

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Evidenčné číslo: FEI-104396-72523

Ing. Dávid Bednár

Autoreferát dizertačnej práce

**Vývoj metodiky skenovacieho merania pôdy pre účely
charakterizácie a uvoľňovania lokality do životného prostredia**

na získanie akademického titulu **philosophiae doctor, PhD.**

v doktorandskom študijnom odbore/program: **Elektrotechnika/Jadrová energetika**

Bratislava, 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave jadrového a fyzikálneho inžinierstva, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave a v spoločnosti VUJE, a.s. Trnava.

- Predkladateľ: **Ing. Dávid Bednár**
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave,
Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava
- Školiteľ: **prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.**
Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva, FEI STU v Bratislave,
Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava
- Oponenti: **doc. RNDr. Silvia Dulanská, PhD.**
Katedra rádiologickej techniky,
Fakulta ošetrovateľstva a zdravotníckych odborných štúdií Slovenskej
zdravotníckej univerzity v Bratislave,
Limbová 12, 833 03 Bratislava
- doc. RNDr. Ivan Sýkora, PhD.**
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky,
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského,
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o h,
na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava.

prof. Ing. Vladimír Kutíš, PhD.
dekan fakulty
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

OBSAH

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ.....	4
ÚVOD.....	5
1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	11
3 ZVOLENÁ METÓDA SPRACOVANIA	13
3.1 Účinnosť kalibrácia scintilačného detektora NaI(Tl)	13
3.2 Rekonštrukcia pozadového spektra pomocou modelu detektora NaI(Tl)	16
3.2.1 Stanovenie rádionuklidového vektora pôdy v okolí JE A1 a V1 na území SR.....	16
3.2.2 Stanovenie odozvy detektora NaI(Tl) od kozmického žiarenia v spektre pozadia	18
3.3 Analýza neistôt	18
3.4 Stanovenie skenovacej MDA pre vybranú geometriu merania	19
4 VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV	21
5 SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY	26
POUŽITÁ LITERATÚRA	28
PRÍLOHA 1: ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	30
PRÍLOHA 2: OHLASY PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	32
ZHRNUTIE.....	34
SUMMARY.....	35

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A OZNAČENÍ

CPS	- Počet impulzov za sekundu / početnosť (z anj.: Counts per second)
GIS	- Geografický informačný systém (z anj.: Geographic Information System)
GNSS	- Globálny navigačný systém (z anj.: Global Navigation Satellite System)
GSP	- Gamaspektrometria
HPGe	- Vysokočisté germárium (z anj.: High Purity Germanium)
IAEA	- Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu (z anj.: International Atomic Energy Agency)
IDW	- Metóda inverzne váženej vzdialenosti (z anj.: Inverse Distance Weighted)
JE	- Jadrová elektrárň / Jadrové elektrárne
JZ	- Jadrové zariadenie
KP	- Kontrolované pásmo
MARSSIM	- Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual
MCA	- Mnohokanálový analyzátor (z anj.: Multichannel analyzer)
MDA	- Minimálna detegovateľná aktivita (z anj.: Minimum Detectable Activity)
NORM	- Prirodzene vyskytujúce sa rádioaktívne materiály (z anj.: Naturally-Occuring Radioactive Materials)
PKS	- Prieskum koncového stavu
RN	- Rádionuklid / Rádionuklidy
SR	- Slovenská republika
UAV	- Bezpilotné lietadlo (z anj.: Unmanned Aerial Vehicle)
UGV	- Bezpilotné pozemné vozidlo (z anj.: Unmanned Ground Vehicle)
US NRC	- Americká jadrová komisia (z anj.: US Nuclear Regulatory Commission)
ŽP	- Životné prostredie

ÚVOD

Z globálneho hľadiska rastie počet jadrových zariadení vstupujúcich, alebo nachádzajúcich sa v procese vyradovania. Tento trend odráža starnutie jadrových reaktorov prvej a druhej generácie, z ktorých mnohé dosiahli alebo prekročili svoju projektovanú prevádzkovú životnosť. Z tohto dôvodu sa čoraz viac kladie dôraz na efektívne, bezpečné a environmentálne zodpovedné vyradovanie. Proces vyradovania jadrových zariadení predstavuje veľmi komplexnú inžiniersku a environmentálnu výzvu súčasnosti, pričom jedna z nich je zabezpečenie, aby bola lokalita jadrového zariadenia vhodná na ďalšie obmedzené alebo neobmedzené využitie. Kľúčovou súčasťou tohto procesu je dôkladná rádiologická charakterizácia lokality, ktorej cieľom je kvantifikovať úroveň jej radiačného zaťaženia a preukázať splnenie limitov pre uvoľnenie lokality do životného prostredia.

