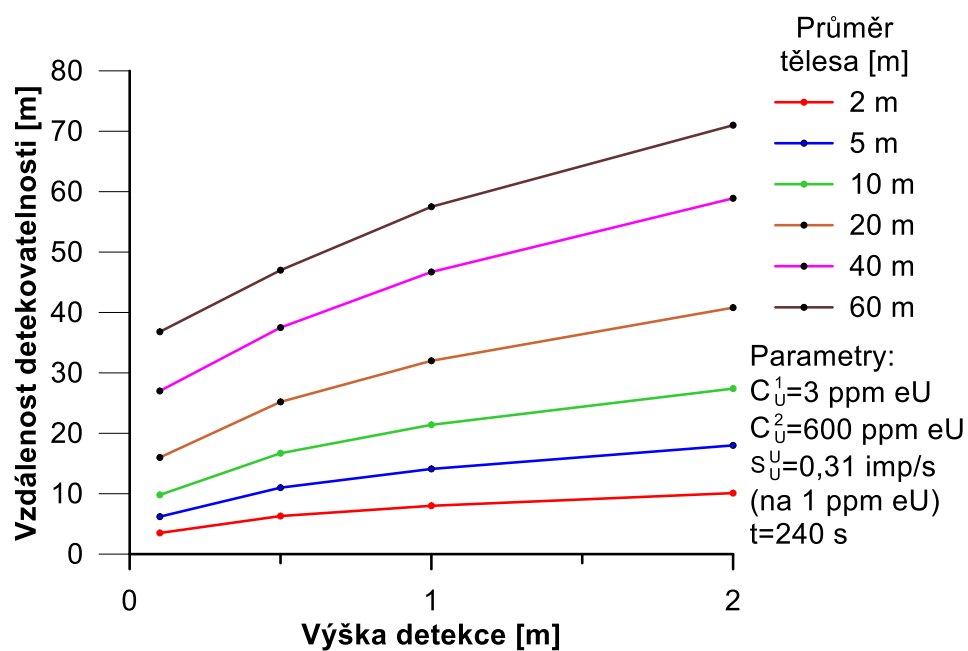
Obr. 58. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 50 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU.



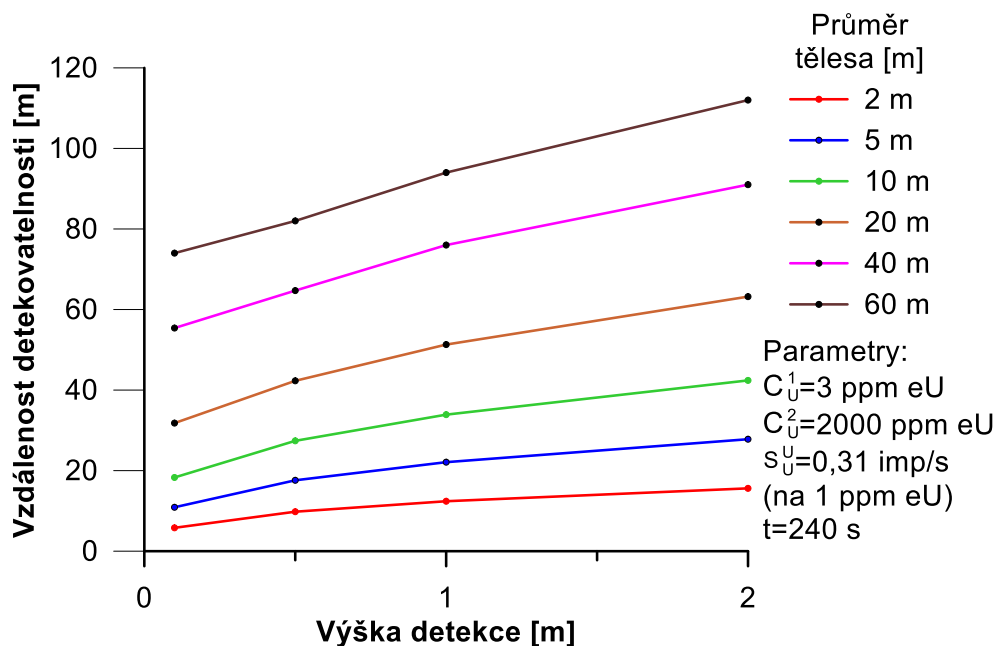
Obr. 59. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 100 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU.



Obr. 60. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 300 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU.



Obr. 61. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 600 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU.



Obr. 62. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 2000 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost $S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU.

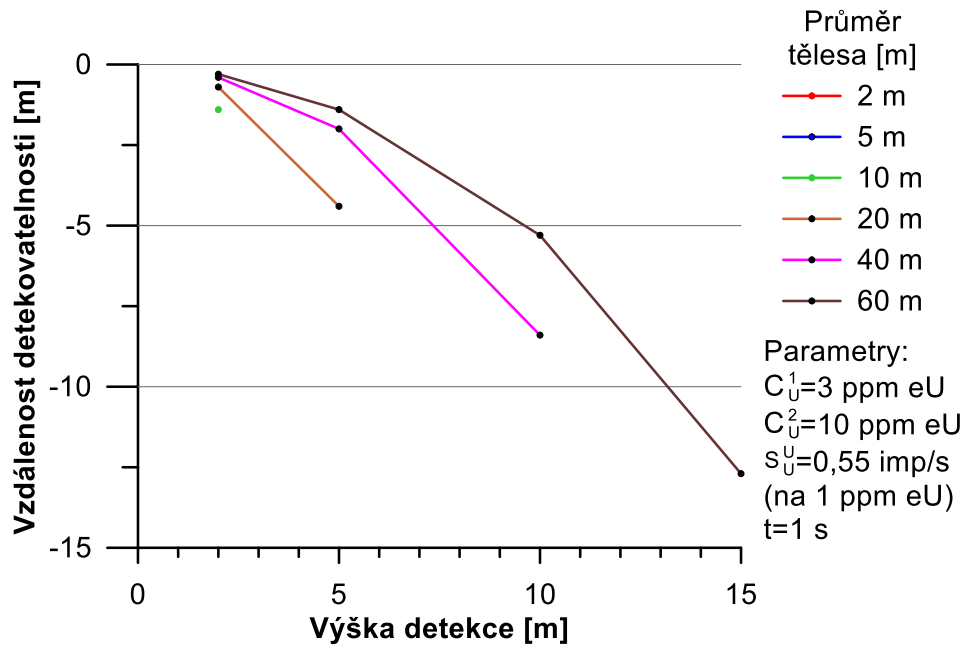
7.3.3 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů při mini-leteckém průzkumu

Na Obr. 63 až Obr. 68 jsou zobrazeny horizontální vzdálenosti detekovatelnosti od okraje modelových radioaktivních těles pro čas měření $t=1$ s, citlivost $S_U^U=0,55$ imp/s na 1 ppm eU. Výška detekce je od 2 m do 80 m. Takto zvolené parametry odpovídají mini-leteckému průzkumu s gamaspektrometrem D230A s rychlostí letu 1 m/s s frekvencí záznamu 1 s.

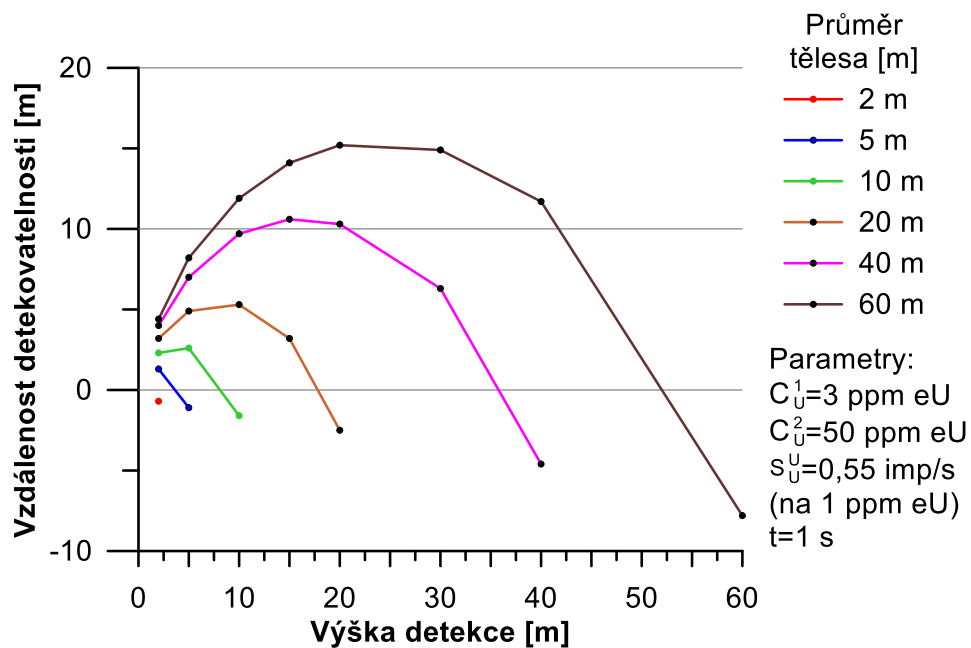
Obr. 63 pro nízkou koncentraci uranu 10 ppm eU v tělese ukazuje, že takovéto anomální těleso nelze detekovat v jeho blízkosti ale až přímo nad ním. Vzdálenost detekovatelnosti anomálního tělesa se s výškou detekce snižuje. Optimální výška detekce je co nejnižší nad zdrojem. Anomální těleso s průměrem 2 m a 5 m nelze v takovém případě vůbec detekovat. Nejrozsáhlejší anomální těleso s průměrem 60 m lze detekovat do výšky letu 15 m, neuvažujeme-li další statistické zpracování profilových dat.

Obr. 64 až Obr. 68 ukazují, že pro vyšší koncentrace U v anomálním tělese vzdálenost detekovatelnosti roste s výškou měření do určitého bodu a pak začíná s rostoucí výškou měření opět klesat. Toto je způsobeno souběhem zvětšování šířky zdrojové oblasti detekovaného gama záření s výškou a současně poklesem intenzity gama záření s výškou detekce. Na obrázcích je patrné, že existuje optimální výška detekce nad zemí, pro kterou je anomálie pole gama záření nejširší a horizontální vzdálenost detekovatelnosti od okraje

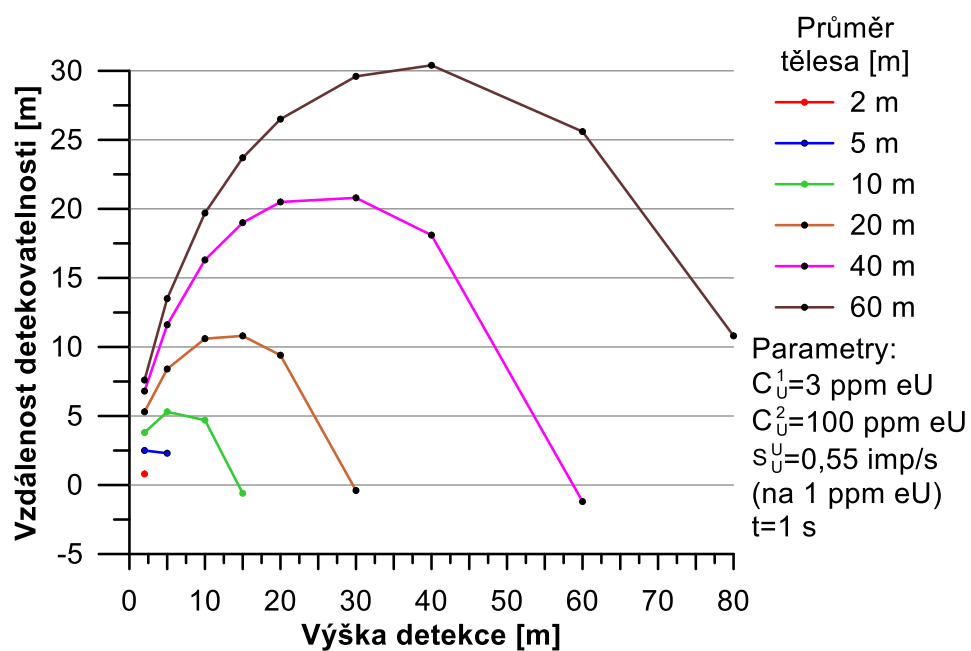
anomálního tělesa je největší. Tato optimální výška detekce závisí na parametrech přístroje, metodice průzkumu, koncentraci U v anomálním tělese a jeho průměru a mění se v celém uvažovaném rozmezí výšek detekce.



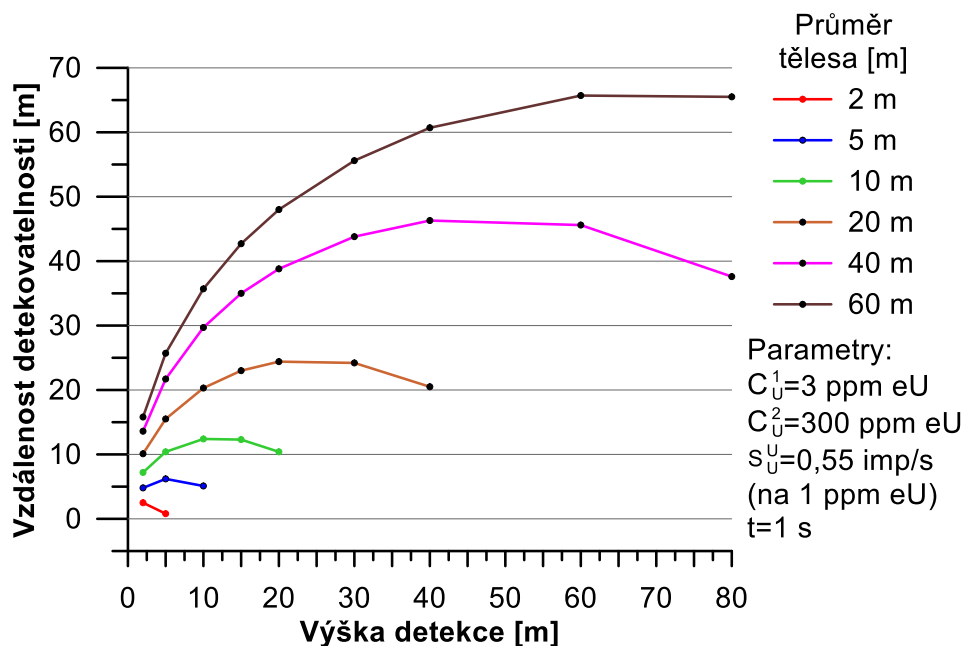
Obr. 63. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 10 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,55 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



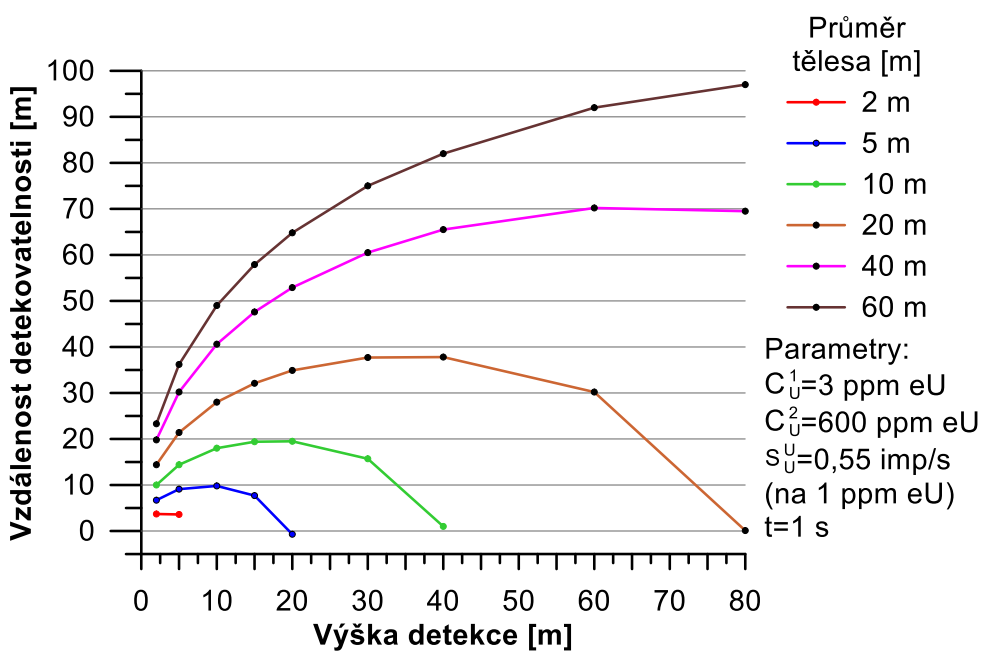
Obr. 64. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 50 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,55 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



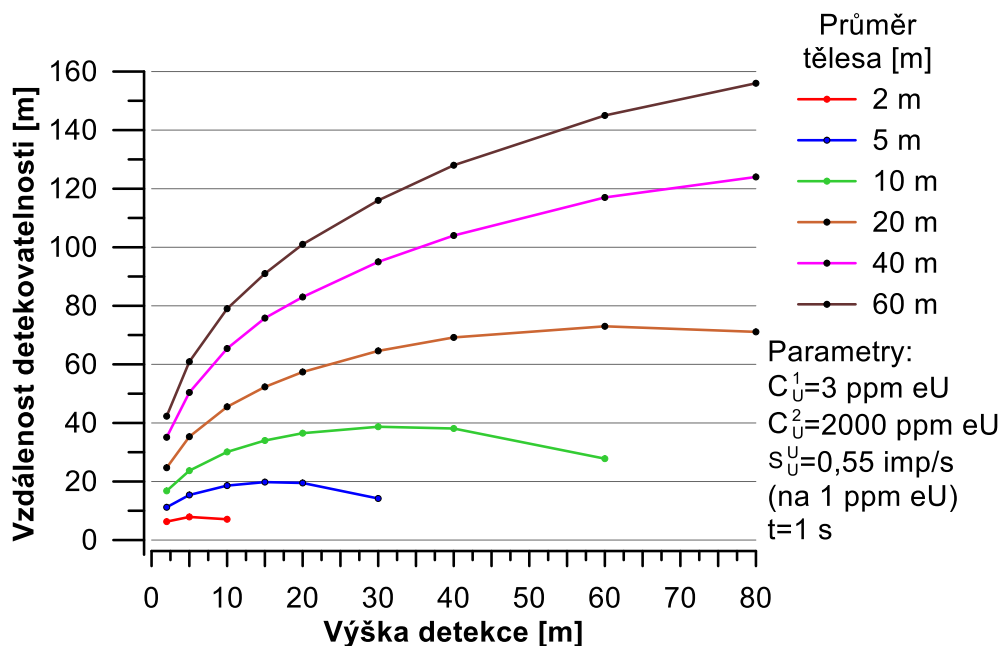
Obr. 65. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 100 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,55 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 66. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 300 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,55 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 67. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 600 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost $S_U^U=0,55 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 68. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 2000 ppm eU. Doba měření $t=1$ s. Citlivost $S_U^U=0,55$ imp/s na 1 ppm eU.

7.4 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů měřením úhrnné gama aktivity

Pole gama záření nad modelovými kruhovými zdroji radioaktivity a vzdálenost detekovatelnosti těchto zdrojů pro analýzu efektivnosti měření úhrnné gama aktivity byly stanoveny obdobně jako pro interval energií uranového okna. Úrovně koncentrace U v anomálním tělese, doby měření a kritérium anomality ($N+2\sigma$) byly zvoleny stejně jako v kapitole 7.3.

Zdrojem normálního neanomálního pole radioaktivity v případě detekce úhrnné gama aktivity je nejen uran ale také draslík a thorium. Jako normální koncentrace K, U a Th v horninách pro účel stanovení pole gama záření nad modelovými kruhovými zdroji radioaktivity byla uvažována koncentrace draslíku 2 %, koncentrace uranu 3 ppm eU a koncentrace thoria 12 ppm eTh. Tyto koncentrace přírodních radionuklidů odpovídají průměrným hodnotám v zemské kůře (Clark et al., 1966). Citlivosti přístroje pro uran byly uvažovány v intervalu 1 imp/s až 150 imp/s na 1 ppm eU v okně úhrnné gama aktivity. Zjednodušujícím předpokladem bylo, že citlivosti pro draslík a thorium, potřebné pro stanovení normálního pole radioaktivity, rostou spolu s citlivostí pro uran v poměru

$C_K=3,7C_U$ a $C_{Th}=0,52C_U$, tento poměr citlivostí pro K, U a Th v okně úhrnné gama aktivity odpovídá gama spektrometru GS-256 (PřF UK).

Vzdálenosti detekovatelnosti anomálních těles, ve kterých intenzita úhrnné gama aktivity, za daných podmínek měření, překračuje úroveň pozadí podle kritéria $N+2\sigma$ jsou uvedeny v příloze 4. pro všechny kombinace parametrů anomálních těles a metodiky měření. V následujících podkapitolách jsou výsledky uvedeny pro tři vybrané způsoby radiometrického průzkumu.

7.4.1 Vzđálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní dynamický průzkum

Na Obr. 69 až Obr. 74 jsou zobrazeny vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých anomálně radioaktivních těles pro čas měření $t=1$ s a pro různé koncentrace uranu $C_U^2=10$ ppm eU až 2000 ppm eU v anomálních tělesech.

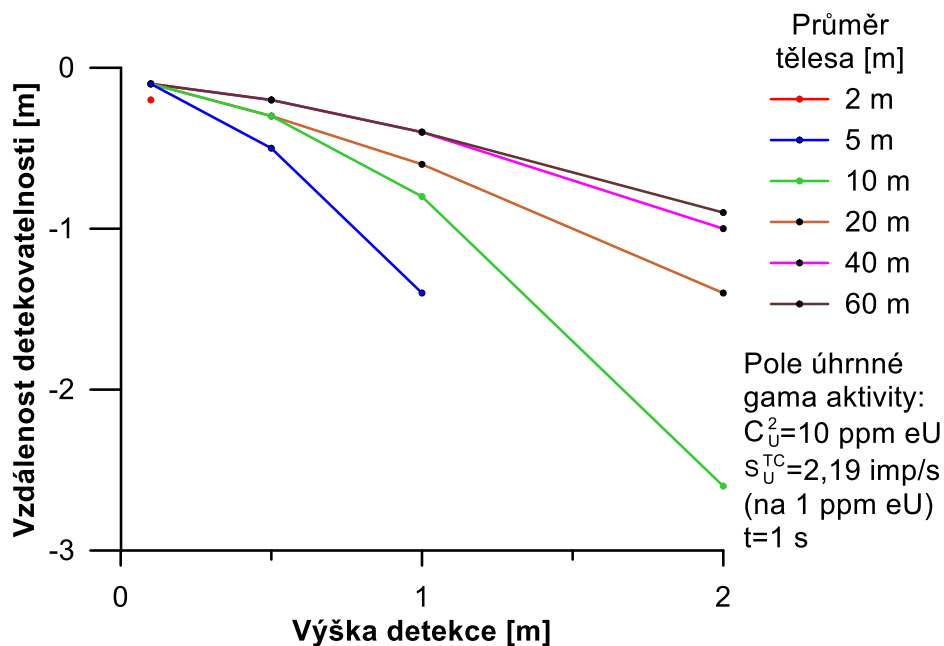
Citlivosti v okně úhrnné gama aktivity pro stanovení vzdálenosti detekovatelnosti radioaktivních objektů pro parametry odpovídající pozemnímu průzkumu byly uvažovány podle přístroje GS-256 (PřF UK) jako 8,06 imp/s na 1 % K, 2,19 imp/s na 1 ppm eU a 1,14 imp/s na 1 ppm eTh.

Obr. 69 pro nízkou koncentraci uranu 10 ppm eU v anomálním tělese ukazuje, že podobně jako při stanovení koncentrace uranu, také v případě úhrnné gama aktivity nelze takovéto těleso detekovat v jeho blízkosti ale až přímo nad ním. Optimální výška detekce je co nejbliže zdroji, tedy na zemi.

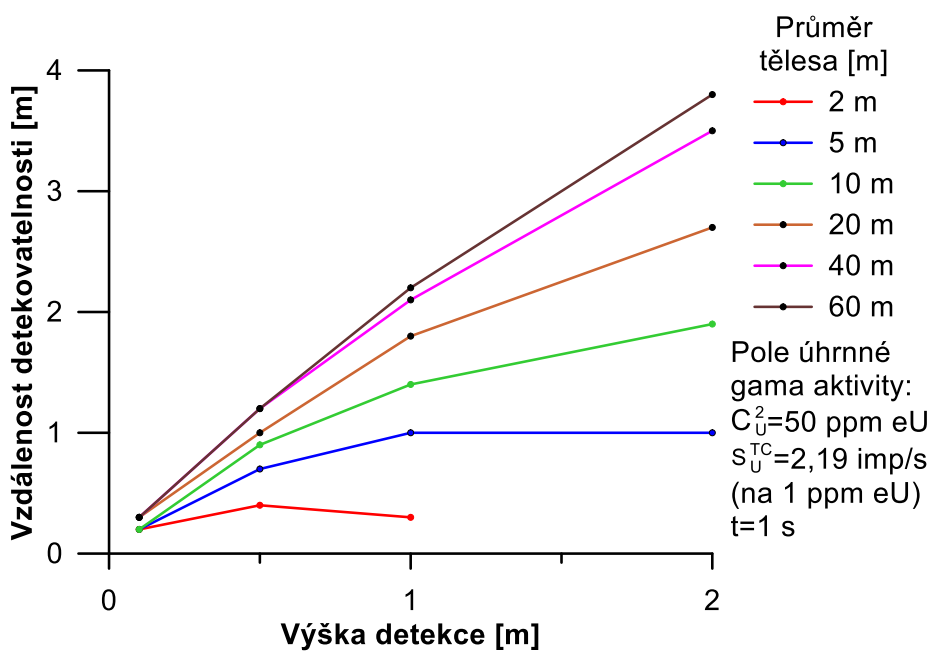
Obr. 70 až Obr. 74 ukazují, že pro vyšší koncentrace U v anomálním tělese vzdálenost detekovatelnosti roste s výškou měření a s koncentrací uranu v tělese na jednotky až desítky metrů. Výhodná geometrie měření je s detektorem umístěným ve výšce kolem 2 m.

Pro anomální tělesa malého průměru 2 m s koncentrací U 50 ppm eU je optimální výška průzkumu 0,5 m a pro 100 ppm eU je optimální výška průzkumu 1 m, stejně jako pro detekci gama záření v uranovém okně.

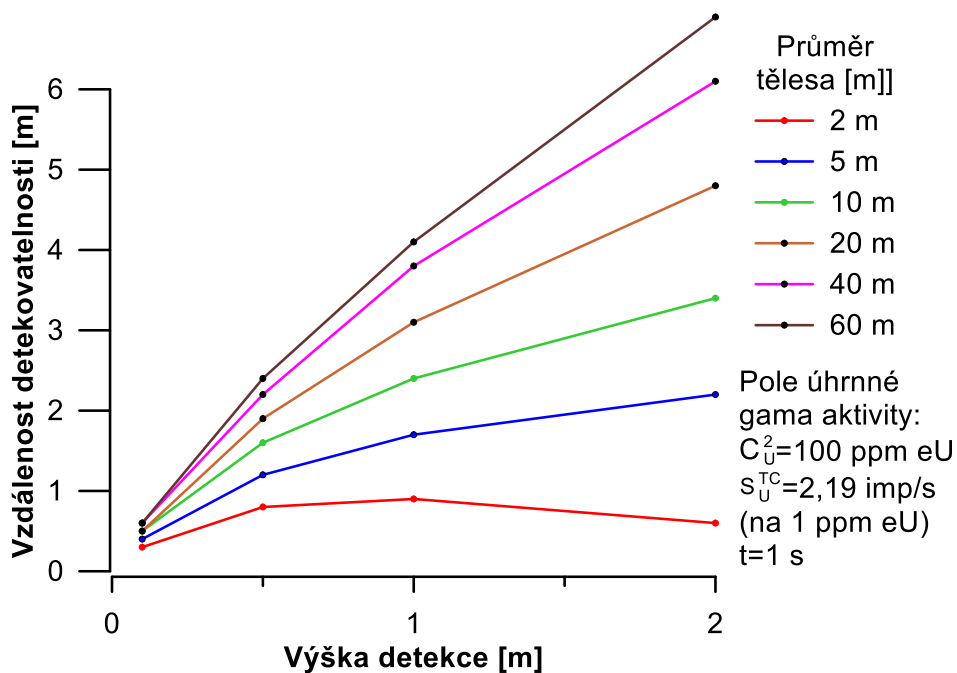
Vzdálenosti detekovatelnosti při vyhodnocení úhrnné gama aktivity jsou řádově o několik metrů větší, než vzdálenosti detekovatelnosti při vyhodnocení aktivity v zájmovém okně uranu.



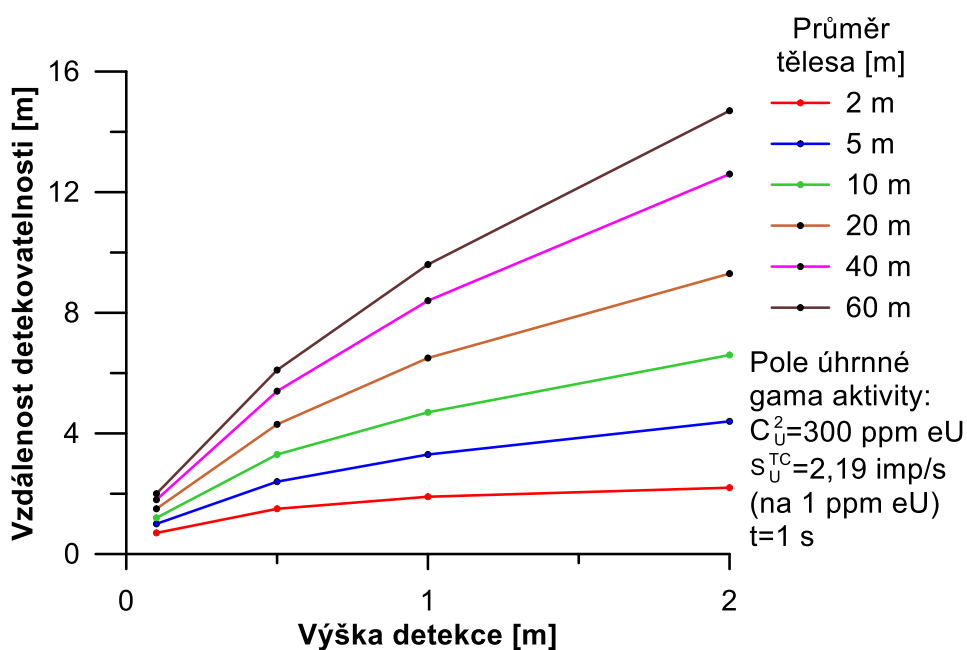
Obr. 69. Vzdaľenosti detekovatelnosti od okraje rŕznŕ velkŕch kruhovŕch radioaktivnŕch tŕles pro koncentraci U v anomálnŕm tŕlese 10 ppm eU. Doba mŕření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro ŕhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



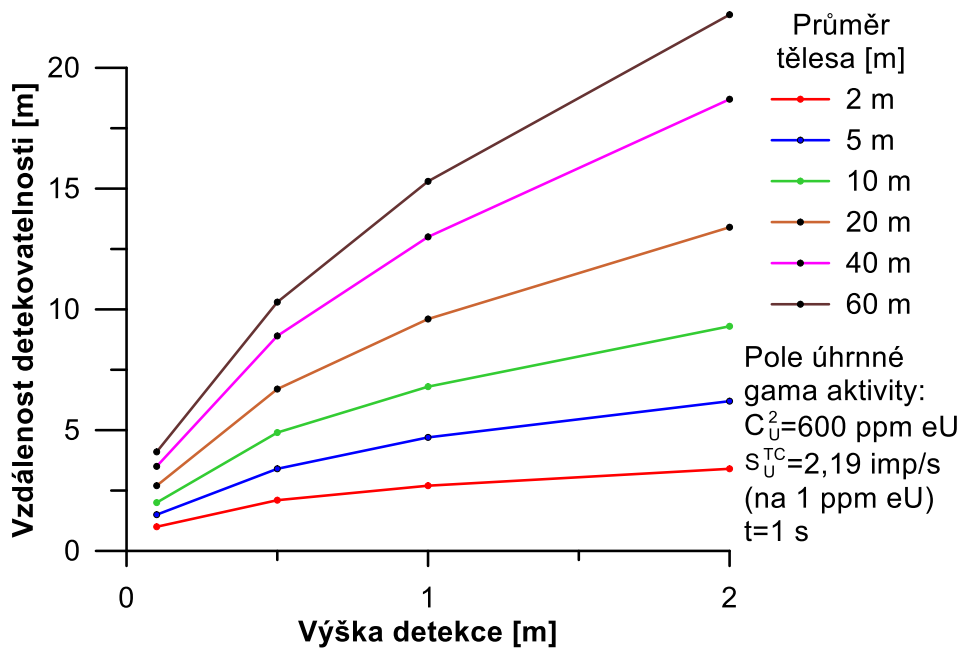
Obr. 70. Vzdaľenosti detekovatelnosti od okraje rŕznŕ velkŕch kruhovŕch radioaktivnŕch tŕles pro koncentraci U v anomálnŕm tŕlese 50 ppm eU. Doba mŕření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro ŕhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



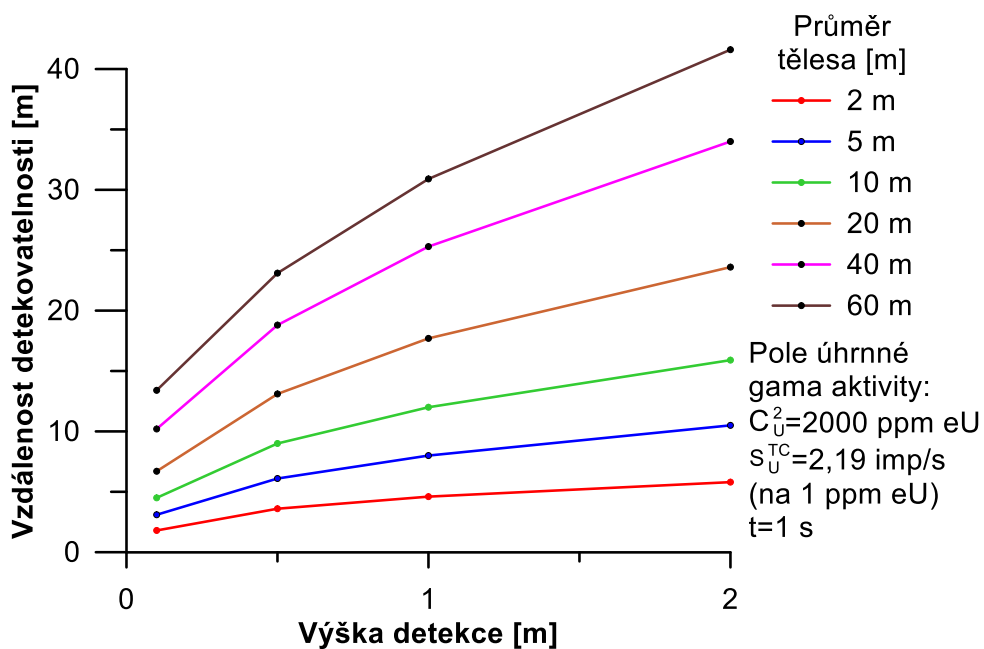
Obr. 71. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U anomálním tělese 100 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 72. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 300 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 73. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 600 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.

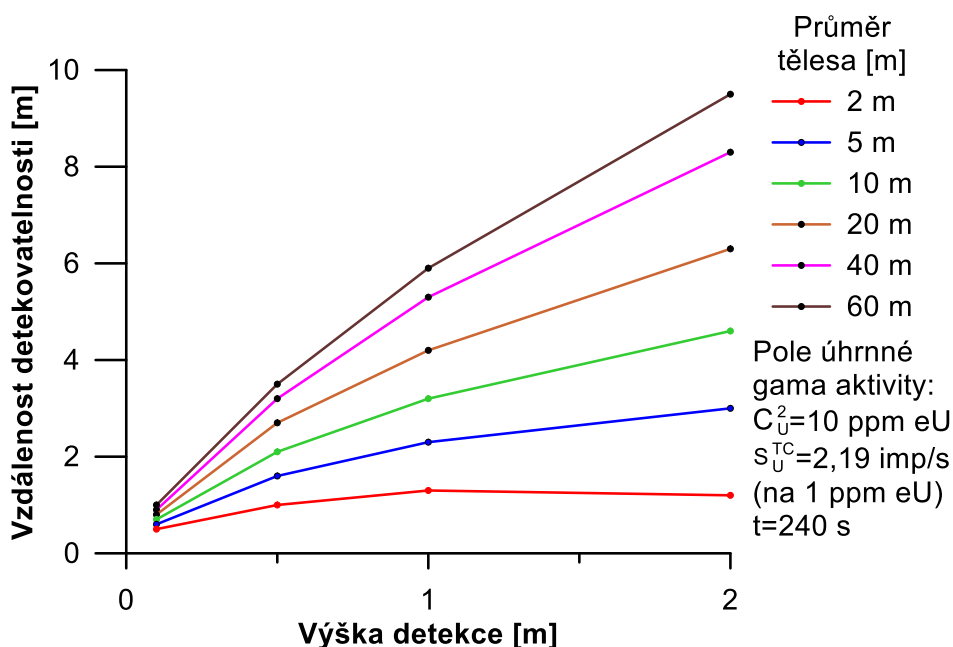


Obr. 74. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 2000 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.

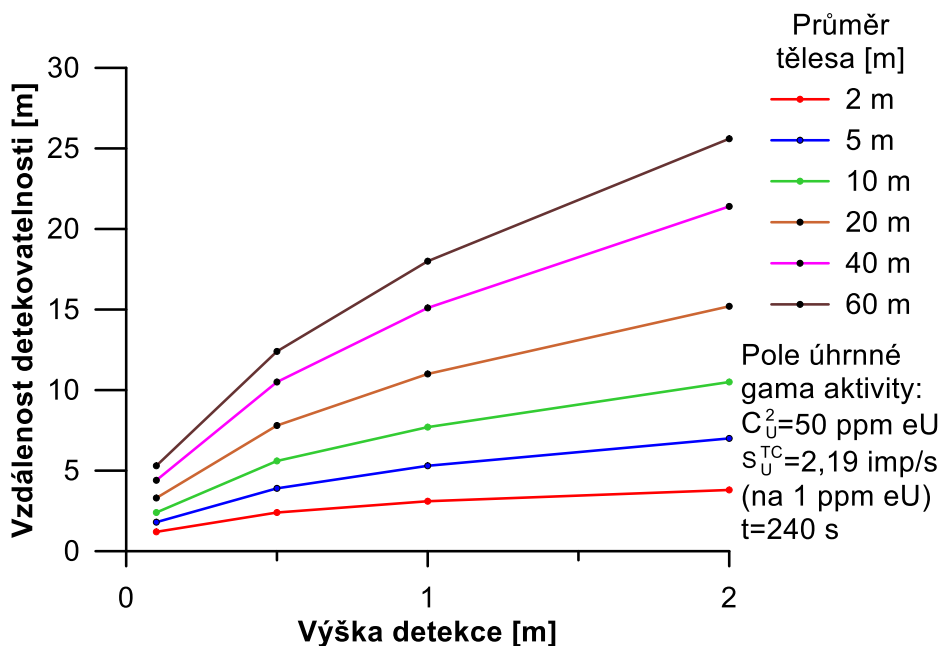
7.4.2 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů pro pozemní statickou analýzu

Na Obr. 75 až Obr. 80 jsou zobrazeny vzdálenosti detekovatelnosti od okraje modelových anomálních těles pro dobu měření $t=240$ s a citlivosti 8,06 imp/s na 1 % K, 2,19 imp/s na 1 ppm eU a 1,14 imp/s na 1 ppm eTh. Takto zvolené parametry odpovídají bodovému měření s přístrojem GS-256 v okně úhrnné gama aktivity.

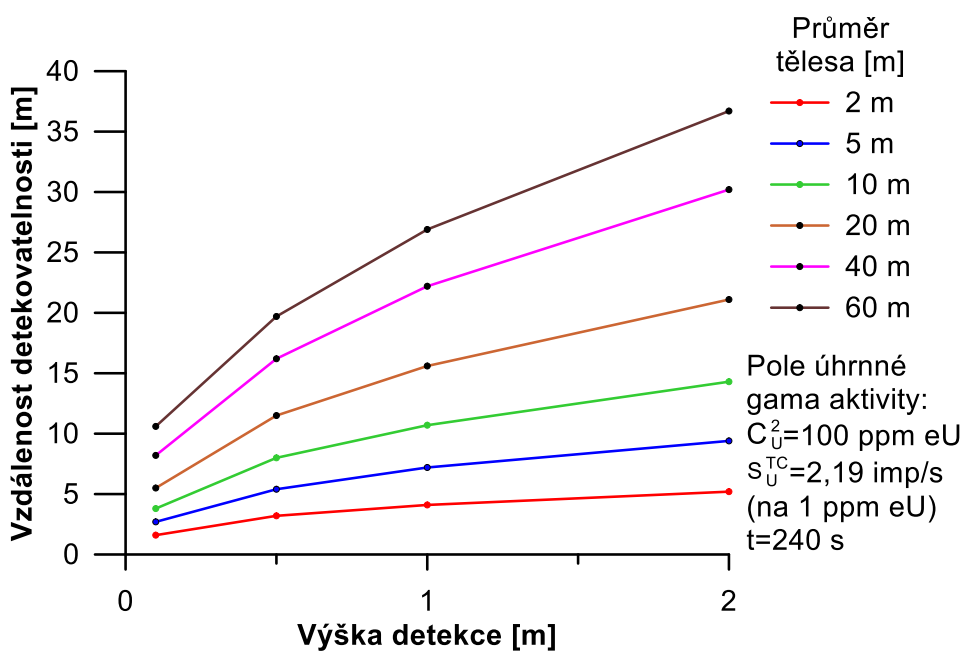
Výsledky ukazují, jak roste vzdálenost detekovatelnosti s koncentrací U v anomálním tělese a s výškou měření. Delší doba měření 240 s a tedy vyšší přesnost výsledků oproti jednosekundovému dynamickému měření se projevila na několikanásobně větší vzdálenosti detekovatelnosti anomálních těles při měření úhrnné gama aktivity.