Súčasná prax rádiologických prieskumov využíva rôzne formy meraní – od statických meraní a odberov vzoriek po pokročilé in-situ techniky. V kontexte rozsiahlych lokalít existujúcich jadrových zariadení sa čoraz významnejšie objavuje potreba efektívnych a flexibilných metód, ktoré by umožnili rýchle, spoľahlivé a priestorovo orientované meranie s dostatočnou citlivosťou. Jednými z takýchto sú práve skenovacie merania, ktoré umožňujú získať rádiologické údaje s priestorovými informáciami.

Predkladaná dizertačná práca sa sústreďuje na návrh a vývoj metodiky skenovacieho merania pôdy, ktorá je špecificky prispôbená potrebám vyradovania jadrových zariadení v podmienkach Slovenskej republiky. Dôraz je kladený na výber vhodného detekčného systému, definovanie parametrov merania a spôsob vyhodnocovania údajov. Práca reaguje na absenciu štandardizovaného prístupu v tejto oblasti, a zároveň prináša riešenia priamo aplikovateľné v praxi – najmä v projektoch vyradovania elektrární A1 a V1 na území Slovenskej republiky.

Cieľom práce je nielen zdokonaľiť existujúce prístupy, ale tiež poskytnúť systematický rámec pre ich uplatnenie v podmienkach, kde je potrebné optimalizovať vedeckú presnosť s prevádzkovou realizovateľnosťou. Výsledky výskumu prispievajú k zvýšeniu environmentálnej bezpečnosti, transparentnosti vyradovacích procesov a k podpore rozhodovacích procesov v procese charakterizácie a uvoľňovania lokality do životného prostredia.

1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Mnoho dokumentov [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], poskytuje návod pre realizáciu záverečného prieskumu lokality zariadenia a popisuje viacero prístupov, ktoré však majú spoločné základy. Vyrad'ovanie, ktoré nasleduje po nápravných opatreniach (z anj. Remediation) zvyčajne vyžaduje preukázanie zodpovednému úradu, že úsilie vyčistenia lokality bolo úspešné, a že bolo splnené uvoľňovacie kritérium (špecifický limit dozoru).

Identifikácia známych alebo potenciálne kontaminovaných lokalít sa dá zvyčajne vykonať jednoducho pred začatím procesu vyrad'ovania. Vďaka informáciám o lokalite a jej použití je možné poznať a predpokladať prítomnosť RN. V opačnom prípade je možné tieto informácie získať z viacerých zdrojov, napr. zo starých záznamov o radiačných únikoch, z pozemných a leteckých rádiologických prieskumov, od kontaktov, ktoré majú predošlé vedomosti alebo skúsenosti s lokalitou, zo záznamov o monitorovaní ŽP, zo záznamov o minulom skladovaní rádioaktívnych materiálov na lokalite, a pod.