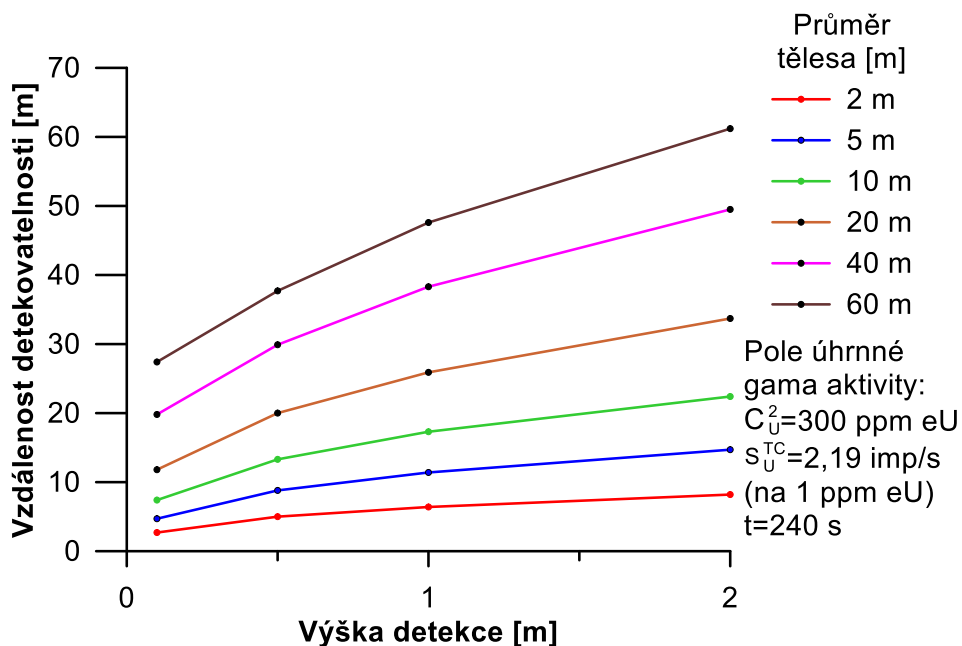
Obr. 75. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 10 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC}=2,19$ imp/s na 1 ppm eU.



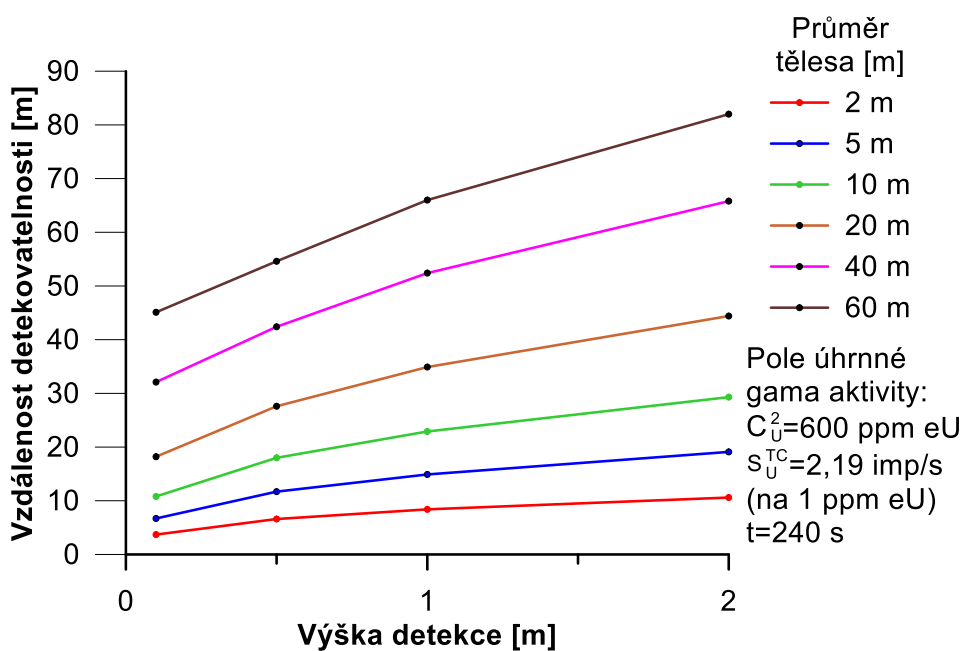
Obr. 76. Vzđálenosti detekovatelnosti od okraje řůzně velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 50 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC}=2,19$ imp/s na 1 ppm eU.



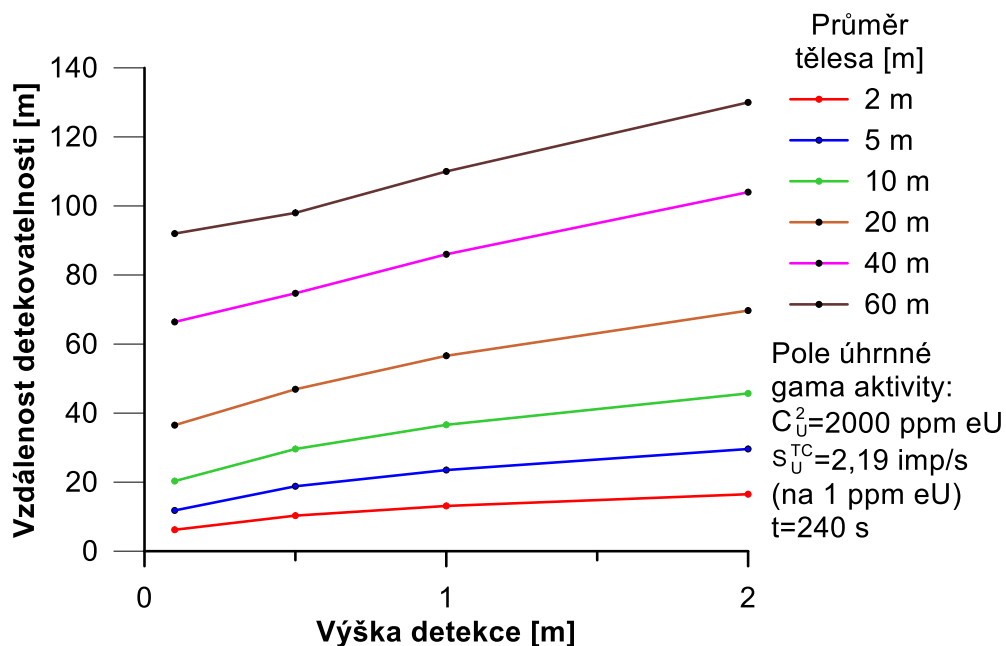
Obr. 77. Vzđálenosti detekovatelnosti od okraje řůzně velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 100 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC}=2,19$ imp/s na 1 ppm eU.



Obr. 78. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 300 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC}=2,19$ imp/s na 1 ppm eU.



Obr. 79. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 600 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC}=2,19$ imp/s na 1 ppm eU.



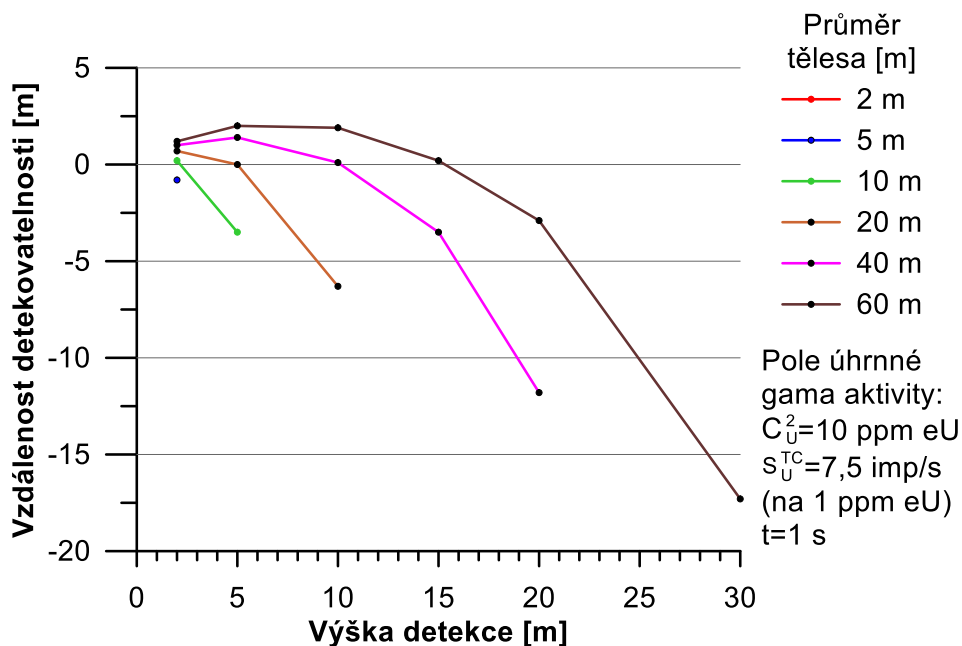
Obr. 80. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 2000 ppm eU. Doba měření $t=240$ s. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC}=2,19 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.

7.4.3 Vzdálenost detekovatelnosti radioaktivních objektů při mini-leteckém průzkumu

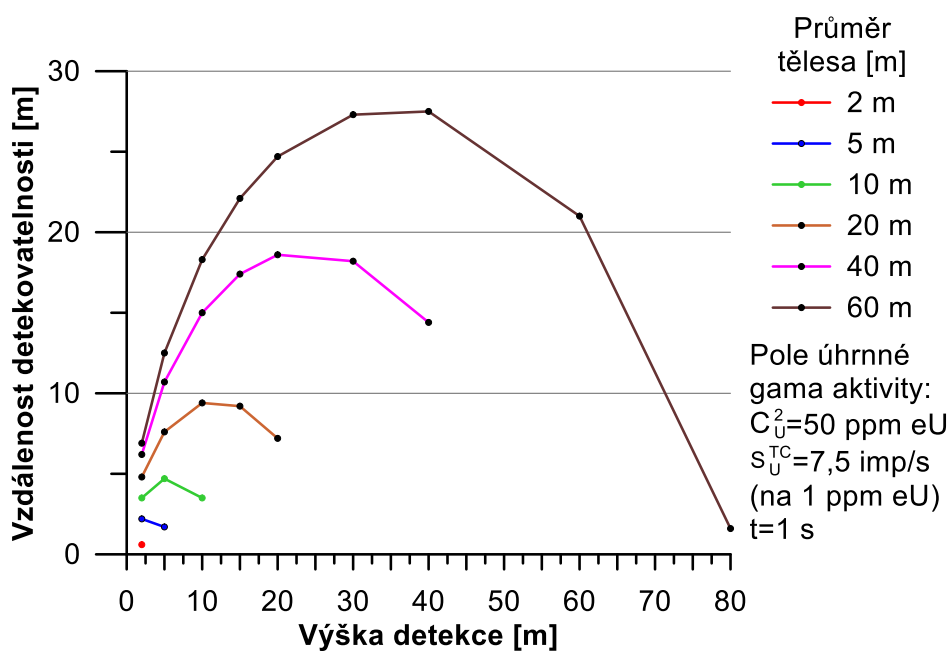
Na Obr. 81 až Obr. 86 jsou zobrazeny vzdálenosti detekovatelnosti od okraje modelových anomálních těles pro čas měření $t=1$ s. Citlivosti pro stanovení vzdálenosti detekovatelnosti pro parametry odpovídající mini-leteckému průzkumu byly uvažovány podle přístroje D230A jako 18,86 imp/s na 1 % K, 7,52 imp/s na 1 ppm eU a 3,64 imp/s na 1 ppm eTh. Takto zvolené parametry odpovídají mini-leteckému průzkumu s rychlostí letu 1 m/s s frekvencí záznamu 1 s.

Obr. 81 pro nízkou koncentraci U v anomálním tělese 10 ppm eU ukazuje, že možnosti lokalizace takového tělesa s malým průměrem jsou omezené na bezprostřední blízkost tělesa a nízkou výšku letu. Těleso o takovéto koncentraci U s průměrem 2 m by nebylo vůbec detekovatelné. Nejrozsáhlejší anomální těleso s průměrem 60 m lze detekovat do výšky letu 30 m nad jeho centrální částí, neuvažujeme-li další statistické zpracování profilových dat.

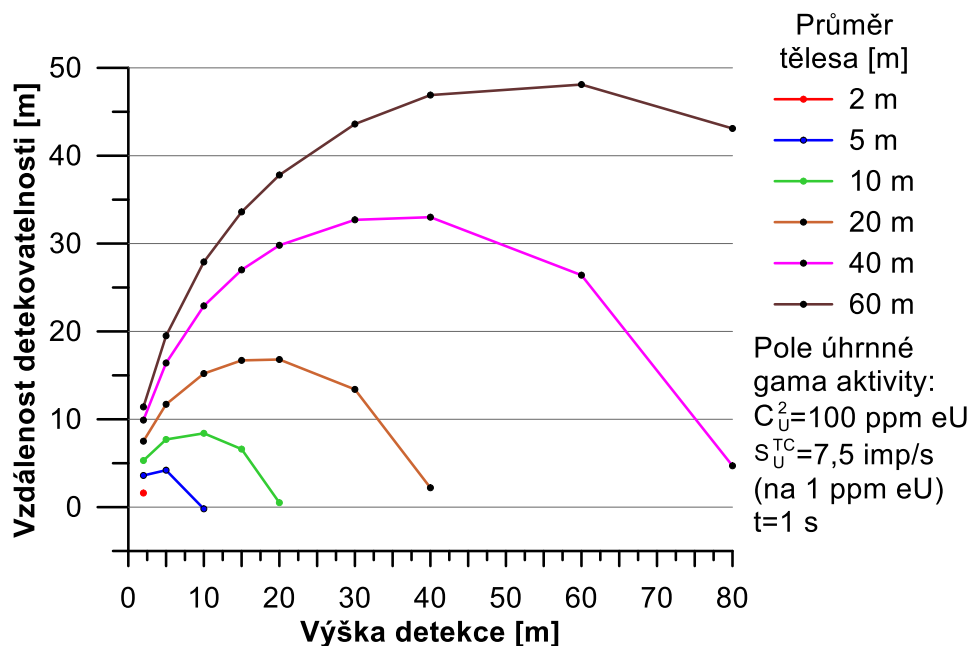
Výsledky ukazují, pro zadané parametry, že vzdálenost detekovatelnosti od okraje anomálního tělesa i optimální výška detekce nad zemí pro hodnocení pole úhrnné gama aktivity jsou vyšší, než při hodnocení gama záření v okně uranu.



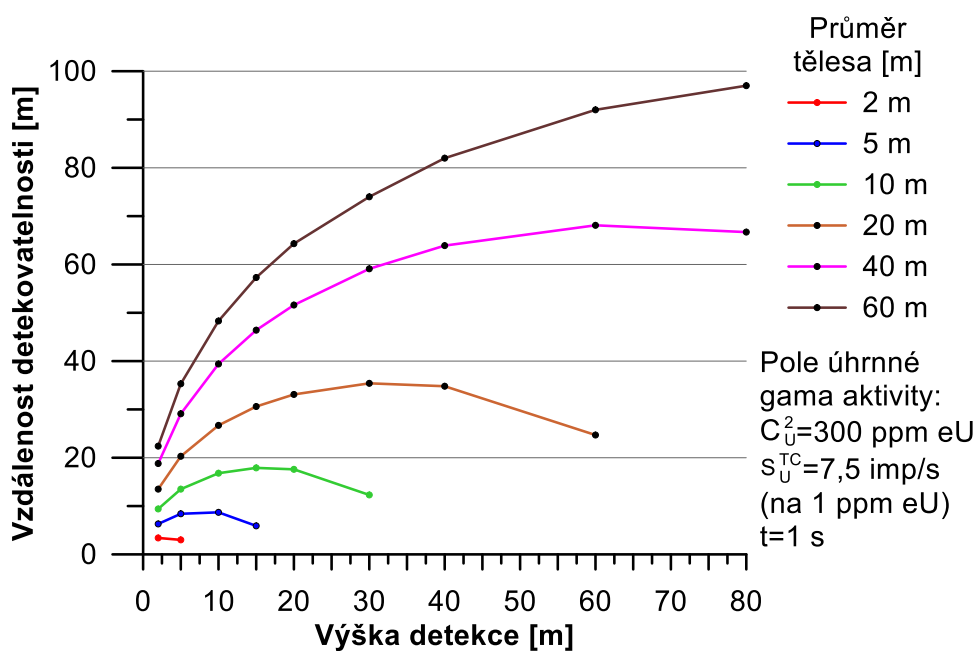
Obr. 81. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 10 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 7,52 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



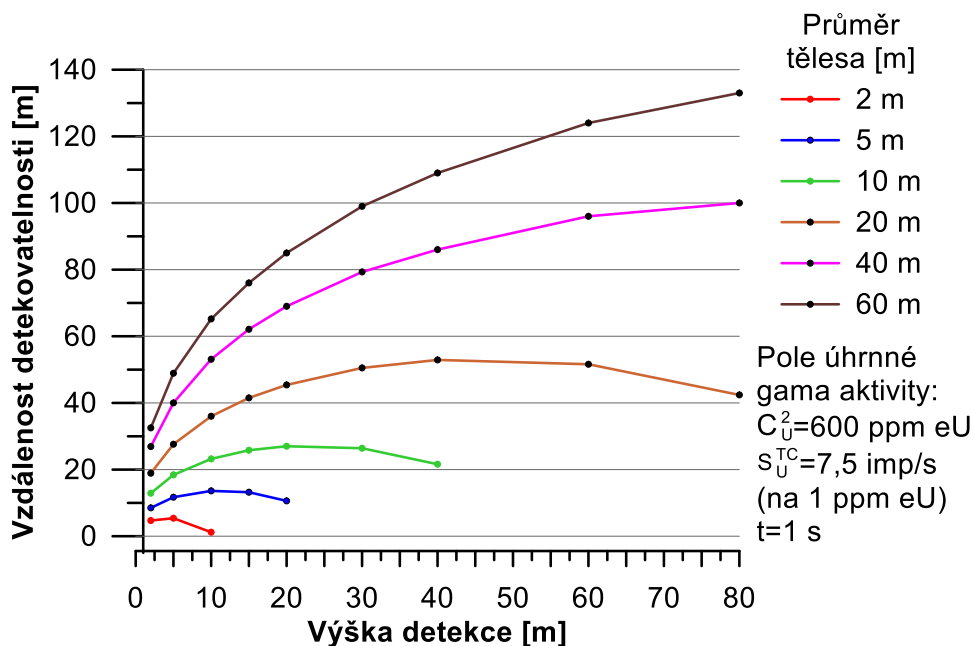
Obr. 82. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 50 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 7,52 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



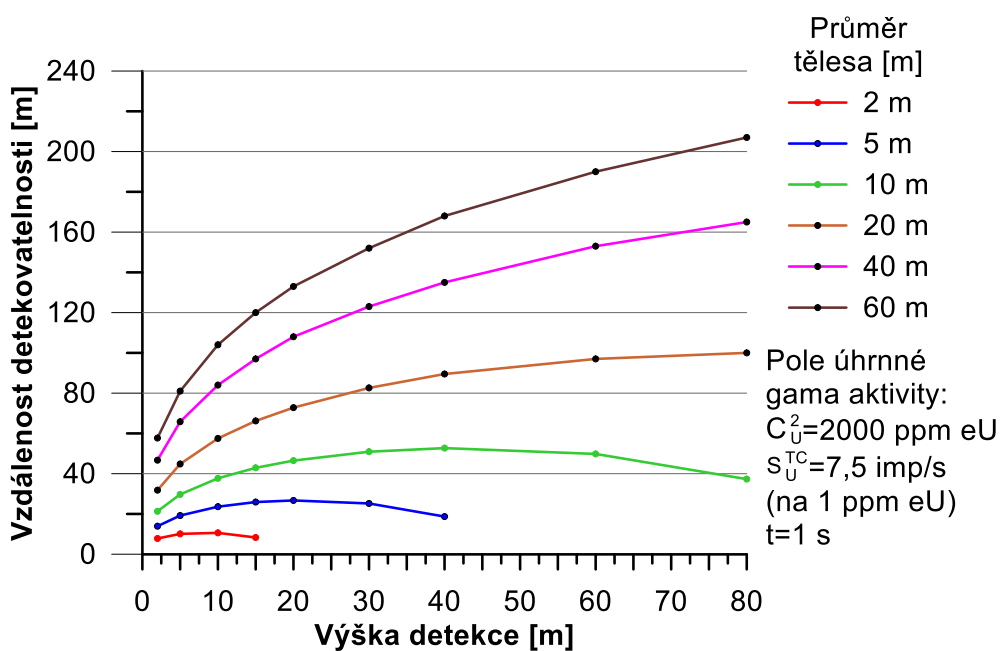
Obr. 83. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 100 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 7,52 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 84. Vzdálenosti detekovatelnosti od okraje různě velkých kruhových radioaktivních těles pro koncentraci U v anomálním tělese 300 ppm eU. Doba měření $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro úhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 7,52 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 85. Vzđálenosti detekovatelnosti od okraje řůzně velkých kruhových radioaktivních řtěles pro koncentraci U v anomálním řtělese 600 ppm eU. Doba měřenř $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro řůhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 7,52 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.



Obr. 86. Vzđálenosti detekovatelnosti od okraje řůzně velkých kruhových radioaktivních řtěles pro koncentraci U v anomálním řtělese 2000 ppm eU. Doba měřenř $t=1 \text{ s}$. Citlivost pro řůhrnnou gama aktivitu $S_U^{TC} = 7,52 \text{ imp/s}$ na 1 ppm eU.

7.5 Optimální výška detekce gama záření pro lokalizaci modelových radioaktivních objektů

Optimální výška detekce nad zemí, pro kterou je horizontální vzdálenost detekovatelnosti radioaktivního tělesa od jeho okraje největší, závisí mimo jiné na citlivosti přístroje S , době měření t , koncentraci U v pozadí C_U^I a v anomálním tělese C_U^2 . Pro zpracování úlohy pro měření úhrnné gama aktivity je součástí okolního pozadí také gama záření ^{40}K a thoriové přeměnové řady. Všechny tyto parametry se projevují na velikosti relativní intenzity gama záření, $i(x)$, pro vzdálenost detekovatelnosti tělesa v bodě x , $i(x)=^U i_{2\sigma}$ nebo $i(x)=^{TC} i_{2\sigma}$, viz kapitoly 7.1 a 7.2, vztah (12) resp. (14).

Závislost optimální výšky detektoru modelových anomálních těles na parametrech průzkumu, na průměru modelového kruhového tělesa a na jeho koncentraci U lze zobecnit pomocí parametru $^U i_{2\sigma}$ resp. $^{TC} i_{2\sigma}$ při zanedbání útlumu gama záření ve vzduchu. Pro posouzení závislosti optimální výšky detekce modelových těles na parametrech průzkumu je třeba použít veličinu na výšce detekce nezávislou, tedy uvažovat hodnotu integrálně exponenciální funkce druhého řádu $E_2=1$. Veličiny $^U i_{2\sigma}$ a $^{TC} i_{2\sigma}$ po zanedbání útlumu gama záření ve vzduchu jsou označeny $^U i_{2\sigma}^0$ a $^{TC} i_{2\sigma}^0$ a platí:

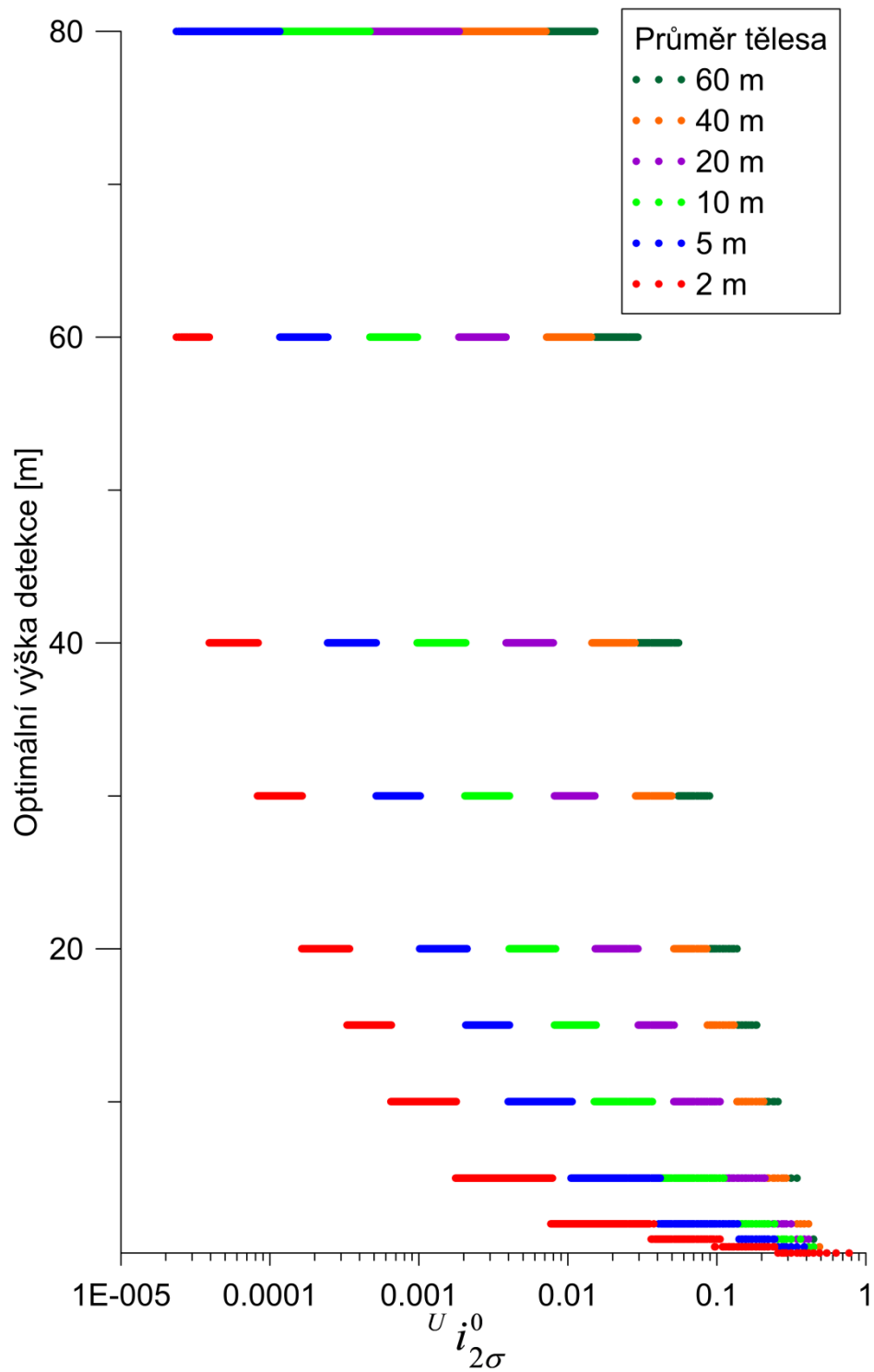
$$^U i_{2\sigma}^0 = \frac{2\sqrt{N_P^U}}{C_U^2 \times S_U^U \times t} = \frac{2\sqrt{C_U^1 \times S_U^U \times t}}{C_U^2 \times S_U^U \times t} \quad (15)$$

$$^{TC} i_{2\sigma}^0 = \frac{2\sqrt{N_P^{TC}}}{C_U^2 \times S_U^{TC} \times t} = \frac{2\sqrt{(C_K \times S_K^{TC} + C_U^1 \times S_U^{TC} + C_{Th} \times S_{Th}^{TC}) \times t}}{C_U^2 \times S_U^{TC} \times t} \quad (16)$$

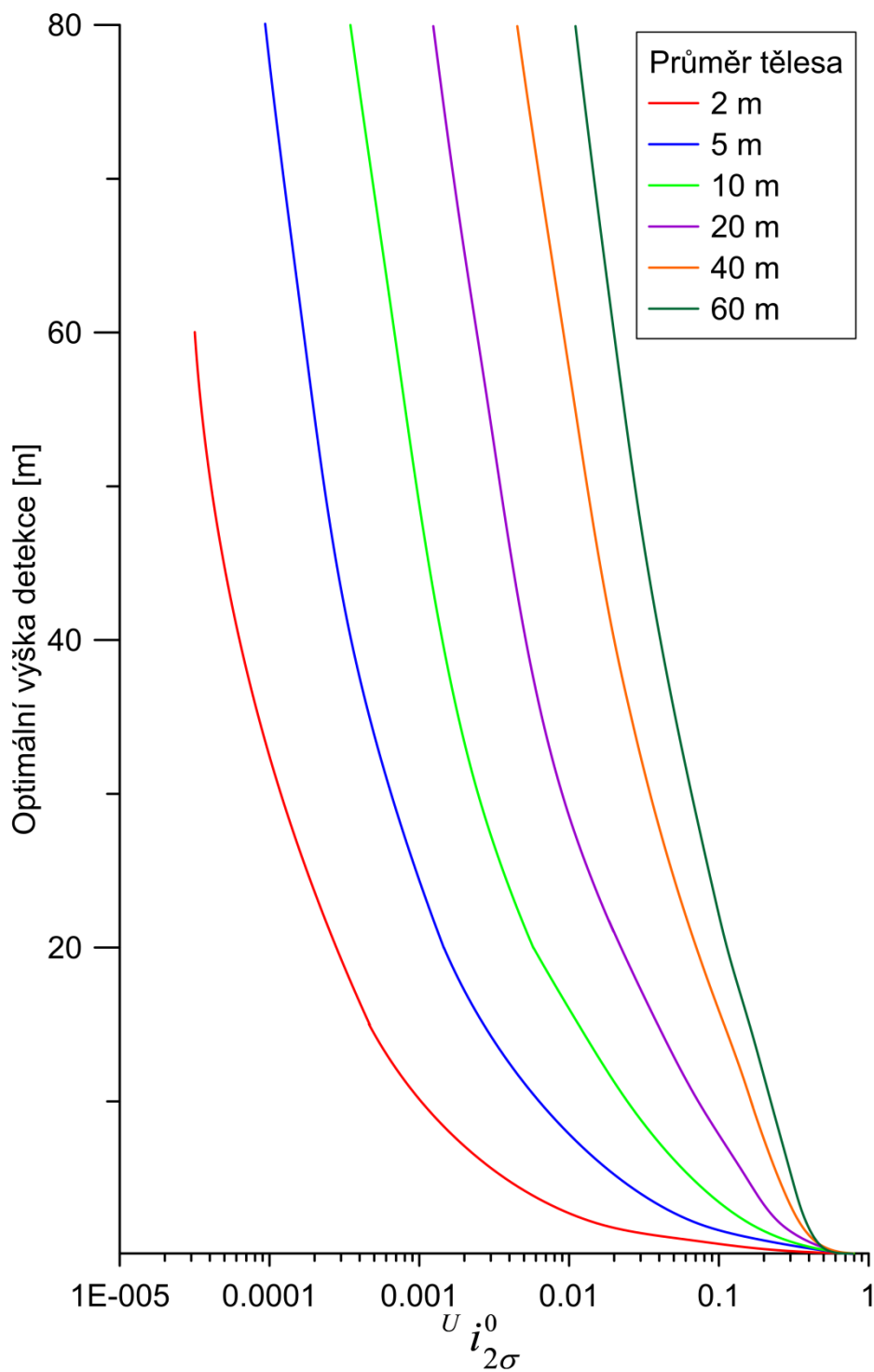
Závislost optimální výšky detekce modelových těles na parametru $^U i_{2\sigma}^0$ resp. $^{TC} i_{2\sigma}^0$ byla vynesena pro všechny uvažované kombinace parametrů průzkumu a modelových radioaktivních těles pro pole gama záření v okně uranu a v intervalu úhrnné gama aktivity (Obr. 87. a Obr. 89). Výpočty byly provedeny pro zvolené výšky detekce, proto jsou výsledné optimální výšky detekce diskrétní veličinou. Diagramy závislosti optimální výšky detekce modelových kruhových těles na parametrech průzkumu a parametrech vyhledávaných kruhových těles pro pole gama záření v okně uranu a pole úhrnné gama aktivity (Obr. 88 a Obr. 90) byly vytvořeny ručním proložením splinů do Obr. 87 resp. Obr. 89. Diagram umožňuje odhadnout optimální výšku detekce pro libovolnou hodnotu $^U i_{2\sigma}^0$ resp. $^{TC} i_{2\sigma}^0$

s využitím vztahů (15) a (16) pro uvedené průměry kruhových těles a do výšky detektoru 80 m.

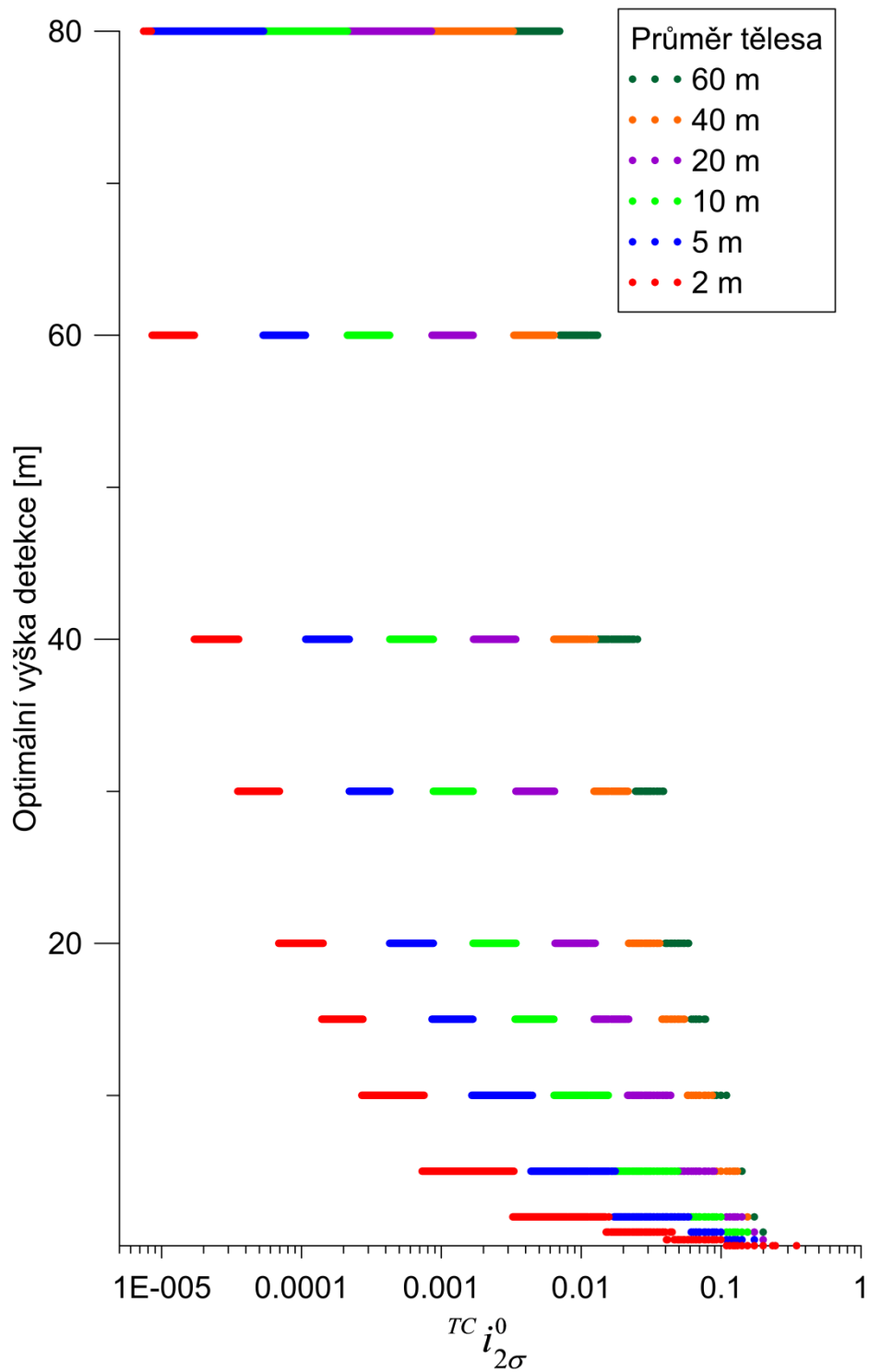
Optimální výšky detektoru při měření úhrnné gama aktivity jsou mírně posunuty na ose x oproti optimálním výškám detektoru pro pole gama záření v zájmovém okně U ve směru k nižším hodnotám $i_{2\sigma}$. V důsledku to znamená větší vzdálenost detekovatelnosti od okraje anomálních objektů při měření pole úhrnné gama aktivity než při měření pole gama záření v zájmovém okně energie U pro stejné hodnoty parametru $i_{2\sigma}$.



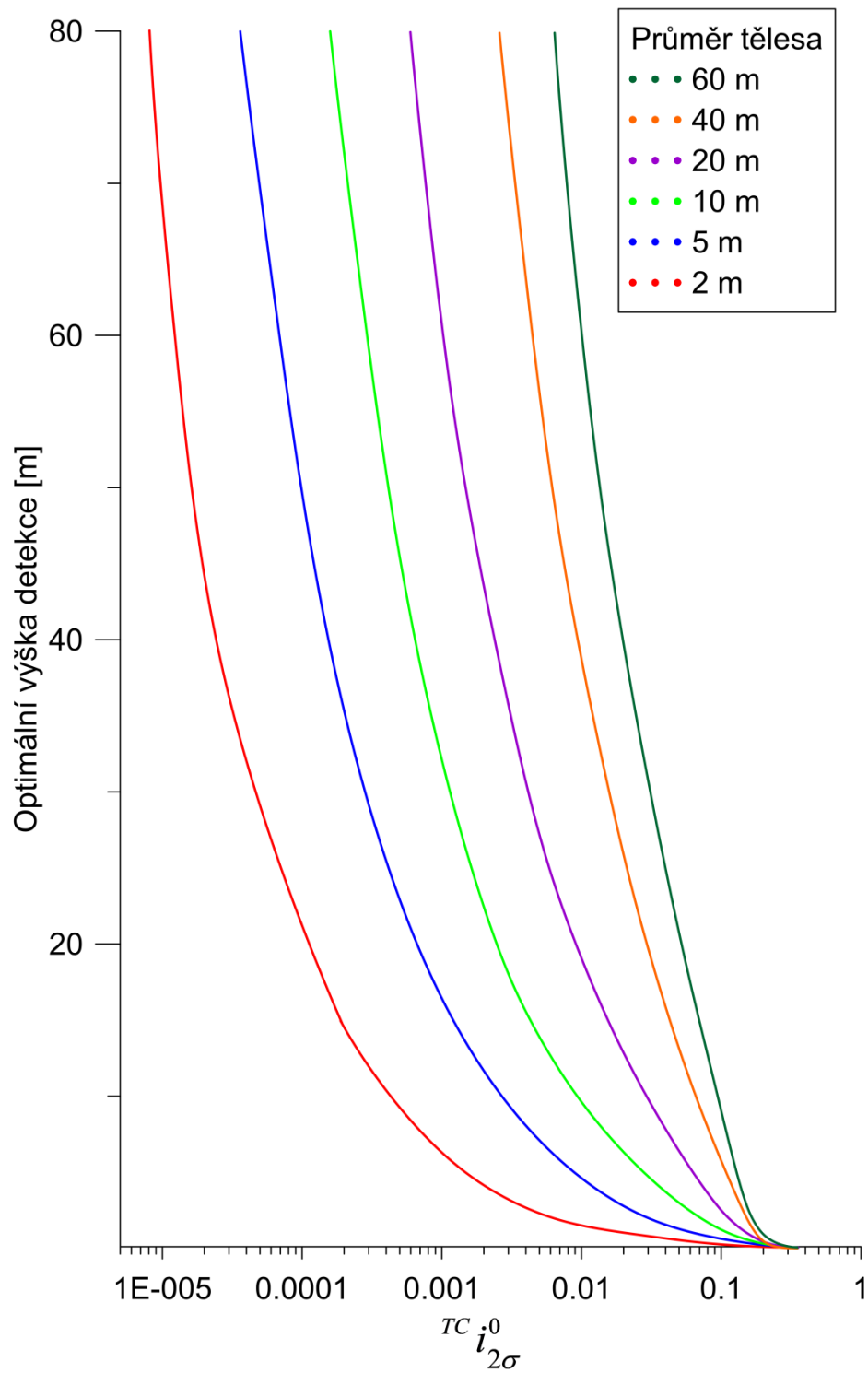
Obr. 87. Závislost optimální výšky detekce pole gama záření modelových kruhových anomálních těles v okně uranu na parametrech průzkumu a anomálních těles vyjádřených pomocí veličiny $U_i^0 / 2\sigma$ pro různé průměry těles.



Obr. 88. Diagram závislosti optimální výšky detekce pole gama záření modelových kruhových anomálních těles v okně uranu na parametrech průzkumu a anomálních těles vyjádřených pomocí veličiny $U i_{2\sigma}^0$ pro různé průměry těles.



Obr. 89. Závislost optimální výšky detekce pole gama záření modelových kruhových anomálních těles v okně úhrnné gama aktivity na parametrech průzkumu a anomálních těles vyjádřených pomocí veličiny $TC i_{2\sigma}^0$ pro různé průměry těles.



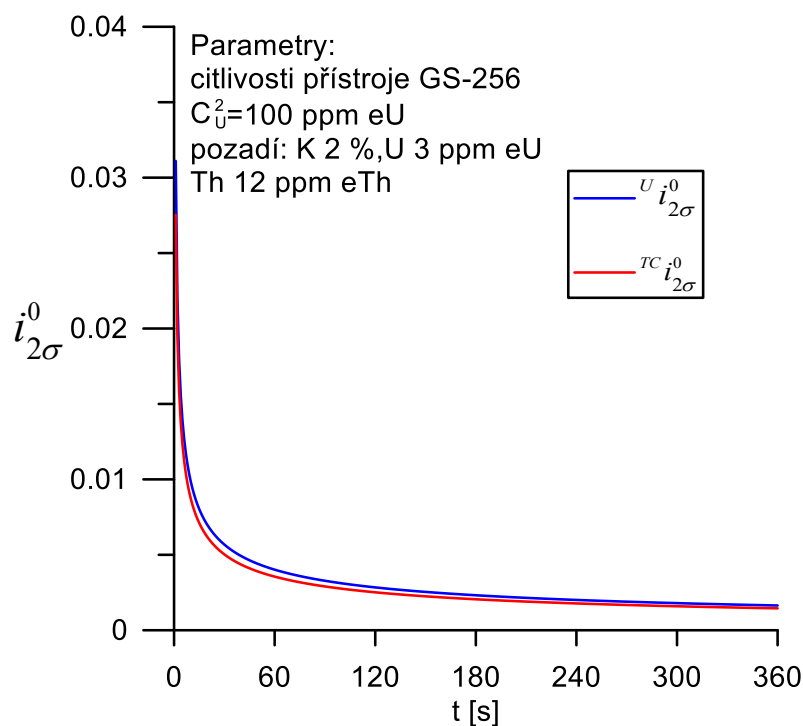
Obr. 90. Diagram závislosti optimální výšky detekce pole gama záření modelových kruhových anomálních těles v okně úhrnné gama aktivity na parametrech průřezu a anomálních těles vyjádřených pomocí veličiny $TC i_{2\sigma}^0$ pro různé průměry těles.