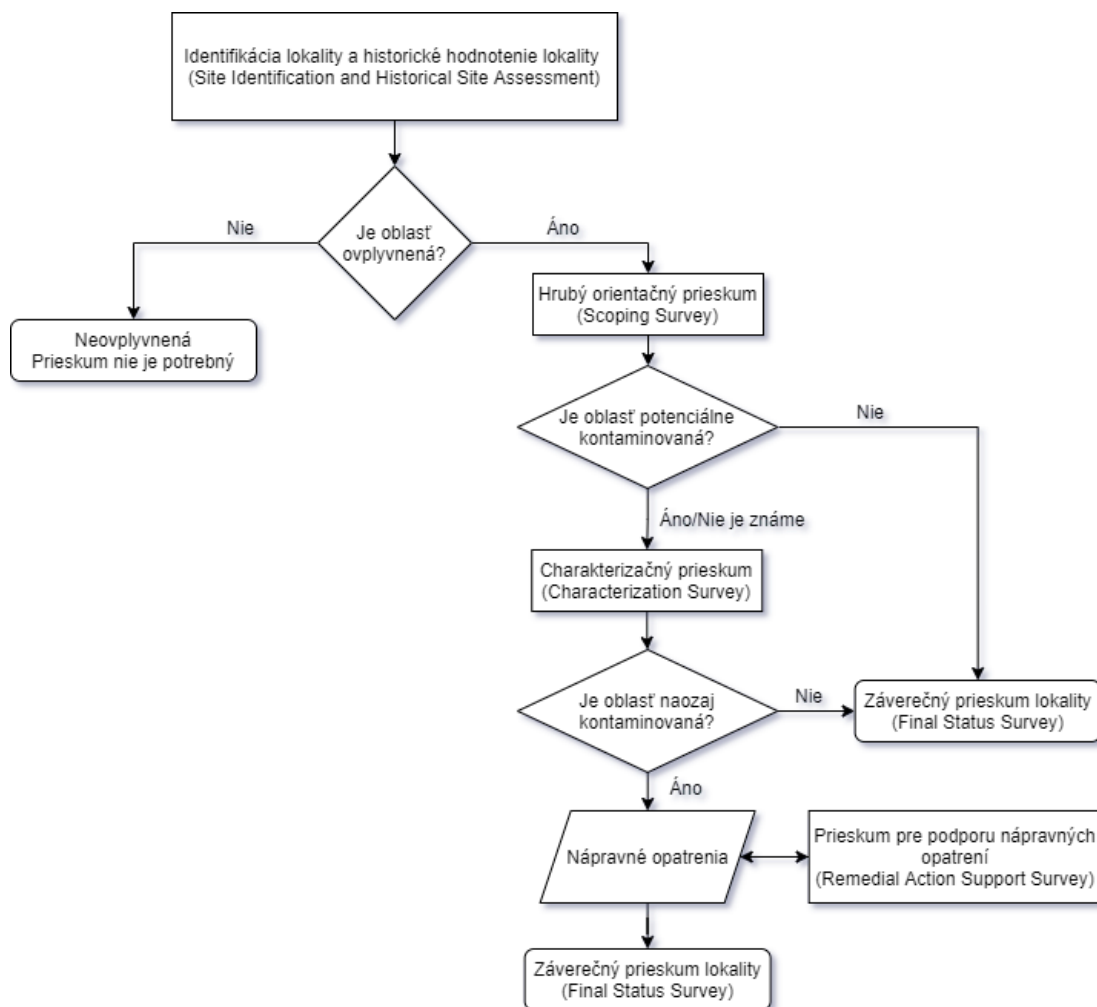
Ak historické hodnotenie lokality naznačuje, že oblasť môže byť ovplyvnená, pristupuje sa k hrubému orientačnému prieskumu lokality. Tieto prieskumy poskytujú špecifické informácie na základe obmedzených a hrubých meraní (napr. meranie dávkového príkonu, námatkové meranie povrchovej kontaminácie, kontrola potenciálne ovplyvnených oblastí na základe historických poznatkov, atď.). Hlavnými úlohami hrubého orientačného prieskumu sú najmä poskytnúť vstupné údaje k prípadnému charakterizačnému prieskumu, ohodnotiť, či by mohol byť prieskum lokality v prípade charakterizačného a záverečného prieskumu optimalizovaný, vykonať predbežné hodnotenie radiačnej záťaže a iných potenciálnych nebezpečenstiev, podporiť klasifikáciu lokality pre následné zaobchádzanie v prípade nápravných opatrení, a pod.

Ak boli v prípade hrubého orientačného prieskumu lokalizované kontaminované miesta, pristupuje sa k charakterizačnému prieskumu. Charakterizačný prieskum sa plánuje na základe historického hodnotenia lokality a hrubého orientačného prieskumu. Charakterizačný prieskum je najkomplexnejší zo všetkých typov prieskumov a generuje najviac údajov. Patrí sem príprava referenčnej meracej siete, systematické aj rozhodovacie merania. Rozhodnutie o tom, ktoré materiály sa budú skúmať je špecifické pre danú lokalitu (betónové povrchy, povrchová vrstva pôdy, podpovrchová vrstva pôdy, atď.). Medzi hlavné ciele charakterizačného prieskumu patria: určenie povahy a rozsahu kontaminácie, zozbieranie dát pre podporu nápravných opatrení a technológií na to určených, hodnotenie v akej miere môže byť optimalizovaný záverečný prieskum a poskytnutie údajov pre návrh a rozsah záverečného prieskumu [11], [12].

Ak je lokalita adekvátne charakterizovaná a sú vytýčené miesta so zvýšenou kontamináciou ako odvodený limit pre uvoľnenie do ŽP, nasleduje príprava dekontaminačného plánu. Prieskum pre podporu nápravných opatrení sa realizuje v reálnom čase počas vykonávania nápravných opatrení, pričom poskytuje reálny obraz o miestach, ktoré podliehajú nápravným opatreniam. Inými slovami, v reálnom čase poskytuje predstavu o tom, kde a do akej miery ešte treba prijať a vykonať nápravné opatrenia.

Záverečný prieskum slúži na preukázanie súladu s legislatívnymi požiadavkami pre uvoľnenie lokality do ŽP. Poskytuje dáta pre legitimizáciu, že všetky vyšetované rádiologické parametre spĺňajú stanovené limity a podmienky. Hlavným cieľom záverečného prieskumu je teda demonštrovať, že potenciálne dávkové riziko z každej jednotkovej oblasti lokality sa nachádza pod limitom pre obmedzené, alebo neobmedzené uvoľnenie do ŽP.

Na Obr. 1 sa nachádza ilustračná zjednodušená schéma postupu rádiologického prieskumu lokality.



Obr. 1 Ilustračná zjednodušená schéma postupu rádiologického prieskumu lokality.