7.6 Vliv času měření na vzdálenost detekovatelnosti modelových radioaktivních objektů

Citlivost gama spektrometrů k detekci uranu v okně úhrnné gama aktivity S_U^{TC} je násobně větší, než citlivost spektrometrů k detekci uranu v uranovém okně energií S_U^U . Ve vztazích (12) a (14) se tato skutečnost projeví tak, že za stejnou dobu měření, stejným přístrojem ve stejné geometrii měření bude hodnota relativní intenzity gama záření ${}^{TC}i_{2\sigma}$ nižší, než hodnota ${}^U i_{2\sigma}$.

Příklad závislosti parametrů ${}^U i_{2\sigma}$ a ${}^{TC}i_{2\sigma}$ na době měření t pro zvolené citlivosti odpovídající přístroji GS-256 v geometrii měření na zemi ($S_U^U=0,31$ imp/s na 1 ppm eU, $S_K^{TC}=8,06$ imp/s na 1 % K, $S_U^{TC}=2,19$ imp/s na 1 ppm eU a $S_{Th}^{TC}=1,14$ imp/s na 1 ppm eTh), anomální koncentraci uranu 100 ppm eU a hodnotě pozadí odpovídající 2 % K, 3 ppm eU a 12 ppm eTh je zobrazen na Obr. 91, z kterého je patrné, že hodnota $i_{2\sigma}$ relativní intenzity gama záření s rostoucí dobou měření klesá. Pokles má charakter blížící se průběhu logaritmické funkce.

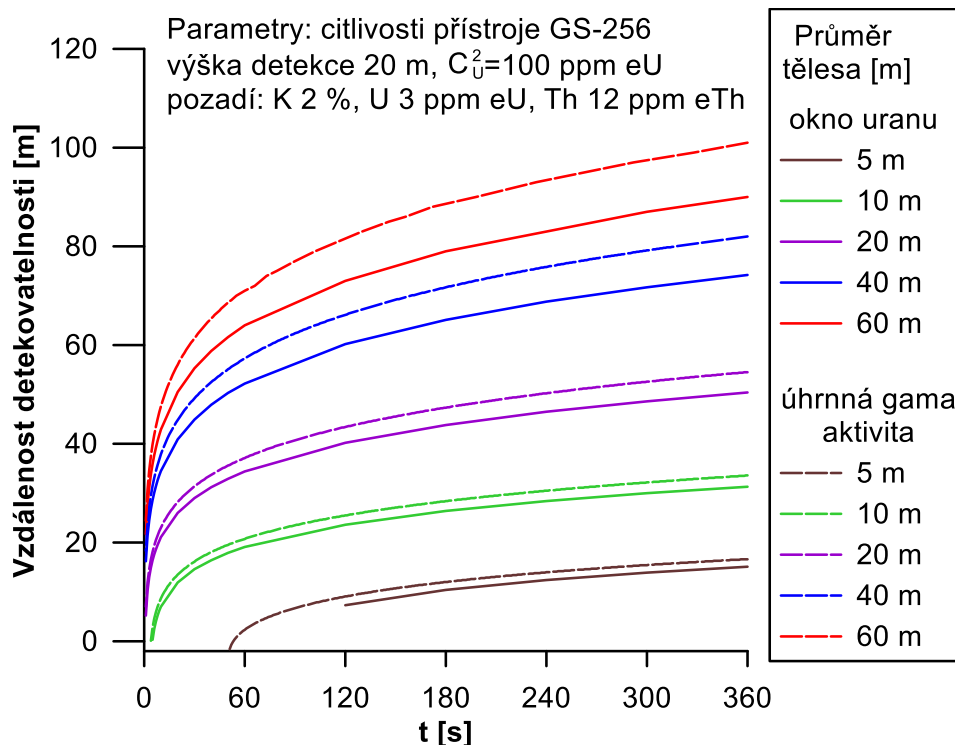
Pro pole úhrnné gama aktivity je v důsledku vyšší citlivosti S_U^{TC} , i přes vyšší pozadí v okně úhrnné gama aktivity od draslíku a thoria, hodnota ${}^{TC}i_{2\sigma}^0$ nižší, než hodnota ${}^U i_{2\sigma}^0$ pro pole gama záření v intervalu zájmového okna uranu.



Obr. 91. Závislost parametrů $U i_{2\sigma}^0$ a $TC i_{2\sigma}^0$ na době měření t pro zvolené parametry měření přístroji GS-256 v geometrii měření na zemi.

Vyšší četnost detekovaných impulzů a současně pomalejší pokles pole úhrnné gama aktivity modelových těles s výškou detekce ve srovnání s polem gama záření v okně uranu způsobují, že vzdálenost detekovatelnosti modelového anomálního tělesa je, při stejné době měření, delší pro úhrnnou gama aktivitu, než pro detekci gama záření v okně uranu.

Jako příklad je uvedena závislost vzdálenosti detekovatelnosti od kraje kruhového anomálního tělesa na době měření pro výšku detekce 20 m, citlivosti odpovídající přístroji GS-256, anomální koncentraci uranu 100 ppm eU a pozadí odpovídající 2 % K, 3 ppm eU a 12 ppm eTh. Z grafu (Obr. 92) je patrné, že vzdálenost detekovatelnosti modelových těles pro pole úhrnné gama aktivity je vyšší, než pro pole gama záření okna uranu. S dobou měření vzdálenost detekovatelnosti roste přibližně logaritmicky. Při stejné době měření umožňuje detekce úhrnné gama aktivity, pro zadané předpoklady, lokalizovat anomální těleso na větší vzdálenost.



Obr. 92. Závislost vzdálenosti detekovatelnosti modelového tělesa od jeho okraje na době měření pro výšku detekce 20 m a uvedené parametry.

7.7 Detekce modelových radioaktivních objektů standardním leteckým průzkumem

V předchozích kapitolách byly uvedeny vzdálenosti detekovatelnosti modelových těles pro statické měření nebo pro měření s velmi malou rychlostí letu, při které lze pohyb detektoru v poli gama záření, během intervalu záznamu dat, zanedbat.

V případě standardního leteckého průzkumu při rychlosti kolem 50 m/s (IAEA, 2003) nelze zanedbat pohyb detektoru v poli gama záření během intervalu záznamu dat, který je obvykle 1 s (IAEA, 1991). Při rychlosti letu 50 m/s a intervalu záznamu dat 1 s je v jednom zaznamenaném spektru gama záření integrován signál z 50 m úseku letu.

Možnosti lokalizace modelových kruhových těles s průměrem 2 m až 60 m ve výšce letu 20 m až 80 m a pro koncentrace uranu v tělese 10 až 2000 ppm eU byly posouzeny pro ideální situaci, ve které střed intervalu záznamu leží nad středem modelového tělesa. Pole gama záření modelového tělesa přispívá spolu s pozadím k celkovému počtu registrovaných impulzů. Příspěvek gama záření od modelového tělesa byl vypočítán jako průměrná hodnota relativní intenzity gama záření $U_{i(\pm 25)}$ v intervalu záznamu, odpovídající metráži $x = -25$ m až 25 m (Obr. 45 až Obr. 50, kapitola 6).

Možnosti lokalizace modelových těles byly posouzeny pro parametry standardního leteckého gama spektrometru NaI(Tl) 32 l s citlivostí 8 imp/s na 1 ppm eU ve výšce letu 80 m v zájmovém okně uranu. Koncentrace uranu v běžných horninách ve zkoumaném území byla uvažována 3 ppm eU a jako kritérium anomality byla uvažována hodnota $N_{2\sigma}$ (10).

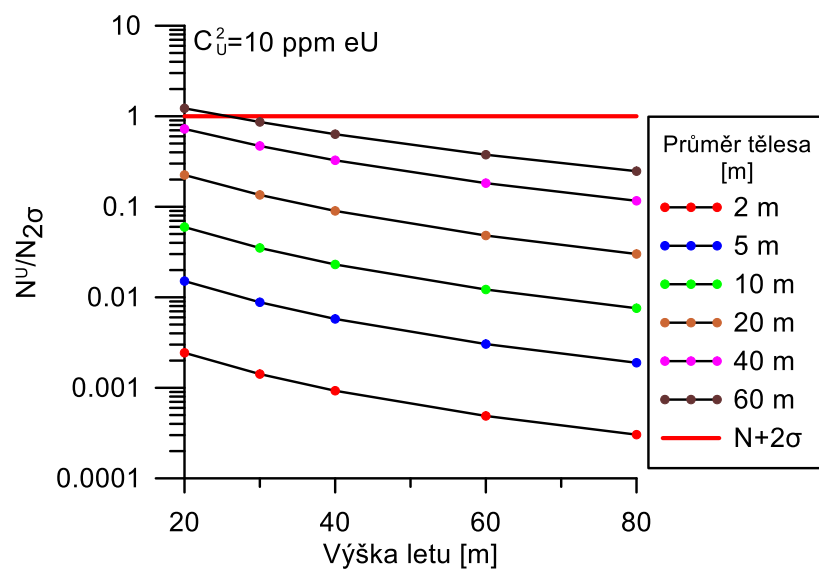
Běžnou úroveň radioaktivity hornin v počtu impulzů N_P^U v zájmovém okně uranu za dobu 1 s a v dané výšce letu lze vyjádřit jako:

$$N_P^U = C_U^1 \times S_U^U \times E_2^U [\text{imp}]$$

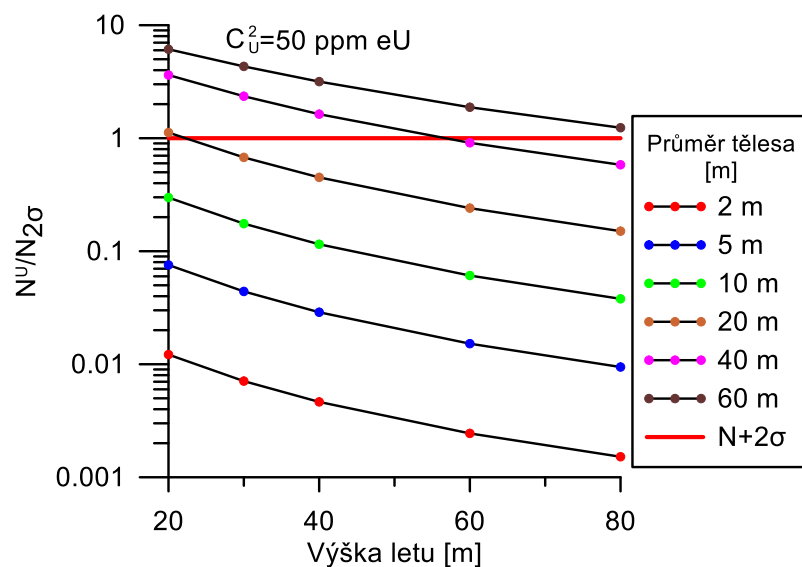
Počet impulzů, generovaných modelovým tělesem, registrovaných v intervalu záznamu dat 1 s nad středem modelového tělesa byl stanoven jako:

$$N^U = {}^U i(\pm 25) \times C_U^2 \times S_U^U \quad (17)$$

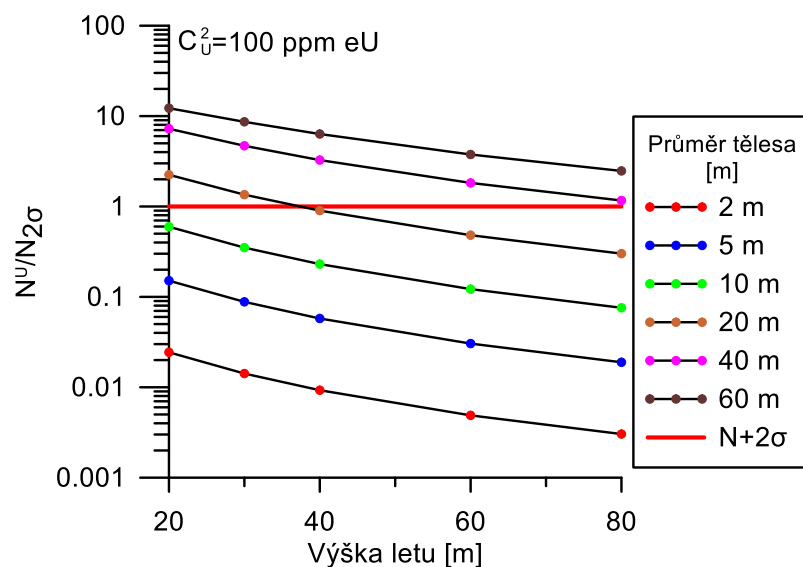
Možnosti lokalizace modelových kruhových těles pomocí standardního leteckého průzkumu byly posouzeny pomocí poměru $N^U/N_{2\sigma}$, vztahy (17) a (10), který je zobrazen pro různé koncentrace uranu v anomálním tělese na Obr. 93 až Obr. 98. Hodnoty menší než jedna znamenají nemožnost odlišit anomálii od běžné úrovně radioaktivity hornin. Hodnoty rovné jedné znamenají pravděpodobné detekování anomálie na hladině 95,5 % v ideální situaci, kdy střed intervalu záznamu leží nad středem modelového anomálního tělesa. Pro hodnoty větší než jedna roste pravděpodobnost lokalizace anomálie v obecné situaci polohy letového profilu mimo střed radioaktivního objektu.



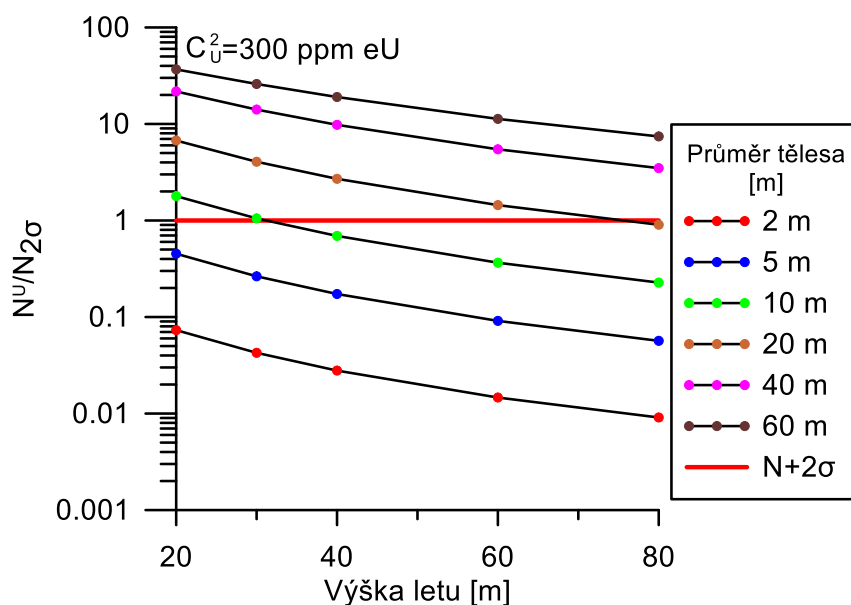
Obr. 93. Možnosti lokalizace modelových kruhových těles různého průměru standardním leteckým průzkumem v různé výšce letu pro kritérium $N^U/N_{2\sigma} > 1$. Anomální koncentrace uranu 10 ppm eU.



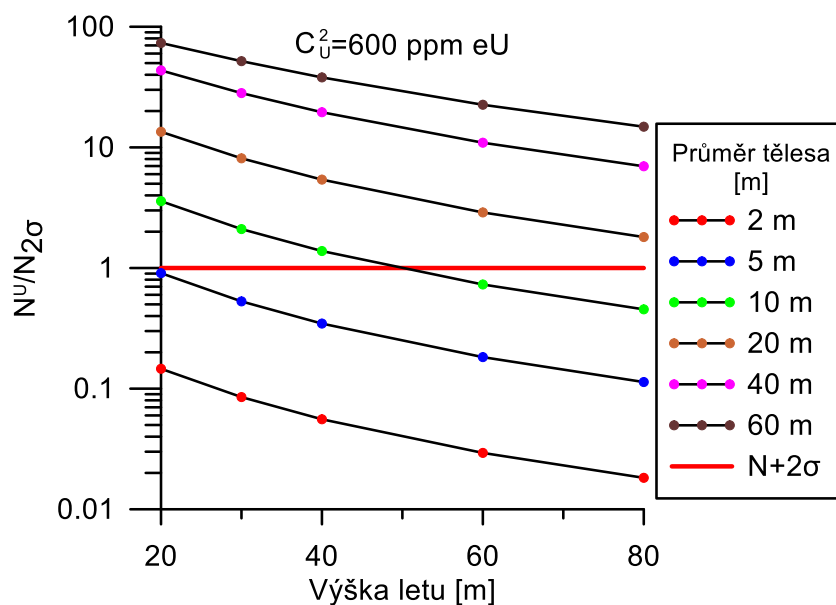
Obr. 94. Možnosti lokalizace modelových kruhových těles různého průměru standardním leteckým průzkumem v různé výšce letu pro kritérium $N^U/N_{2\sigma} > 1$. Anomální koncentrace uranu 50 ppm eU.



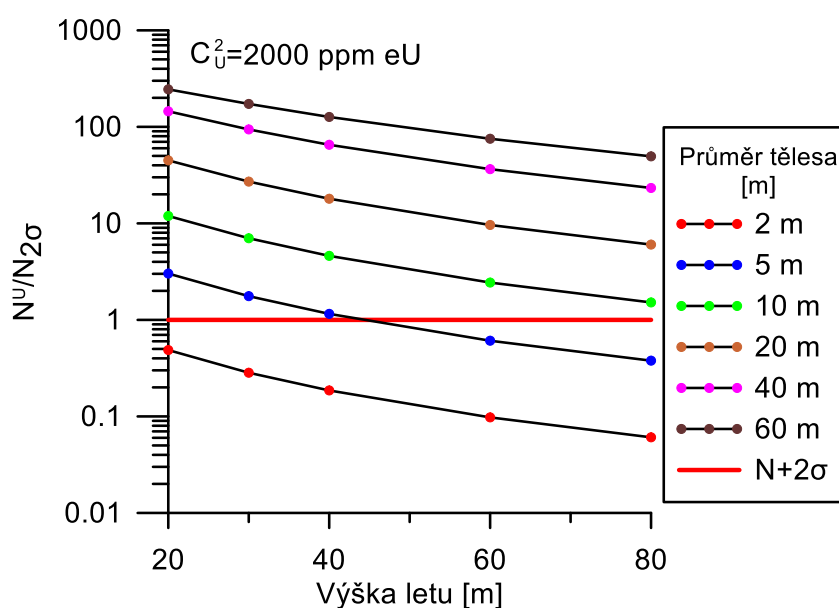
Obr. 95. Možnosti lokalizace modelových kruhových těles různého průměru standardním leteckým průzkumem v různé výšce letu pro kritérium $N^U/N_{2\sigma} > 1$. Anomální koncentrace uranu 100 ppm eU.



Obr. 96. Možnosti lokalizace modelových kruhových těles různého průměru standardním leteckým průzkumem v různé výšce letu pro kritérium $N^U/N_{2\sigma} > 1$. Anomální koncentrace uranu 300 ppm eU.



Obr. 97. Možnosti lokalizace modelových kruhových těles různého průměru standardním leteckým průzkumem v různé výšce letu pro kritérium $N^U/N_{2\sigma} > 1$. Anomální koncentrace uranu 600 ppm eU.



Obr. 98. Možnosti lokalizace modelových kruhových těles různého průměru standardním leteckým průzkumem v různé výšce letu pro kritérium $N^U/N_{2\sigma} > 1$. Anomální koncentrace uranu 2000 ppm eU.

Možnosti lokalizace modelových anomálních těles pomocí standardního leteckého průzkumu se ukázaly jako blízké možnostem mini-leteckého průzkumu s detektorem D230A (kapitola 8.2.3).

Anomální objekty uvažovaných rozměrů s koncentrací uranu 10 ppm eU není možné detekovat standardním leteckým průzkumem ve výšce 30 – 80 m.

Těleso s koncentrací uranu 50 ppm eU a průměrem 60 m by již bylo možné detekovat za ideálních podmínek ve výšce 80 m. V nízké výšce letu 30 – 40 m by bylo možné detekovat i těleso s menším průměrem 40 m.

Anomální těleso s koncentrací uranu 100 ppm eU by bylo možné detekovat leteckým průzkumem, pokud by mělo průměr alespoň 40 m. V nízké výšce letu 30 m by bylo možné teoreticky detekovat i těleso s menším průměrem 20 m.

Anomální těleso s koncentrací uranu 300 ppm eU by bylo možné teoreticky detekovat leteckým průzkumem, pokud by mělo průměr větší než 20 m.