Rádiologický prieskum poskytuje údaje na preukázanie, že všetky požadované rádiologické parametre neprevyšujú odvodené referenčné úrovne koncentrácie RN. Záverečný prieskum je realizovaný po tom, ako sú vykonané všetky činnosti súvisiace s odstraňovaním kontaminácie, a teda lokalita by mala byť relatívne čistá, pričom sa očakáva, že jednotlivé plochy spĺňajú kritériá pre uvoľnenie do životného prostredia. Nevykonáva sa naraz na celej ploche, ale je rozdelený na čiastkové prieskumy. Plánovanie, implementácia a posudzovanie nameraných údajov je realizované nezávisle, pre každý typ prieskumu. Podľa dokumentu MARSSIM [4] je jediným kritériom pre uvoľnenie lokality do životného prostredia dávka pre jednotlivca, ktorá nesmie prekročiť príslušný limit. Tento limit si stanovuje každá krajina samostatne. Z pohľadu zákona SR č. 87/2018 Z. z. je limit pre neobmedzené uvoľňovanie lokality práve efektívna dávka 10 $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ [13].

Pre úspešné priame meranie alfa, beta alebo gama aktivity je potrebné zabezpečiť dostatočne citlivú inštrumentáciu a použité techniky merania. Typ prístroja a spôsob vykonávania priameho merania sa vyberajú podľa typu prítomnej potenciálnej kontaminácie, požiadaviek na citlivosť merania a cieľov rádiologického prieskumu. Priame merania sa uskutočňujú umiestnením prístroja do vhodnej vzdialenosti nad povrchom, vykonaním diskretného merania vo vopred stanovenom časovom intervale (napr. 10 s, 60 s, atď.) a zaznamenaním nameranej hodnoty. Priame merania sa môžu vykonávať náhodne v miestach zvolenej referenčnej siete, môžu byť vykonávané systematicky na identifikáciu malých oblastí so zvýšenou aktivitou (podpora pre skenovacie merania), alebo môžu byť vykonávané na potenciálne kontaminovaných miestach určených skenovacím prieskumom ako súčasť identifikácie zdrojov zvýšenej odozvy detektora pri skenovanom prieskume. Existuje veľké množstvo prístrojov na meranie gama aktivity v teréne, avšak všetky sa používajú v podstate rovnakým spôsobom. Detektor je umiestnený v určenej vzdialenosti od meraného povrchu a merané údaje sa zaznamenávajú počas stanovenej doby. Vzdialenosť zdroj-detektor sa všeobecne určuje kalibráciou prístroja – pri meraní nízkoenergetických gama fotónov sa detektor často umiestňuje bližšie k meranému povrchu, aby sa zvýšila účinnosť. Čas, potrebný na vykonanie merania sa môže líšiť od veľmi krátkeho (napr. 10 s), až po veľmi dlhý (napr. niekoľko dní) v závislosti od typu detektora a požadovaného detekčného limitu. Všeobecne platí, že čím je nižší požadovaný detekčný limit, tým dlhší je čas potrebný na vykonanie merania. Kolimátor sa môže použiť v oblastiach, kde by aktivita z priľahlých alebo blízkych oblastí mohla interferovať s priamym meraním. Kolimátor (zvyčajne olovo, volfrám alebo oceľ) slúži ako tienenie detektora pred nežiadúcim žiarením dopadajúcim do oblasti detektora, a teda zvyšuje pravdepodobnosť, že dopadajúce fotóny do detektora pochádzajú z meraného povrchu.

Dobrym príkladom priameho merania je využitie prenosného HPGe detektora ako in-situ spektrometra, ktorý možno využiť na odhad koncentrácií rádionuklidov emitujúcich gama žiarenie. Rovnako ako v prípade laboratórneho HPGe detektora s viackanálovým analyzátorom (MCA), môže in-situ gama spektrometria rozlišovať prítomnosť rôznych rádionuklidov na základe charakteristických gama a röntgenových pík. Kalibrovaný detektor meria fluenciu fotónov špecifických energií, ktoré sú charakteristické pre konkrétne rádionuklidy. Fluenciu fotónov možno previesť na jednotky koncentrácie, resp. za určitých podmienok možno fluenciu previesť priamo na dávku alebo riziko ožiarenia pre potreby priameho porovnávania s uvoľňovacími úrovňami. Aj keď sa vo všeobecnosti tieto dozimetrické veličiny používajú, fundamentálnym základom hodnotenia úrovne kontaminácie a radiačnej záťaže na konkrétnych miestach by mala byť fluencia fotónov, nakoľko ide o priamo merateľnú fyzikálnu veličinu.