Anomální těleso s koncentrací uranu 600 ppm eU a s průměrem aspoň 20 m by bylo možné detekovat leteckým průzkumem, v nízké výšce letu 30 – 40 m by bylo možné teoreticky detekovat i těleso s menším průměrem 10 m.

Anomální těleso s koncentrací uranu 2000 ppm eU by bylo možné detekovat leteckým průzkumem, pokud by mělo průměr alespoň 10 m. V nízké výšce letu 30 – 40 m by bylo možné teoreticky detekovat i těleso s průměrem 5 m.

7.8 Diskuze

Uvedený postup stanovení vzdálenosti detekovatelnosti anomálních těles uvažuje fluktuační pole gama záření běžných hornin N_p a neuvažuje fluktuační pole gama záření anomálních objektů. Vzdálenost detekovatelnosti $x_{2\sigma}$ je možné chápat jako průměrnou hodnotu vzdálenosti detekovatelnosti.

V práci jsou uvažována modelová anomální tělesa kruhového tvaru s různým průměrem. Tvar reálných přírodních anomálií koncentrace uranu nebývá obvykle pravidelný izometrický. Výškový gradient intenzity gama záření nad protáhlými anomáliemi koncentrace uranu se stejnou plochou je větší než nad izometrickými tělesy (Matolín, 1963). Na rozdíl od modelových těles jsou přírodní anomálie koncentrace uranu obvykle v ploše nehomogenní.

Terénní nerovnosti, elevace a deprese reliéfu ovlivňují výrazně geometrii měření a získaná radiometrická data (IAEA, 2003). Tato práce uvažuje pouze geometrii měření nad rovinným povrchem. Modelováním pole gama záření nad nerovným reliéfem a opravou radiometrických dat na vliv reliéfu se zabýval např. Schwarz et al. (1992).

8 Závěr

Práce se zabývá polem gama záření lokálních anomálií koncentrace uranu a možnostmi jejich lokalizace terénním radiometrickým měřením. Pole gama záření prudce slábne se vzdáleností od zdroje radioaktivity. Možnosti lokalizace anomálních zdrojů radioaktivity v poli běžného přírodního pozadí jsou výsledkem zvolené metodiky radiometrického průzkumu.

Pole gama záření a možnosti lokalizace anomálních zdrojů radiometrickým měřením pro různé parametry anomálních objektů a různou metodiku radiometrického průzkumu byly studovány pomocí modelových výpočtů. Způsob modelování pole gama záření byl odvozen, pro účely této práce, z teoretického vztahu pro popis pole gama záření bodového zdroje ve dvouvrstevném prostředí. Popsaná deterministická metoda výpočtu využívá zjednodušeného monoenergetického přístupu pro výpočet pole gama záření. Aplikovatelnost metody byla ověřena pomocí terénních experimentů na třech lokalitách s anomáliemi koncentrace uranu. Vypočtené hodnoty pole gama záření v různých výškách detekce nad zemí uspokojivě souhlasí s experimentálními daty pozemního a mini-leteckého měření. Popsanou metodu modelování lze použít pro výpočty pole gama záření v různé výšce detekce nad pozemním zdrojem radioaktivity s libovolně definovanou koncentrací uranu.

Možnosti lokalizace radioaktivních objektů byly zkoumány pomocí modelových výpočtů pole gama záření pro různé parametry anomálních kruhových těles a pro různou metodiku měření. Byla uvažována kruhová tělesa s různým průměrem v rozmezí 2 m až 60 m a s různou koncentrací uranu v rozmezí 10 ppm eU až 2000 ppm eU. Výška detekce gama záření byla uvažována v intervalu od země do 80 m nad zemí. Výška detekce do 2 m odpovídá pozemnímu průzkumu. Výšky detekce nad 2 m odpovídají mini-leteckému průzkumu a výšky detekce nad 30 m jsou vypovídající také pro klasický aeroradiometrický průzkum. Byla uvažována různá citlivost detektoru v širokém rozsahu odpovídajícím malým ručním až velkým leteckým detektorům a také různá doba měření od 1 s do 360 s.

Pro každý modelový objekt definovaný jeho průměrem a obsahem uranu byla vypočtena vzdálenost detekovatelnosti objektu pro všechny kombinace citlivosti přístroje, času měření a výšky detekce.

Výsledky pro pozemní průzkum ukazují, že s výjimkou málo radioaktivních objektů, s koncentrací uranu kolem 10 ppm eU, vzdálenost detekovatelnosti roste s výškou měření. Výhodné je tedy provádět pozemní měření nad zemí ve výšce kolem 2 m. Vzdálenosti

detekovatelnosti při pozemním měření se pohybují do jednotek až desítek metrů. Delší doba měření 4–6 minut se projeví několikanásobnou vzdáleností detekovatelnosti objektu oproti krátké několikasekundové době měření.

Posouzení možností mini-leteckého měření bylo provedeno pro uvažované parametry odpovídající gama spektrometru Georadis D230A s BGO detektorem o objemu 0,2 litru, použitému pro experimentální část práce. Výsledky pro mini-letecký průzkum ukázaly, že obecně s rostoucí výškou detekce vzdálenost detekovatelnosti anomálního objektu nejdříve roste, v určité výšce dosáhne maxima (optimální výška detekce) a s pokračujícím nárůstem výšky opět klesá. Ke každému radioaktivnímu objektu studovanému danou metodikou měření lze stanovit optimální výšku detekce podle kapitoly 7.5.

Možnosti detekce radiometrických anomálií pro standardní letecký průzkum, kde je nutné počítat s vysokou rychlostí pohybu detektoru, je nutné posoudit odlišným způsobem než statický nebo pomalý mini-letecký průzkum. Možnosti lokalizace modelových kruhových objektů s průměrem 2 m až 60 m ve výšce letu 20 m až 80 m a pro koncentrace uranu v anomálním objektu 10 až 2000 ppm eU byly posouzeny pro ideální situaci standardního leteckého průzkumu, ve které střed intervalu záznamu leží nad středem modelového objektu. Možnosti lokalizace modelových objektů pomocí standardního leteckého průzkumu s detektorem NaI(Tl) 32 litrů s rychlostí letu 50 m/s se ukázaly jako blízké možnostem mini-leteckého průzkumu s detektorem D230A s rychlostí letu 1 m/s.

Možnosti lokalizace pole gama záření modelových anomálních těles byly studovány pro měření gama záření zájmového okna uranu 1,76 MeV a pro interval energií úhrnné gama aktivity. Výsledky ukázaly, že vzdálenost detekovatelnosti anomálního tělesa při zpracování úhrnné gama aktivity je větší, pro zadané předpoklady, než vzdálenost detekovatelnosti při zpracování energií uranového okna. Rozdíl je řádově do výše prvních desítek procent. Příčinou je vyšší přesnost měření a také pomalejší úbytek gama záření s výškou.

Výsledky práce je možné využít při navrhování optimální metodiky radiometrického průzkumu v konkrétních podmínkách.

9 Literatura:

- Afzal, P., Zarifi, A.Z., Yasrebi, A.B., 2012. Identification of uranium targets based on airborne radiometric data analysis by using multifractal modeling, Tark and Avanligh 1:50 000 sheets, NW Iran. *Nonlin. Process. Geophys.* 19, 283–289. www.nonlinprocesses-geophys.net/19/283/2012/.
- Akerblom, G., 1995. The use of airborne radiometric and exploration survey data and technique in radon risk mapping in Sweden. *Application of Uranium Exploration Data and Techniques in Environmental Studies*, IAEA-TECDOC-827, IAEA, Vienna, 159-180.
- Appleton, J.D., Miles, J.C.H., Green, B.M.R., Larmour, R., 2008. Pilot study of the application of Tellus airborne radiometric and soil geochemical data for radon mapping. *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (2008) 1687-1697. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.03.011>
- Barnet, I., 1995. The role of airborne gamma spectrometric data in the radon programme of the Czech Republic. *Application of Uranium Exploration Data and Techniques in Environmental Studies*, IAEA-TECDOC-827, IAEA, Vienna, 151-157.
- Berger, M.J., Hubbell, J.H., Seltzer, S.M., Chang, J., Coursey, J.S., Sukumar, R., Zucker, D.S., Olsen, K. 2010. XCOM: Photon Cross Section Database (version 1.5). [Online] Přístup z: <http://physics.nist.gov/xcom> [1. 4. 2018]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Billings, S.D., Hovgaard, J., 1999. Modeling detector response in airborne gamma ray spectrometry. *Geophysics*, 64, 1378-1392.
- Bristow, Q., 1978. The application of airborne gamma ray spectrometry in the search for radioactive debris from the Russian satellite COSMOS 954 (Operation “Morning Light”). *Geological Survey of Canada, Papers No. 78-1B*, 151-162.
- Clark, S.P., Peterman, Z.E., Heier, K.S. (1966). Abundances of uranium, thorium and potassium, *Handbook of Physical Constants*, Geol. Soc. Am. Mem. 47.
- Cook, S.E., Corner, R.J., Groves, P.R., Grealish, G.J., 1996. Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. *Aust. J. Soil Res.*, v. 34, 183-194.
- Česká geologická služba, 2018. Geologická mapa 1:25000, list 03-322 Jablonec nad Nisou [online] přístup z: http://mapy.geology.cz/geocr_25/, Česká geologická služba, Praha.
- Davis, J.C., 2002. *Statistics and data analysis in geology*-third edition. John Willey & Sons, New York
- Deal, L.J, Doyle, J.F., Burson, Z.G., Boyns, P.K., 1972. Locating the lost Athena missile in Mexico by the Aerial Radiological Measuring System (ARMS). *Health Physics*, Vol. 23, Pergamon Press, Oxford.

- Falciglia, P.P., Biondi, L., Catalano, R., Immé, G., Romano, S., Vagliasindy, F.G.A., 2017. Preliminary investigation for quali-quantitative characterization of soils contaminated with ^{241}Am and ^{152}Eu by low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with small size γ -ray spectrometer: detection efficiency and minimum detectable activity (MDA) concentration assessment. *J. Soils Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1720-6>.
- Georadis, 2018. Fotodokumentace přístroje [online], přístup z : <http://www.georadis.com/cs/produkty/gt-32.html> [1. 4. 2018].
- Gnojek, I., Přichystal, A., 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma ray spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexplorandum*, 23, 491-502.
- Grant, J.A., 1998. Ten things the textbooks don't tell you about processing and archiving airborne gamma ray spectrometric data. *In Current Research 1998 D. Geological Survey of Canada*, Ottawa, 83-87.
- Grasty R.L., Holman, P.B., Blanchard, Y.B., 1991. Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers. *Geological Survey of Canada*, Paper 90-23.
- Grasty, R.L., 1975. Atmospheric absorption of 2.62 MeV gamma-ray photons emitted from the ground. *Geophysics*, 40, 1058-1065.
- Grasty, R.L., 1979. Gamma ray Spectrometric Method in Uranium Exploration – Theory and Operational Procedures. *In Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores; Geological Survey of Canada*, Economic Geology Report 31, p. 147-161.
- Grasty, R.L., Kosanke, K.L., Foote, R.S., 1979. Fields of view of airborne gamma-ray detectors. *Geophysics*, 44, 1447-1457.
- Grasty, R.L., 1982. Direct snow-water equivalent measurement by airborne gamma ray spectrometry. *Journal of Hydrology*, v. 55, 213-235.
- Grasty, R.L., Minty, B.R.S., 1995. A Guide to the Technical Specifications for Airborne Gamma-ray Surveys. *Australian Geological Survey Organisation Record 1995/60*.
- IAEA, 1979. Gamma-Ray Surveys in Uranium Exploration. IAEA TRS No. 186, IAEA, Vienna.
- IAEA, 1989. Construction and Use of Calibration Facilities for Radiometric Field Equipment. *Technical Reports Series No. 309*, IAEA, Vienna.
- IAEA, 1991. Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying. IAEA TRS No. 323. IAEA, Vienna.
- IAEA, 2003. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363. IAEA, Vienna.
- IAEA, 2010. Radioelement Mapping, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-1.3, IAEA, Vienna.
- IAEA, 2013. Advances in Airborne and Ground Geophysical Methods for Uranium Exploration. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-1.5. IAEA, Vienna.

- King, L. V., 1912. Absorption Problems in Radioactivity. *Philosophical Magazine*, 23, 242-250.
- Kogan, R.M., Nazarov, I.M., Fridman, S.D., 1971. Gamma spectrometry of Natural Environments and Formations. Israel Programme for Scientific Translations.
- Løvborg, L., Kirkegaard, P., 1974. Response of 3"×3" NaI(Tl) detectors to terrestrial gamma radiation. *Nuclear Instruments and Methods* 121, 239-251, North-Holland Publishing Co.
- Løvborg, L., Mose, E., 1987. Counting statistics in radioelement assaying with a portable spectrometer. *Geophysics*, v. 52, n.4, 555-563.
- MacFarlane, J.W., Payton, O.D., Keatley, A.C., Scott, G.P.T., Pullin, H., Crane, R.A., Smilion, M., Popescu, I., Curlea, V., Scott, T.B., 2014. Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies. *J. Environ. Radioact.* 136, 127–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.008>
- Manová, M., Matolín, M., 1995. Radiometrická mapa České Republiky 1:500000. Česká geologická služba, Praha.
- Mareš, S., Gruntorád, J., Hrách, S., Karous, M., Marek, F., Matolín, M., Skopec, J., Válek, R., 1990. Úvod do užité geofyziky. SNTL, Praha.
- Martin, P.G., Moore, J., Fardoulis, J.S., Payton, O.D., Scott, T.B., 2016. Radiological assessment on interest areas on the Sellafield nuclear site via unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.* 8 (11), 913. <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/11/913>.
- Martin, P.G., Payton, O.D., Fardoulis, J.S., Richards, D.A., Scott, T.B., 2015a. The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines. *J. Environ. Radioact.* 143, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.004>.
- Martin, P.G., Payton, O.D., Fardoulis, J.S., Richards, D.A., Yamashiki, Y., Scott, T.B., 2015b. Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident. *J. Environ. Radioact.* 151, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.007>.
- Matolín, M., 1963. Interpretační metoda detailních leteckých radiometrických měření. *Sborník geologických věd, řada užité geofyzika, sv. 2. Ústřední ústav geologický, Praha, str. 89–101.*
- Matolín, M., 1997. Radiometric map of the Czech Republic and uranium Mineralization, IAEA-TECDOC-961, Vienna, 207-212.
- Matolín, M., Jáně, Z., Šálek, O., 2015. Kontrolní měření radiace standardů kalibrační základny DIAMO s.p. ve Stráži pod Ralskem v roce 2015, nepublikovaná zpráva PŘF UK.
- Matolín, M., Křest'an, P., Stoj'e, V., 2011. Standardy pro terénní spektrometry gama ve Stráži pod Ralskem. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment*, 2011/3, 98–105. http://caag.cz/egrse/2011-3/12_matolin_ova.pdf.

- Mellander, H., 1989. Airborne Gamma Spectrometric Measurements of the Fall-out over Sweden after the Nuclear Reactor Accident at Chernobyl, USSR. IAEA Report NM-89-1, IAEA, Vienna.
- Minty, B., Franklin, R., Milligan, P., Richardson, L.M., and Wilford, J., 2009. The Radiometric Map of Australia: Exploration Geophysics, 40 (4), 325-333.
- Minty, B.R.S., 1988. A Review of Airborne Gamma-ray Spectrometric Data processing Techniques. Department of Primary Industries & Energy, Bureau of Mineral Resources, Geology & Geophysics, Report No. 255, Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Minty, B.R.S., 1997. Fundamentals of Airborne Gamma-ray Spektrometry. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2), 39-50.
- Minty, B.R.S., and Brodie, R.C., 1994. Mapping ^{137}Cs at Maralinga nuclear test site, south Australia, using conventional 4-channel airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 15 (2/3). 217-222.
- Minty, B.R.S., Luyendykl, A.P.I., Brodie, R.C., 1997. Calibration and data processing for airborne-gamma ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17, 51–62.
- Nuvia Dynamics, 2018. Fotodokumentace přístroje [online], přístup z: <http://picoenvirotec.com> [1.4.2018].
- Pitkin, J.A., Duval, J.S., 1980. Design parameters for aerial gamma-ray surveys. Geophysics, 45(9), 1427-1439.
- Prutkina, M.I., Šaškin, V.L., 1975. Spravočnik po radiometričeskoj razvedke i radiometričeskomu analyzu (rusky). Atomisdat, Moskva.
- Robodrone Industries, 2018. Specifikace přístroje [online], přístup z: <https://www.robodrone.com> [1. 4. 2018].
- Rubin, R.M., Legget, D., Wells, M.B., 1980. Effects of Overburden, Biomass and Atmospheric Inversions on Energy and Angular Distribution of Gamma Rays from U, K, Th and Airborne Radon Sources. Radiation Res. Associates, Report GJBX-141 81, Fort Worth.
- Sanada, Y., Torii, T., 2014. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. J. Environ. Radioact. 139, 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.027>.
- Sanderson, D.C.W., Allyson, J.D., Tyler, A.N., Scott, E.M., 1995. “Environmental applications of airborne gamma ray spectrometry,” Application of Uranium Exploration Data and Techniques in Environmental Studies, IAEA-TECDOC-827, IAEA, Vienna, 71-79.
- Sanderson, D.C.W., Ferguson, J.M., 1997. The European capability for environmental airborne gamma ray spectrometry. Radiation Protection Dosimetry, v. 73, 213-218.

- Saunders, D.F., Branch, J.F., Thompson, C.K., 1994. Tests of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, v. 59, 411-419.
- Saunders, D.F., Burson, K.R., Branch, J.F., Thompson, C.K., 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics*, v. 58, 1417-1427.
- Shives, R.B.K., Charbonneau, B.W., Ford, K.L., 1997. The detection of potassic alteration by gamma ray spectrometry - Recognition of alteration related to mineralisation. *In* Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial Conference on Mineral Exploration, edited by A.G. Gubins, 741-752 (reprinted in 2000, *Geophysics*, v. 65, n. 6, 2001-2011).
- Schetselaar, E.M., 2002. Petrogenetic interpretation from gamma ray spectrometry and geological data: the Arch Lake zoned peraluminous granite intrusion, Western Canadian Shield. *Exploration Geophysics* v. 33, 35-43.
- Schetselaar, E.M., Chung, C.F., Kim, K., 2000. Classification of bedrock units in vegetated granite-gneiss terrain by the integration of airborne geophysical images and primary field data. *Remote Sensing of Environment* v. 71, 89-105.
- Schwarz, G.F., Klingele, E.E., Rybach, L., 1992. How to handle rugged topography in airborne gamma ray spectrometry surveys. *First Break*, v. 10, n. 1, 11-17.
- Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L. (2018). Mapping of Radiation Anomalies Using UAV Mini-Airborne Gamma-Ray Spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 182/2, p. 101–107, ISSN: 0265-931X. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.033>
- Škácha, P., Sejkora, J., Plášil, J., 2017. Selenide mineralization in the Příbram uranium and base-metal district (Czech Republic). *Minerals* 7 (6), 91. <http://www.mdpi.com/>
- TE Connectivity, 2017. Specifikace čidla atmosférického tlaku MS5611-01BA03. [online] přístup z: <http://www.te.com/commerce/DocumentDeliveryDDEController?Action=srchrtv&DocNm=MS5611-01BA03&DocType=Data+Sheet&DocLang=English> [1. 4. 2018].
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Turunen, P., Vanhanen, E., Pankka, H., 2005. Application of Low Altitude Airborne Geophysics to Mineral Exploration in the Kuusamo Schist Belt, Finland. *Aerogeophysics in Finland 1972–2004: Methods, system characteristics and applications*, edited by Meri-Liisa Airo. Geological Survey of Finland, Special Paper 39, 137–146.
- Wilford, J., Minty, B., 2007. The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes. In “Developments in Soil Science –Volume 31: Digital Soil Mapping –An Introductory Perspective. Elsevier.

10 Seznam příloh

Přílohy jsou přiloženy v elektronické podobě na CD.

Příloha 1 obsahuje hodnoty relativní intenzity gama záření $i(x)$ modelových kruhových těles pro lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu $0,0056 \text{ m}^{-1}$ v **zájmovém okně uranu**, nad kruhovými anomálními tělesy s průměrem 2 m až 60 m ve výškách detekce od 0,1 m do 80 m.

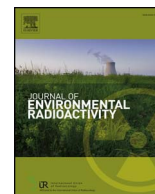
Příloha 2 obsahuje hodnoty relativní intenzity gama záření $i(x)$ modelových kruhových těles pro lineární součinitel zeslabení gama záření ve vzduchu $0,0035 \text{ m}^{-1}$ v **okně úhrnné gama aktivity**, nad kruhovými anomálními tělesy s průměrem 2 m až 60 m ve výškách detekce od 0,1 m do 80 m.

Příloha 3 uvádí vzdálenosti detekovatelnosti od okraje modelového tělesa s různým průměrem 2 m až 60 m (VOK2 až VOK60) pro měření v **zájmovém okně uranu**. Údaje jsou uvedeny pro proměnné hodnoty výšky detekce [m], koncentrace uranu ve zdrojovém tělese C_U^2 [ppm eU], citlivost detektoru S [imp/s na 1 ppm eU] a dobu měření t [s].