Pre merania v exteriéri, pri ktorých sa môže predpokladať, že kontaminant je distribuovaný v povrchovej vrstve pôdy, môže byť vhodné rovnomerné (homogénne) rozloženie aktivity v pôde pri prepočte fluencie na koncentráciu. Na miestach, kde sa pôda pravidelne orie, teda dochádza k homogenizácii pôdy, je tento predpoklad reálny – zvyčajne cca. 30 cm. Na miestach, kde sa aktivita pôvodne ukladala na povrchu a postupne časom prenikala hlbšie, bude mať skutočný hĺbkový profil vyššiu aktivitu na povrchu a postupne klesajúcu s hĺbkou. Mnohokrát sa hĺbkový profil aproximuje práve exponenciálnou funkciou, aj keď niektoré štúdie naznačujú, že ide skôr o Lorentzovu funkciu [14], [15]. V takomto prípade bude predpokladom rovnomerného hĺbkového profilu odhadnutá vyššia koncentrácia rádionuklidov v porovnaní s priemernou koncentráciou v tejto hĺbke – konzervatívny prístup. V prípadoch, kde môže byť hĺbkový profil obrátený, t.j. nízka koncentrácia na povrchu, ktorá sa zvyšuje s hĺbkou, predpoklad rovnomerného hĺbkového profilu podhodnotí priemernú koncentráciu rádionuklidov v tejto hĺbke. Z tohto dôvodu sa odporúča vzorkovať skúmanú lokalitu pomocou odberu jadrových vrtov za účelom zistenia skutočného hĺbkového profilu [8]. Jadrové vrty sa môžu odoberať počas charakterizačného prieskumu alebo prieskumu pre podporu nápravných opatrení, aby sa vytvoril hĺbkový profil lokality pre plánovanie záverečného prieskumu. Jadrové vrty sa môžu tiež odoberať počas záverečného prieskumu lokality za účelom stanovenia, resp. overenia správnosti prepočtu meranej fluencie fotónov na koncentráciu.

Pri meraniach v interiéri môžu in-situ nekolimované merania poskytnúť užitočné informácie o priemernej aktivite v celej miestnosti. V situáciách, keď aktivita nie je rovnomerne rozložená na povrchu možno použiť sériu kolimovaných meraní v systematickej sieti, ktorá pomôže takéto miesta zvýšenej kontaminácie odhaliť.

Ak je zariadenie a metodika používaná na skenovacie merania schopná poskytovať údaje v rovnakej, resp. dostačujúcej kvalite, ako je potrebné na priame meranie (napr. detekčný limit, umiestnenie meraní, schopnosť zaznamenávať a dokumentovať výsledky), potom sa namiesto priamych meraní môže použiť skenovanie. Výsledky by mali byť zdokumentované aspoň pre počet miest požadovaný pre štatistické testy. Niektoré systémy určené na priame meranie môžu navyše poskytovať aj skenovacie údaje, čo môže byť veľmi užitočným doplnkom, pokiaľ tieto údaje spĺňajú ciele skenovacieho prieskumu [8], [11], [12].

Skenovanie je proces pri ktorom operátor používa prenosné detekčné zariadenia na detekciu prítomnosti RN na špecifickej ploche (t.j., zariadenie pre terén, stenu, podlahu). Pojem skenovanie sa používa pre proces systematického pohybu prenosného radiačného detektora nad podozrivou plochou so zámerom lokalizovať RN kontamináciu. Vyšetrovacie úrovne pre skenovací prieskum sú určované počas plánovania prieskumu na identifikáciu plôch zvýšenej aktivity. Skenovací prieskum je vykonaný za účelom lokalizovať radiačné anomálie vyznačujúce zostatkovú celkovú aktivitu, ktorá môže vyžadovať vyšetrenie alebo opatrenie [8].

Malé oblasti so zvýšenou aktivitou zvyčajne predstavujú malú časť lokality alebo prieskumnej jednotky. Náhodné alebo systematické priame merania alebo vzorkovanie na bežne používaných mriežkach s rozstupom môžu mať malú pravdepodobnosť identifikácie takýchto malých plôch. Naproti tomu sú skenovacie merania častokrát rýchlejšie a lacnejšie. Z týchto dôvodov sa skenovacie merania zvyčajne vykonávajú pred priamymi meraniami a odberom vzoriek. Skenovacie merania naznačia potenciálne prítomné RN na základe historického hodnotenia lokality a cieľov prieskumu. Dokumentovanie výsledkov skenovacích meraní je veľmi dôležité, napr. pri identifikácii relatívne prudkých nárastov odozvy meracieho zariadenia, alebo pri identifikácii hraníc oblasti so zvýšenou odozvou.