Příloha 4 uvádí vzdálenosti detekovatelnosti od okraje modelového tělesa s různým průměrem 2 m až 60 m (VOK2 až VOK60) pro měření v **okně úhrnné gama aktivity**. Údaje jsou uvedeny pro proměnné hodnoty výšky detekce [m], koncentrace uranu ve zdrojovém tělese C_U^2 [ppm eU], citlivost detektoru S [imp/s na 1 ppm eU] a dobu měření t [s].

11 Publikace

Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L. (2018). Mapping of Radiation Anomalies Using UAV Mini-Airborne Gamma-Ray Spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 182/2, p. 101–107, ISSN: 0265-931X. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.033>



Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry



Ondřej Šálek^{a,*}, Milan Matolín^a, Lubomír Gryc^b

^a Charles University, Faculty of Science, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Czech Republic

^b National Radiation Protection Institute, Czech Republic

A B S T R A C T

Localization of size-limited gamma-ray anomalies plays a fundamental role in uranium prospecting and environmental studies. Possibilities of a newly developed mini-airborne gamma-ray spectrometric equipment were tested on a uranium anomaly near the village of Třebesko, Czech Republic. The measurement equipment was based on a scintillation gamma-ray spectrometer specially developed for unmanned aerial vehicles (UAV) mounted on powerful hexacopter. The gamma-ray spectrometer has two 103 cm³ BGO scintillation detectors of relatively high sensitivity. The tested anomaly, which is 80 m by 40 m in size, was investigated by ground gamma-ray spectrometric measurement in a detail rectangular measurement grid. Average uranium concentration is 25 mg/kg eU attaining 700 mg/kg eU locally. The mini-airborne measurement across the anomaly was carried out on three 100 m long parallel profiles at eight flight altitudes from 5 to 40 m above the ground. The resulting 1 s 1024 channel gamma-ray spectra, recorded in counts per second (cps), were processed to concentration units of K, U and Th, while total count (TC) was reported in cps. Increased gamma ray intensity of the anomaly was indicated by mini-airborne measurement at all profiles and altitudes, including the highest altitude of 40 m, at which the recorded intensity is close to the natural radiation background. The reported instrument is able to record data with comparable quality as standard airborne survey, due to relative sensitive detector, lower flight altitude and relatively low flight speed of 1 m/s. The presented experiment brings new experience with using unmanned semi-autonomous aerial vehicles and the latest mini-airborne radiometric instrument. The experiment has demonstrated the instrument's ability to localize size-limited uranium anomalies.

1. Introduction

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) mini-airborne measurements have been applied for many environmental issues, including radiation protection and nuclear accident monitoring. MacFarlane et al. (2014) described a UAV instrument to carry out rapid and high spatial resolution radionuclide assessment at low altitude, and it was demonstrated using rock samples with uranium (U) minerals. The rock samples were within a 20 cm² region and the flight altitude was below 3 m. A small-volume CZT coplanar-grid detector GR1 Kromek was used for the experiment. MacFarlane et al. reported high sensitivity and high spatial resolution at heights below 3 m.

Martin et al. (2015a, 2015b, 2016) employed the UAV instrument developed by MacFarlane et al. (2014). Martin et al. (2015a) dealt with mapping of legacy uranium mines. The mapping was done at altitudes 5–15 m. Martin et al. (2015b) dealt with characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident. The measurements were

done at altitudes 1–5 m. Martin et al. (2016) reported radiological assessment on the Sellafield Nuclear Site, and the measurements were done at altitudes below 10 m.

Falciglia et al. (2017) reported on characterization of soils contaminated by ²⁴¹Am and ¹⁵²Eu using UAV equipped with a small semiconductor CdTe detector with an active area of 25 mm² and thickness of 1 mm. They reported low sensitivity of the detector resulting in a requirement of a long exposure time of more than 10 min and short distance from the source below 1 m.

Valuable research was reported by Sanada and Torii (2014), who have used an unmanned helicopter weighting 94 kg for aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. The helicopter was equipped by a 6.5 kg gamma-ray spectrometer composed of three LaBr₃:Ce scintillation detectors 43.4 cm³, calibrated to measure dose rate at 1 m above ground level. The flight altitude 80 m was selected.

The instrument reported by Sanada and Torii (2014) was based on

* Corresponding author.

E-mail address: ondrej.salek@natur.cuni.cz (O. Šálek).

LaBr₃:Ce scintillator, but this is not appropriate for measurement of natural radiation due to the inherent contamination of the crystal by ¹³⁸La. Instruments employed by MacFarlane et al. (2014), Martin et al. (2015a, 2015b, 2016) and Falciglia et al. (2017) have very good energy resolution, but they are not suitable for radioactive ore prospecting due to the small volume and insufficient sensitivity for the not very intense natural radiometric anomalies.

The instrument suitable for prospecting of radioactive geological objects and used in this project is the Georadis D230A, a newly developed gamma-ray spectrometer specially designed for UAV. The objective was to assess this equipment for localization of a size-limited U anomaly. The possibility of anomaly detection depends on its size, shape and gamma-ray intensity and on the instrument sensitivity, flight speed and altitude (Mareš et al., 1984). Our research concentrated on the flight altitude as an important parameter.

A uranium anomaly near the village of Třebesko, five km to the south from the town of Přebram, Central Bohemia, Czech Republic, served as a test site for the performance of the Georadis D230A gamma-ray spectrometer. The spectrometer was attached to a powerful hexacopter.

2. Material and methods

2.1. Test site

The test site is located in the Přebram U district, which is situated near the southeastern contact of Barrandian sedimentary rocks of the Neoproterozoic and Lower Cambrian age, with the western margin of granitoids of the Central Bohemian Plutonic Complex. The Přebram U district is located tightly in the exocontact of the Central Bohemian Plutonic Complex in metasedimentary rocks of the Barrandian Unit. The U hydrothermal vein mineralization is located in a zone of tectonically-deformed neoproterozoic rocks 1–2 km wide and 25 km long (Škácha et al., 2017). The radiation anomaly at the test site is related to an outcropping U mineralized vein which was explored and mined by a surface trench in the past. Uranium mineralization is represented by uraninite and its secondary minerals. The site position is shown in the schematic map in Fig. 1.

Concentrations of radionuclides at the anomaly were assessed by a detail ground measurement with a portable gamma-ray spectrometer GS-256 (Geofyzika Brno, Czech Republic) equipped with a 76 × 76 mm NaI(Tl) scintillation detector and energy spectrum stabilization using ¹³⁷Cs reference source. Station separation of the rectangular measurement grid was 0.5 m–4 m (Fig. 2). Exposure time was 2 min or, at high radioactive points, 60 or 30 s. Calibration of the GS-256 spectrometer was performed at the calibration facility in Stráž pod Ralskem, Czech Republic, in conformity with the standard procedures as recommended by the IAEA (2003). Potassium and thorium concentrations did not show any enhancement, so only U data have been analysed. Field data were interpolated by the kriging method and the U contour map of the anomaly was compiled (Fig. 3).

Mini-airborne measurement was carried out on three 100-m-long



Fig. 1. Index map of the site Třebesko, Czech Republic.

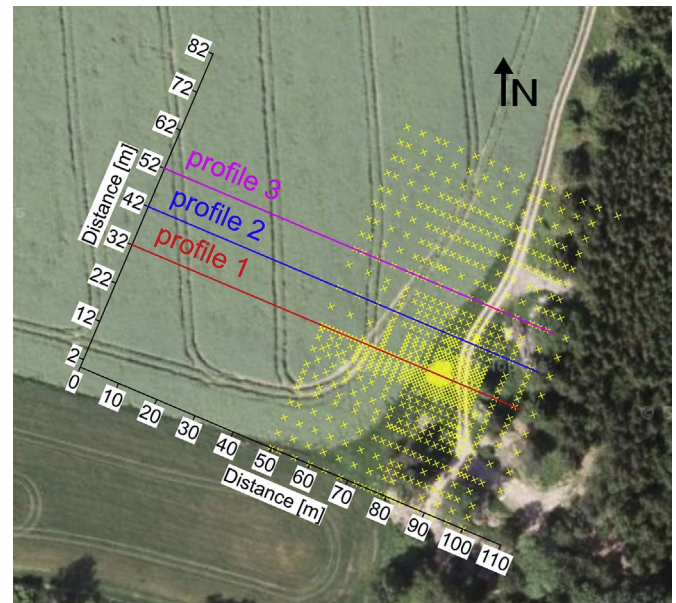


Fig. 2. The orthophoto of the testing site Třebesko, Czech Republic. Measurement stations of the ground gamma-spectrometric survey (yellow crosses) and mini-airborne survey lines are displayed in the figure. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

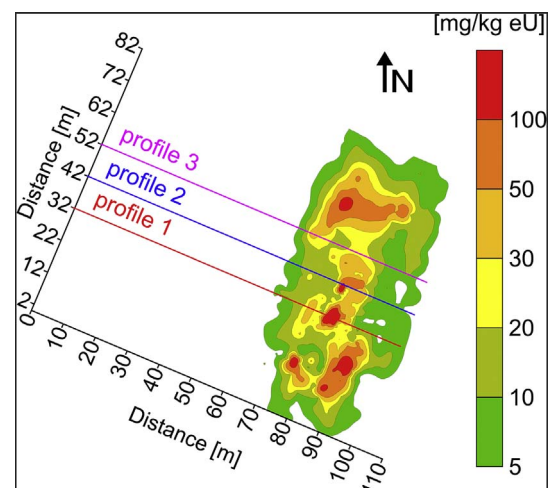


Fig. 3. Uranium concentration contour map of the testing site resulting from the ground gamma-ray spectrometric survey. Mini-airborne profiles are displayed in the picture.

parallel lines NW – SE perpendicular to the longer axis of the anomaly (NE – SW). Profile No. 1 crosses the maximum of the U anomaly at a distance of 80 m from the initial station of the line. The separation between profiles is 10 m (Figs. 2 and 3).

2.2. Mini-airborne equipment and method

The hexacopter by Robodrone Industries (Czech Republic), type Kingfisher, was used as an airborne platform. It was a powerful hexacopter with up to 5 kg payload capacity, dimensions 120 × 140 × 22 cm, maximal endurance 45 min, endurance with attached 4 kg instrument was 16 min, maximal speed was 70 km/h and wind resistance 10 m/s (Robodrone Industries, 2017). The navigation could be manual or autonomous. The autonomous mission was specified by waypoints given by GPS coordinates and the flight altitude as the third coordinate. The system measures the altitude by a barometric pressure sensor MS5611-01BA03 optimized for altimeters and variometers with an altitude resolution of 10 cm (TE Connectivity, 2017).



Fig. 4. Mini-airborne gamma-ray spectrometric device in flight. The set consists of a hexacopter (type Kingfisher by Robodrone Industries) and a gamma-ray spectrometer (type D230A by Georadis).

The atmospheric pressure altimeter is calibrated to zero height on the ground before each flight. The mini-airborne device in action is shown in Fig. 4.

Mini-airborne 1024 channel gamma-ray spectrometer Georadis D230A (Czech Republic) used two Bismuth Germanium Oxygen (BGO) scintillation detectors of the volume 103 cm^3 each. The spectrometer had automatic spectrum stabilization using energy lines of natural radionuclides. The instrument energy resolution 13.6% at 662 keV was determined experimentally. The instrument weight was approximately 4 kg including rechargeable battery and dural holder fixing the instrument under aircraft.

The Georadis D230A instrument was calibrated with the instrument placed on potassium, U and thorium calibration pads. Detailed parameters of the calibration facility were reported by Matolín et al. (2011). The calibration procedure was performed in conformity with recommendations of IAEA (2003). Total-count (TC) energy window was set to 400–2810 keV, the U energy window was set to 1660–1860 keV. The 30 min gamma-ray spectra generated by potassium, U and thorium calibration pads and by background pad are presented in Fig. 5. The detector sensitivity was 0.55 cps (counts per second) per 1 mg/kg eU in the U energy window. Background was measured over a large body of water. The background correction included cosmic radiation, internal radioactivity of the instrument and atmospheric radon. Atmospheric radon was not detected separately in this experiment.

Sensitivities of airborne gamma ray spectrometers are normally determined by a flight over a calibration range (Minty et al., 1997a). Since there is no calibration range for mini-airborne systems, data of field airborne operation at altitudes from 5 m to 40 m were processed using the instrument sensitivity determined on the ground without any

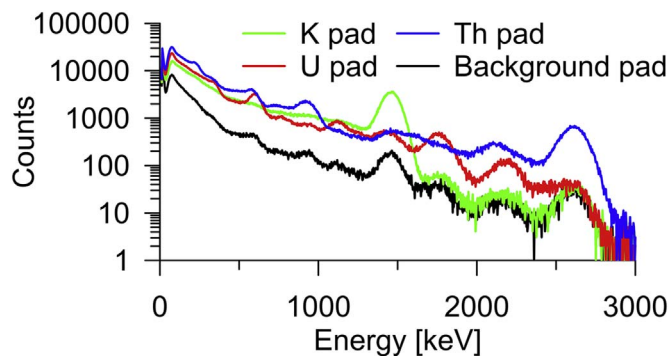


Fig. 5. Gamma-ray spectra registered by D230A instrument at the calibration facility on potassium, uranium and thorium calibration pads and on a background pad. Exposure time 30 min.

altitude correction. This was accepted having in mind that the research was focused on identification of size-limited ground U objects by flights at various altitudes, and not the assessment of real U concentration in mg/kg. Thus the resulting concentrations of U reported for various flight altitudes are denoted as apparent concentrations in this paper.

In comparison with the Kromek GR1 detector, the Georadis D230A has much higher sensitivity. The GR1 Kromek detector (volume 1 cm^3) has relative efficiency 1% to HPGe $85 \times 30 \text{ mm}$ Ortec Detective200 with p-type coaxial crystal (Bell et al., 2016). The Ortec Detective200 has about 50% relative efficiency to $76 \times 76 \text{ mm}$ NaI(Tl) scintillation crystal, based on IEEE standard 325–1999 (IEEE Standard Association, 1996; Ortec, 2017). According to this literature the GR1 Kromek has about 0.5% efficiency of a standard $76 \times 76 \text{ mm}$ NaI(Tl).

The sensitivity of $51 \times 51 \text{ mm}$ (103 cm^3) BGO scintillation crystal employed in the instrument Georadis D230A is approximately 80% of the sensitivity of a $76 \times 76 \text{ mm}$ (350 cm^3) NaI(Tl) scintillation detector (IAEA, 2013). The sensitivity of the Georadis D230A with two 103 cm^3 BGO crystals is theoretically 160% of a standard 350 cm^3 NaI(Tl) crystal. Typical U energy window sensitivity for a $76 \times 76 \text{ mm}$ NaI(Tl) scintillation detector is 0.33 cps (counts per second) per 1 mg/kg eU (IAEA, 2003). The U energy window sensitivity of the Georadis D230A was 0.55 cps per 1 mg/kg eU. Relative sensitivities of the Kromek GR1 and Georadis D230A instruments suggest the Kromek GR1, for natural radionuclides, was approximately 1/300 of the Georadis D230A sensitivity.

The data recording time interval was 1 s. Each of the three profiles was flown in eight altitudes from 5 m to 40 m above the ground with the vertical step of 5 m. Flight velocity was 1 m/s. The navigation was performed in the autonomous GPS flight mode. The result was 1s intervals of 1024 channel gamma-ray spectra, which were processed to apparent U concentration and TC count rate.

2.3. Data processing

Separating an anomaly from the normal radiation field was performed by the criterion $N + 3S$ level: the mean value of the normal radiation field (N) plus three standard deviations (S) of the normal radiation field. The anomaly exceeding the $N + 3S$ level has reliability of 99.7% (Philipsborn and Geipel, 2006). This method, based on classical statistics, is one of the most important methods to separate anomalies from the background (Afzal et al., 2012). This method depends on the data distribution (Davis, 2002).

The normal (background) field was defined in profile sections of 0–30 m, outside of the U anomaly. A histogram (Fig. 6) displays data of TC count rates in the normal field zone from all three profiles and all flight altitudes (697 values). Normality of the distribution of data was tested by Normal Q-Q plot (Fig. 7.) and Shapiro-Wilk normality test. Shapiro-Wilk normality test calculated in R software (R Development

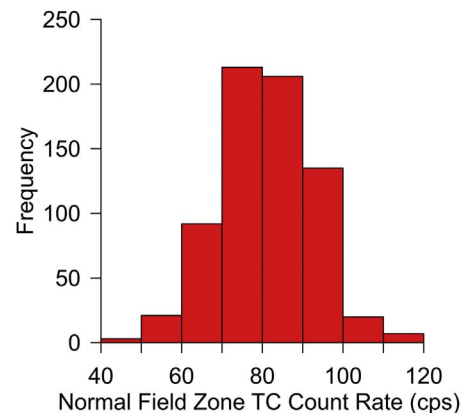


Fig. 6. Histogram of TC count rates in normal field zone 0–30 m.

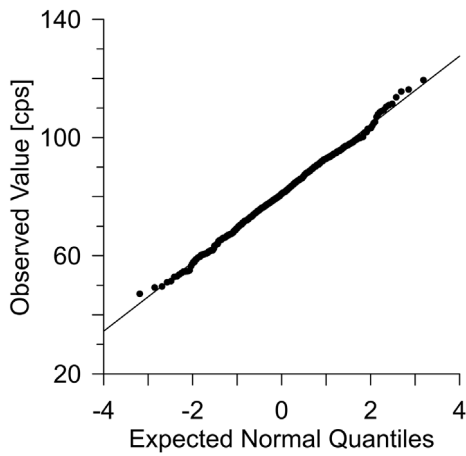


Fig. 7. Normal Q-Q plot of TC count rates in normal field zone 0–30 m.

Core Team, 2017) gave a p-value of 0.55. The data were normally distributed. A normal distribution of the data, in normal field zone, allows determination of only one $N + 3 S$ level for all three profiles and all flight altitudes. TC $N + 3 S$ level was determined as 108.3 cps ($N = 80.69$ cps, $S = 9.19$).

Apparent U concentrations were derived from gamma-ray spectra by a standard method using stripping corrections (IAEA, 2003). Apparent U concentrations were smoothed by the 9-point running average in order to reduce the inherent statistical noise in conformity with recommendations of IAEA (2003). Apparent U $N + 3 S$ level was determined as 4.2 mg/kg eU ($N = 1.69$, $S = 0.84$).

3. Results

The resulting U contour map obtained from the ground assaying is presented in Fig. 3. The size of the anomaly is approximately 80 m by 40 m with average U concentration of 25 mg/kg eU, which locally attains 700 mg/kg eU at profile No. 1 at a distance of 80 m from the initial station of the line.

A cumulative gamma-ray spectra recorded at altitudes of 5 m and 40 m in the normal field zone (section 0–30 m) and in the anomalous zone (section from 65 m to the end of profile) are presented in Fig. 8 and Fig. 9.

Original TC data at three mini-airborne profiles are presented in a graphical form (Figs. 10–12). The derived apparent U concentrations are presented in Figs. 13–15. The data of end sections of profiles in lower flight altitudes are missing due to vegetation obstacles.

Maximal TC gamma-ray count rates exceeded the level of $N + 3 S$ level at all profiles and flight altitudes. At a flight altitude of 40 m the anomaly is low, close to the natural background. Maxima of derived and smoothed apparent U concentrations exceed the $N + 3 S$ level convincingly at all cases.

The results show the significant dependence of the recorded anomalous gamma-ray field on the flight altitude for original TC data

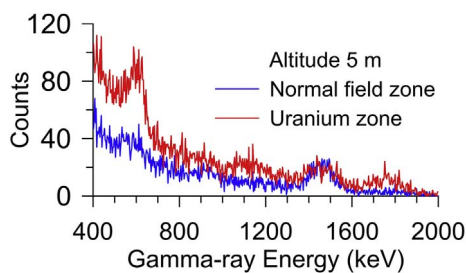


Fig. 8. Gamma-ray energy spectrum recorded at the flight altitude of 5 m in the normal field zone and in the anomalous zone.

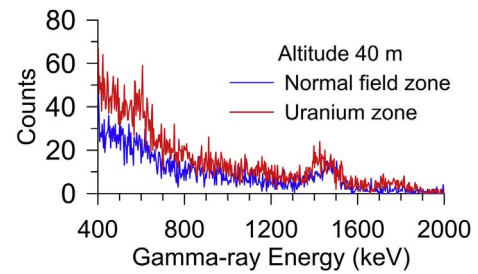


Fig. 9. Gamma-ray energy spectrum recorded at the flight altitude of 40 m in the normal field zone and in the anomalous zone.

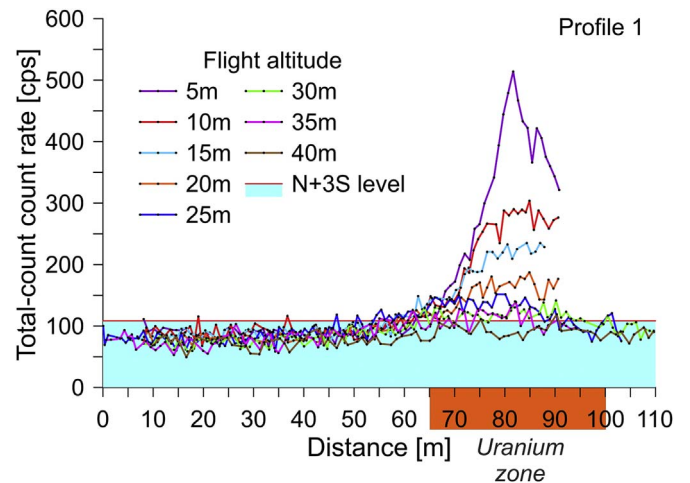


Fig. 10. TC count rate at flight altitudes 5 m–40 m at mini-airborne profile 1.