Zvyčajne sa na skenovacie merania gama žiarenia využívajú scintilačné detektory NaI(Tl), pretože sú dostatočne citlivé, ľahko manipulovateľné a cenovo dostupné. Navrhovaný princíp merania podľa [4] a [8] je pohyb detektora po lokalite v tvare „S“ približne 6 cm od povrchu zeme takou rýchlosťou, aby bolo možné používateľovi zistiť požadovanú úroveň kontaminácie. Podľa [8], rýchlosť 0.5 m/s pre skenovacie meranie na identifikáciu prítomnosti RN emitujúcich gama žiarenie typicky postačuje, avšak rýchlosť je treba prispôsobiť podľa očakávanej odozvy detektora a vyšetrovanej úrovne kontaminácie.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Charakterizácia a prieskum koncového stavu lokality sú nevyhnutnou súčasťou každej fázy procesu vyradovania jadrových zariadení. Na vykonávanie týchto prieskumov existuje viacero postupov a odporúčaní, ktoré zahŕňajú popis metodiky a jej špecifik, vhodné prístrojové vybavenie na ich realizáciu, informácie o postupoch spracovania získaných údajov a pod. Uvoľnenie lokality do životného prostredia po vykonaní nápravných opatrení si zvyčajne vyžaduje preukázanie zodpovednému dozornému orgánu, že úsilie o vyčistenie lokality bolo úspešné, teda bolo splnené kritérium pre uvoľnenie lokality do životného prostredia. Ak ide o charakterizáciu lokality, častokrát ide o rozsiahle územie, kde je z finančného a časového hľadiska výhodné použiť skenovacie merania. Skenovacie merania môžu byť selektívne (napr. gama spektrometria) a neselektívne (napr. meranie dávkového príkonu). Jednou z čoraz populárnejších metód skenovania je meranie celkovej gama odozvy s cieľom identifikovať potenciálne kontaminované oblasti na veľkom území.

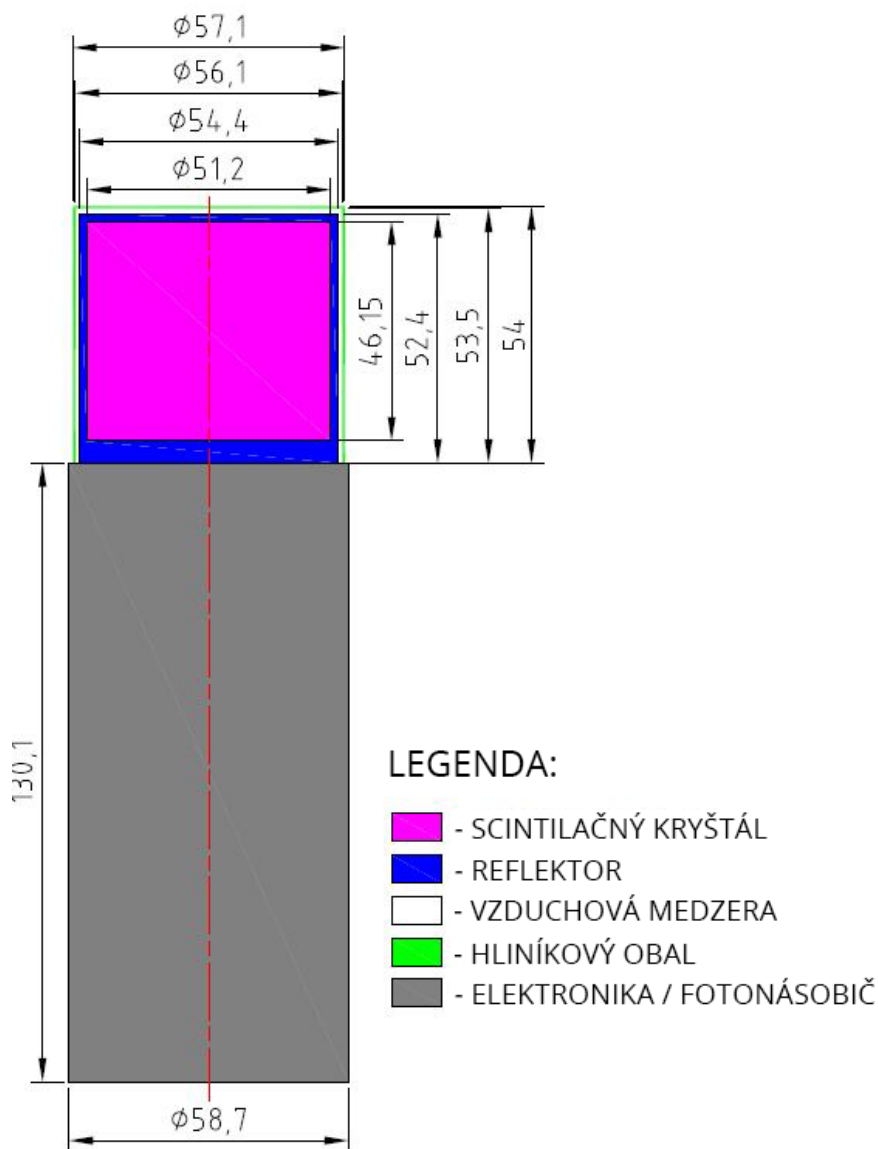
MARSSIM (Multi-Agency Radiological Survey and Site Investigation Manual, NUREG-1575) je dokument viacerých amerických inštitúcií (US Federal Agencies): Department of Defense (DOD), Department of Energy (DOE), Environmental Protection Agency (EPA) a Nuclear Regulatory Commission (NRC) vydaný v roku 2000. Tento poskytuje informácie o plánovaní, vykonávaní, hodnotení a dokumentovaní záverečného prieskumu koncového stavu (PKS) lokality kontaminovaného jadrového zariadenia, ktoré je vo fáze vyradovania. Záverečný PKS je realizovaný po tom, ako sú vykonané všetky činnosti súvisiace s odstraňovaním kontaminácie, a teda lokalita by mala byť relatívne čistá a očakáva sa, že jednotlivé plochy spĺňajú kritériá pre uvoľnenie do ŽP. Manuál MARSSIM poskytuje národne konzistentný konsenzuálny prístup k vykonaniu radiačného prieskumu a vyšetreniu potenciálne kontaminovaných lokalít. Využívanie manuálu MARSSIM pri uvoľňovaní materiálov a lokality do životného prostredia je tiež odporúčané Medzinárodnou agentúrou pre atómovú energiu.

Úlohou dizertanta je navrhnúť pracovný postup, zvoliť vhodný detektor a podmienky merania pre lokalizáciu miest s aktivitou prevyšujúcou uvoľňovacie úrovne pri charakterizácii rozsiahlych území lokality JZ. Vykonať analýzu neistôt pre zvolené podmienky merania a vyskúšať navrhnutý pracovný postup. Jednotlivé úlohy možno rozpísať do nasledujúcich bodov:

- Popísať súčasný stav využívania spektrometrických a nespektrometrických metód, rôznych detektorov a prístupov pri charakterizácii a uvoľňovaní materiálov a lokality

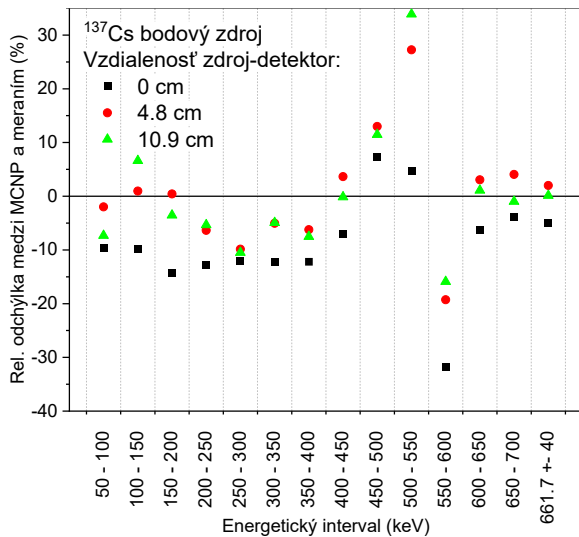
do životného prostredia ako procesov dôležitých vo všetkých fázach vyrad'ovania jadrových zariadení.

- Navrhnuť meraciu aparatúru s použitím detektora NaI(Tl) z dostupných vecných a finančných zdrojov. Vytvoriť, optimalizovať a verifikovať model detektora NaI(Tl) vo výpočtovom prostredí MCNP pre podmienky merania pôdy.
- Zozbierať údaje o výskyte prírodných RN v pôde podľa doterajších meraní na miestach v okolí jadrových elektrární A1 a V1, prípadne odobrať aj ďalšie vzorky v lokalite Bohunice a laboratórne vyhodnotiť.
- Vypočítať odozvu detektora pre prírodné rádionuklidy a zvolený energetický rozsah, napr. 100 až 1400 keV pre meranie celkovej odozvy od gama žiarenia. Vypočítať odozvu detektora pre záujmový kľúčový rádionuklid ^{137}Cs .
- Určiť minimálnu detekovateľnú aktivitu pre skenovacie meranie pri rôznych podmienkach merania.
- Navrhnuť spôsob merania, spôsob vyhodnotenia meraní, celkový vykonávací postup pri meraní a otestovať skenovacie meranie v areáli jadrovej elektrárne A1 v Jaslovských Bohuniciach.

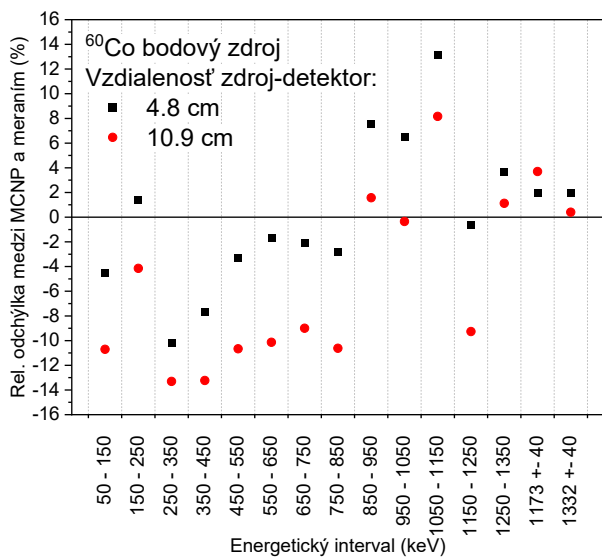


Obr. 3 Ilustrácia modelu NaI(Tl) detektora v MCNP po optimalizácii.