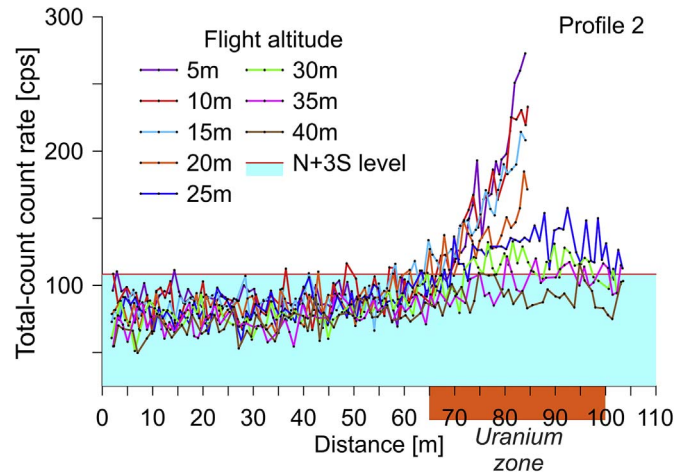


Fig. 11. TC count rate at flight altitudes 5 m–40 m at mini-airborne profile 2.

and for derived apparent U concentrations. Table 1 shows the decrease of the anomalous gamma-ray field (anomalous zone from 65 m to end) with increasing flight altitude. The table presents maximal TC count rates and maximal values of determined apparent U concentrations for each flight altitude at all profiles. A relative gamma-ray intensity decrease of the anomaly with altitude at three mini-airborne profiles and theoretical curves for point source and infinite source gamma-ray intensity decrease with altitude are presented in Fig. 16. The theoretical gamma-ray intensity decrease of point source and infinite source were calculated using the theoretical relations (IAEA, 2013). The observed curves of the gamma-ray intensity decrease with increasing flight altitude at all airborne profiles far from point source curve. The anomaly recorded at profiles 2 and 3 decreased with height similarly to an

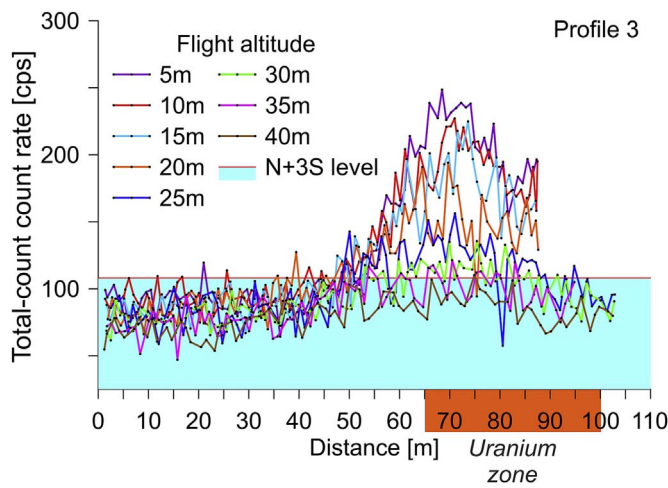


Fig. 12. TC count rate at flight altitudes 5 m–40 m at mini-airborne profile 3.

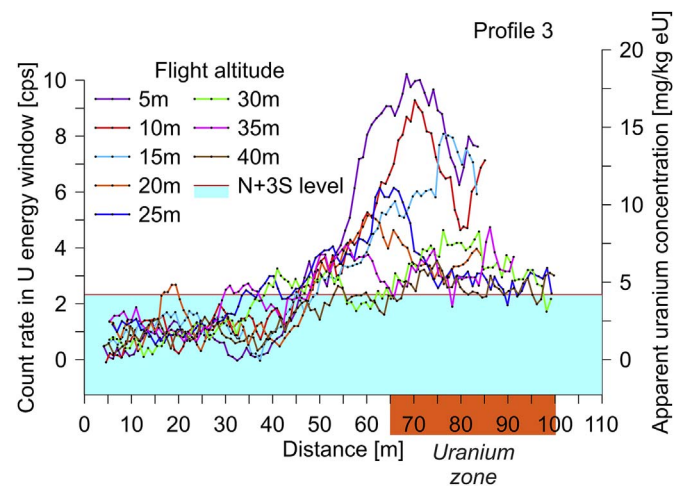


Fig. 15. Apparent U concentrations at flight altitudes 5 m–40 m at mini-airborne profile 3.

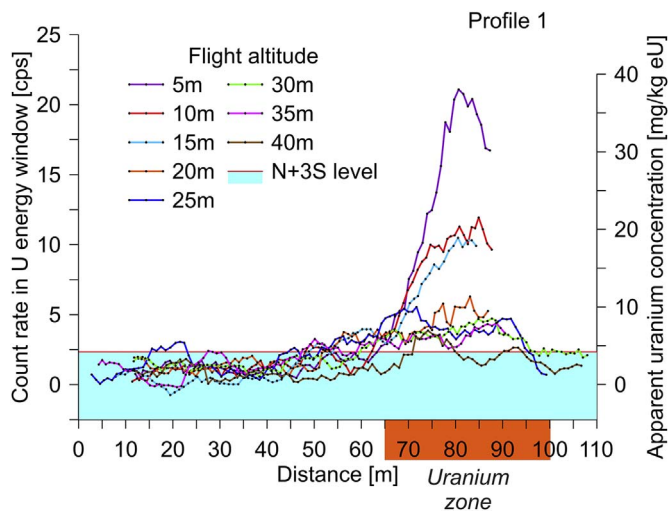


Fig. 13. Apparent U concentrations at flight altitudes 5 m–40 m at mini-airborne profile 1.

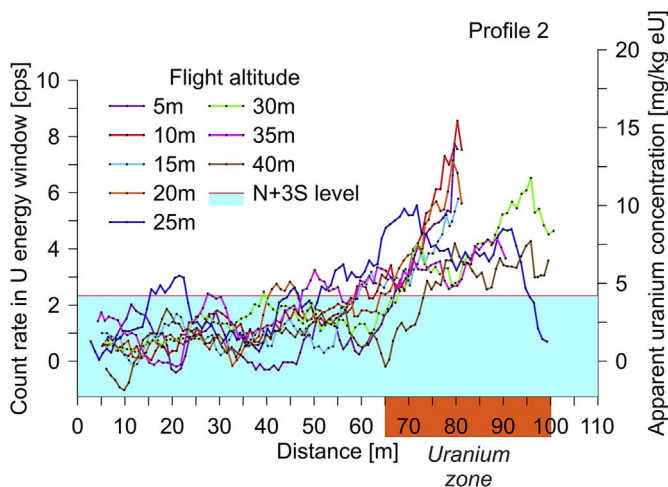


Fig. 14. Apparent U concentrations at flight altitudes 5 m–40 m at mini-airborne profile 2.

infinite source. The decrease of count rate with height in the anomaly indicated at profile 1 was between a decrease of an infinite source and a point source, probably due to narrow and very intensive radiation at the station marked by the distance of 80 m.

Table 1
The decrease of gamma-ray field in anomalous zone with increasing flight altitude. The table introduces maximal TC count rates and maximal values of determined apparent U concentrations at each altitude at all profiles.

Altitude [m]	Profile 1		Profile 2		Profile 3	
	TC [cps]	U [mg/kg eU]	TC [cps]	U [mg/kg eU]	TC [cps]	U [mg/kg eU]
5	514.2	38.0	272.8	14.0	248.6	18.4
10	303.9	21.5	230.3	15.4	227.1	16.7
15	235.1	18.9	190.2	10.4	224.9	14.6
20	187.3	11.3	184.7	12.9	194.1	9.3
25	151.4	10.0	157.5	10.8	156.2	11.1
30	141.5	8.5	132.8	11.8	135.6	8.4
35	138.8	7.9	121.5	6.8	121.3	8.6
40	119.1	6.9	116.1	7.7	110.3	6.4

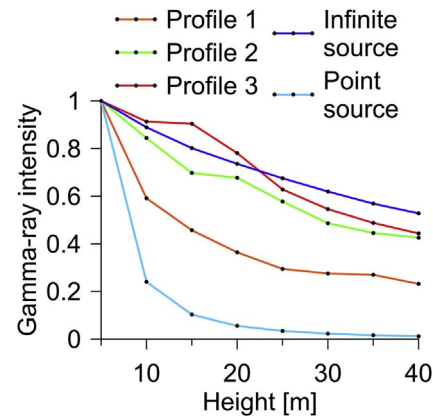


Fig. 16. A relative gamma-ray intensity decrease of the anomaly with flight altitude. Mini-airborne profiles 1, 2, 3 and theoretical curves for a point source and for an infinite source are presented.

Basic statistics of normal field zone data (section 0–30 m) give results of TC count rate fractional standard deviation 11%. The fractional standard deviation of apparent U concentrations from single 1 s data attained 175% and the fractional standard deviation of apparent U concentrations smoothed by the 9-point running average (Figs. 13–15) was considerably lower, amounting to 50%.

Gamma-ray count rate in the U energy window was much lower than the TC count rate, however, the experiment has shown that the low count rate gamma-ray spectrometric U estimate brings useful

information too.

The linear attenuation coefficient μ of gamma-rays in air for the TC energy window (400–2810 keV) at altitudes from 5 m to 40 m was determined from non-anomalous profile sections using the exponential function (IAEA, 2003). The linear attenuation coefficient of gamma-rays in air calculated using data of profile 1 amounts to 0.007 m^{-1} and 0.008 m^{-1} using data of profiles 2 and 3. The difference was caused by the statistical nature of gamma-ray field and precision of measurement. The linear attenuation coefficient for conventional airborne TC measurement at altitudes about 80 m is reported usually by similar value of 0.007 m^{-1} (IAEA, 1991, 1979; Matolín, 1980).

4. Discussion

4.1. Standard airborne and mini-airborne survey data quality comparison

It is certainly useful to make a comparison between sensitivities and data quality of the standard airborne and the mini-airborne survey. Grasty and Minty (1995) reported U sensitivity of airborne spectrometer at 80 m flight altitude as approximately 8 cps per 1 mg/kg eU. Typical U sensitivity at 120 m flight altitude for a standard detector package of 16.8 L is 2.9 cps per 1 mg/kg eU (IAEA, 1991). The flight speed of the aircraft was about 50–60 m/s for fixed-wing surveys and 25–30 m/s for helicopter surveys (IAEA, 2003).

The Georadis D230A has U sensitivity on the ground 0.55 cps per 1 mg/kg eU. Uranium sensitivity at 40 m is approximately 50% of the sensitivity on the ground (Grasty and Minty, 1995; IAEA, 2013), which means about 0.25 cps per 1 mg/kg eU. Flight speed of the UAV multicopter can be slowed down to 1 m/s.

Approximate comparison of data quality of the standard airborne and the mini-airborne survey was performed by theoretical estimation of counts in U energy window (stripping correction included) recorded at 100 m long profile and for U concentration in the ground equal to 1 mg/kg eU. A standard airborne spectrometer at flight altitude of 80 m and speed 50 m/s should record 16 counts in U energy window per 100 m distance. The detector package of 16.8 L at flight altitude of 120 m and speed 25 m/s should record 11.6 counts in U energy window per 100 m distance. The Georadis D230A at a flight altitude of 40 m and speed 1 m/s should record 25 counts per 100 m distance. It is obvious that UAV mini-airborne survey can, due to low speed and lower flight altitude, collect data with comparable quality, on a detailed scale, as standard airborne survey.

4.2. A theoretical estimate of localization of the anomaly by a standard airborne survey

A theoretical estimate of localization of the investigated U mineralization near the village of Třebesko, Czech Republic, by a standard airborne gamma-ray spectrometry prospecting enables the comparison with the output of mini-airborne experimental measurement at low flight altitude. The estimate was based on the assumption of use of a multichannel airborne gamma-ray spectrometer with a scintillation detector NaI(Tl) 33.6 L, flight altitude of 80 m, standard flight speed 140 km/h, instrument stripping factors determined at calibration pads, sensitivities determined by flights over calibration strips in the Czech Republic and standard airborne data processing. The gamma-ray field caused by the $80 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ U anomaly near the village of Třebesko, Czech Republic, at the altitude of 80 m was estimated using calculated effects of ground radioactive circular objects of various dimensions (Matolín, 1963). The investigated U anomaly was approximated by a homogeneous circular object with radius of 30 m and U concentration of 25 mg/kg eU. Using the calculated reference vertical gradients of gamma-ray field above ground radioactive sources of different sizes, the U anomaly would generate at the simulated flight altitude of 80 m about four percent of the ground gamma-ray intensity. If a criterion for an anomaly would be the level of normal field plus two standard

deviations, the investigated anomaly would be detected if the ground average anomaly concentration would be at least 27–33 mg/kg U, and the airborne profile crosses the centre of the anomaly. The statements above indicate that the investigated U anomaly near the village of Třebesko could probably not be detected by the standard airborne gamma-ray spectrometry.

4.3. Height correction

In some previous works (MacFarlane et al., 2014; Martin et al., 2015a, 2015b, 2016) modified inverse-square law algorithm was used for calculation of height corrections. This is most realistic for the point source of radiation, but it is not suitable for larger source areas (Fig. 16).

The classic method of a height correction evaluation in airborne gamma-ray spectrometry was described by Minty (1997b). It is considering an exponential fall-off of radiation originating from very large homogenous source. This algorithm is adequate for infinite sources and subdued topography and survey heights in the range of 50–250 m (IAEA, 2003).

The true fall-off of radiation with height for infinite sources below 50 m flight altitude, which is typical for UAV, is more closely approximated by an exponential integral rather than the simple exponential (IAEA, 2003).

From the cited literature it is clear that a standard procedure for the processing of height corrections, which could be used without modification, for mini-airborne gamma-ray spectrometry, is currently not in place. It seems appropriate to follow the standard procedure well described and implemented in conventional airborne gamma-ray spectrometry with replacing simple exponential function by exponential integral. The local size-limited anomaly, very different from the infinite source, needs to be evaluated separately. Applicable procedure could be based on the fall-off of radiation with altitude over the anomaly, which we can easily collect using UAV thanks to its excellent maneuverability. In the future UAV can use survey algorithms for immediate detection of anomalous zone and automatic repeating the flight at more different altitudes below and above the working altitude.

5. Conclusions

The presented paper deals with the methodology and potential of mini-airborne gamma-ray spectrometric survey for radioactive ore prospecting using unmanned aerial vehicles. The research has shown real operational possibilities of the tested mini-airborne system with a progressive BGO gamma-ray spectrometer with relatively large volume detector. The newly developed gamma-ray spectrometer Georadis D230A provides about 300 times greater sensitivity in comparison with 1 cm^3 CZT detector, which was used for many previous UAV surveys in environmental applications.

Experimental measurement profiles over a size-limited U anomaly (80 by 40 m) at flight altitudes from 5 m to 40 m showed the rapid decrease of the gamma-ray field with increasing flight altitude. Flight altitude is an important setting for mini-airborne survey. Based on our results the flight altitude for mini-airborne surveys can be up to 40 m and take in to account all important conditions like size and intensity of an assumed anomaly, detector sensitivity, flight speed and vegetation character.

A detailed ground gamma-ray spectrometry investigation of the U anomaly enabled analysis and comparison with airborne data. A small UAV can fly in low altitudes and enable detection of size-limited radiation anomalies which are undetectable by conventional airborne gamma-ray spectrometry at standard flight altitude of about 80 m. In this sense UAV systems fill a gap in technical possibilities between ground and conventional airborne measurement. The UAV mini-airborne instrument can collect the same number of counts per unit distance on a profile as a standard airborne survey, due to low speed and

lower flight altitude. The main limitations of mini-airborne gamma-ray spectrometry are short operational time and slow survey speed causing the method to be not applicable for regional surveys.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics at Charles University and the International Atomic Energy Agency for funding the project. The IAEA contributed to the research under the Research Contract No 19036. The technical support for field experiments was generously provided by Georadis s.r.o. and National Radiation Protection Institute of the Czech Republic. This research was supported by Center for Geosphere Dynamics (UNCE/SCI/006).

References

- Afzal, P., Zarifi, A.Z., Yasrebi, A.B., 2012. Identification of uranium targets based on airborne radiometric data analysis by using multifractal modeling, Tark and Avanligh 1:50 000 sheets, NW Iran. *Nonlin. Process. Geophys.* 19, 283–289. www.nonlin-processes-geophys.net/19/283/2012/.
- Bell, S.J., Aitken-Smith, P., Beeke, S., Collins, S.M., Regan, P.H., Shearman, R., 2016. A comparison of emerging gamma detector technologies for airborne radiation monitoring. *J. Phys. Conf. Ser.* 763, 012010. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/763/1/012010/pdf>.
- Davis, J.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*, third ed. John Wiley & Sons.
- Falciglia, P.P., Biondi, L., Catalano, R., Immé, G., Romano, S., Vagliasind, F.G.A., 11 May 2017. Preliminary investigation for quali-quantitative characterization of soils contaminated with ^{241}Am and ^{152}Eu by low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with small size γ -ray spectrometer: detection efficiency and minimum detectable activity (MDA) concentration assessment. *J. Soils Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1720-6>.
- Grasty, R.L., Minty, B.R.S., 1995. A Guide to the Technical Specifications for Airborne Gamma-ray Surveys. Australian Geological Survey Organisation Record 1995/60.
- IAEA, 1979. *Gamma-Ray Surveys in Uranium Exploration*. IAEA TRS No. 186. IAEA, Vienna.
- IAEA, 1991. *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying*. IAEA TRS No. 323. IAEA, Vienna.
- IAEA, 2003. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*. IAEA-TECDOC-1363. IAEA, Vienna.
- IAEA, 2013. *Advances in Airborne and Ground Geophysical Methods for Uranium Exploration*. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NF-T-1.5. IAEA, Vienna.
- IEEE Standard Association, 1996. IEEE Standard 325–1996, “Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Ray Detectors”. Website. <http://ieeexplore.ieee.org/document/588308/> accessed on 08.09.2017.
- MacFarlane, J.W., Payton, O.D., Keatley, A.C., Scott, G.P.T., Pullin, H., Crane, R.A., Smilion, M., Popescu, I., Curlea, V., Scott, T.B., 2014. Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies. *J. Environ. Radioact.* 136, 127–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.008>.
- Mareš, S., Gruntorád, J., Hráč, S., Karous, M., Marek, F., Matolín, M., Skopec, J., Válek, R., 1984. *Introduction to Applied Geophysics*. D. Riedel Publishing Company, Dordrecht and SNTL, Prague.
- Martin, P.G., Payton, O.D., Fardoulis, J.S., Richards, D.A., Scott, T.B., 2015a. The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines. *J. Environ. Radioact.* 143, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.004>.
- Martin, P.G., Payton, O.D., Fardoulis, J.S., Richards, D.A., Yamashiki, Y., Scott, T.B., 2015b. Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident. *J. Environ. Radioact.* 151, 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.09.007>.
- Martin, P.G., Moore, J., Fardoulis, J.S., Payton, O.D., Scott, T.B., 2016. Radiological assessment on interest areas on the Sellafield nuclear site via unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.* 8 (11), 913. <http://www.mdpi.com/2072-4292/8/11/913>.
- Matolín, M., 1963. *Method of Interpretation of Detailed Airborne Radiometric Measurement (in Czech)*. Collection of Geological Sciences, Applied Geophysics Series, vol. 2. Central Geological Institute, Prague, pp. 89–101.
- Matolín, M., 1980. *Prospection Aérienne par Spectrométrie Gamma*. Rapport au Gouvernement Marocain (No. 1705). IAEA Vienna 1–12.
- Matolín, M., Křestán, P., Stojé, V., 2011. Standards for field gamma-ray spectrometers in Czech Republic (in Czech). *EGRSE exploration Geophysics*. *Remote Sens. Environ.* 2011/3, 98–105. http://caag.cz/egrse/2011-3/12_matolin_ova.pdf.
- Minty, B.R.S., Luyendyck, A.P.I., Brodie, R.C., 1997a. Calibration and data processing for airborne-gamma ray spectrometry. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 51–62.
- Minty, B.R.S., 1997b. Fundamentals of airborne-gamma ray spectrometry. *AGSO J. Aust. Geol. Geophys.* 17, 39–50.
- Ortec, 2017. *Detectors Catalog*. pp. 203. website. <http://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/catalog%20files/detectors.pdf?la=en> (accessed on 08.09.2017).
- Philipsborn, H., Geipel, R., 2006. *Radioaktivität und Strahlungsmessung*. Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundh. Verbraucherschutz 1–244.
- R Development Core Team, 2017. *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>.
- Robodrone Industries, 2017. *Product Specification*. website. <https://www.robodrone.com/kingfisher> (accessed on 09.09.2017).
- Sanada, Y., Torii, T., 2014. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. *J. Environ. Radioact.* 139, 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.027>.
- Škácha, P., Sejkora, J., Plášil, J., 2017. Selenide mineralization in the Příbram uranium and base-metal district (Czech Republic). *Minerals* 7 (6), 91. <http://www.mdpi.com/2075-163X/7/6/91>.
- TE Connectivity, 2017. *MS5611–01BA03 Barometric Pressure Sensor Documentation*. website. <http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrvr&DocNm=MS5611-01BA03&DocType=Data+Sheet&DocLang=English>.