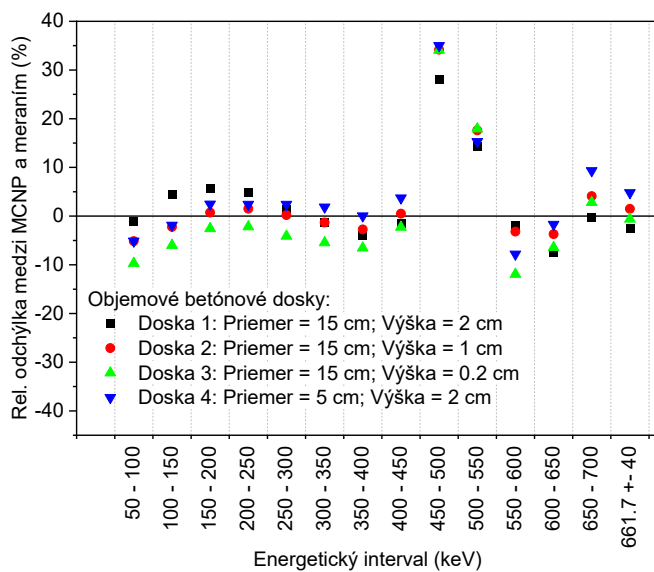
Model detektora NaI(Tl) vo výpočtovom prostredí MCNP bol optimalizovaný v energetickom rozsahu 59.5 keV až 1332 keV nielen pre píky úplnej absorpcie, ale aj v celom spektre, vrátane Comptonovho kontinua a Comptonovej hrany. Validácia správnosti a presnosti vytvoreného modelu bola realizovaná na základe porovnania relatívnych odchýlok medzi vypočítanými a nameranými spektrami v celom energetickom rozsahu (Obr. 4, Obr. 5 a Obr. 6), ktorá nepresiahla 5 %.



Obr. 4 Relatívne odchýlky medzi vypočítanými a nameranými účinnosťami - ^{137}Cs .



Obr. 5 Relatívne odchýlky medzi vypočítanými a nameranými účinnosťami - ^{60}Co .



Obr. 6 Relatívne odchýlky medzi vypočítanými a nameranými účinnosťami – objemové betónové zdroje.

Najlepšie dosiahnuté odchýlky prezentované v nedávnych karentovaných publikáciách [17], [18] naznačujú zhodu medzi vypočítanými a nameranými účinnosťami pre píky úplnej absorpcie na úrovni do 3 % pre model NaI(Tl) detektora. Žiadne nedávne relevantné štúdie neprezentujú presnosť modelu v celom spektre. Generická účinnosť pre charakterizovaný NaI(Tl) detektor v bežne používanom softvéri ISOCS deklaruje odchýlku na úrovni do 20 % [19]. Z vyššie uvedeného možno konštatovať, že bola dosiahnutá uspokojivá zhoda v porovnaní s ostatnými najnovšími dostupnými publikáciami s toleranciou 2 % [20], [21].

3.2 Rekonštrukcia pozad'ového spektra pomocou modelu detektora NaI(Tl)

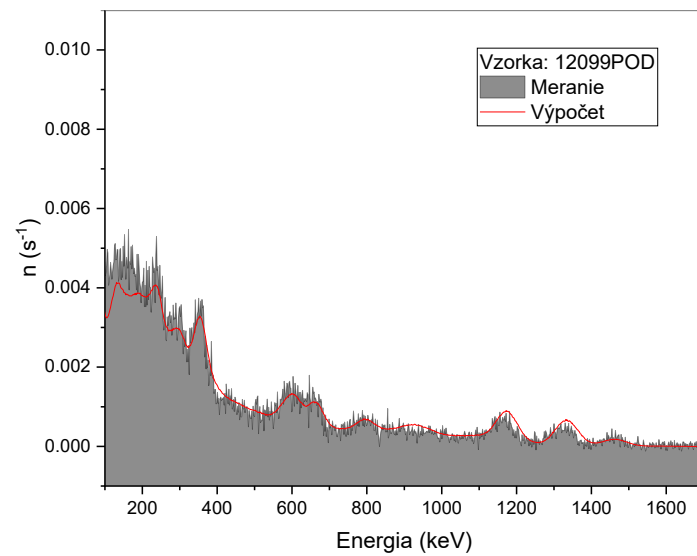
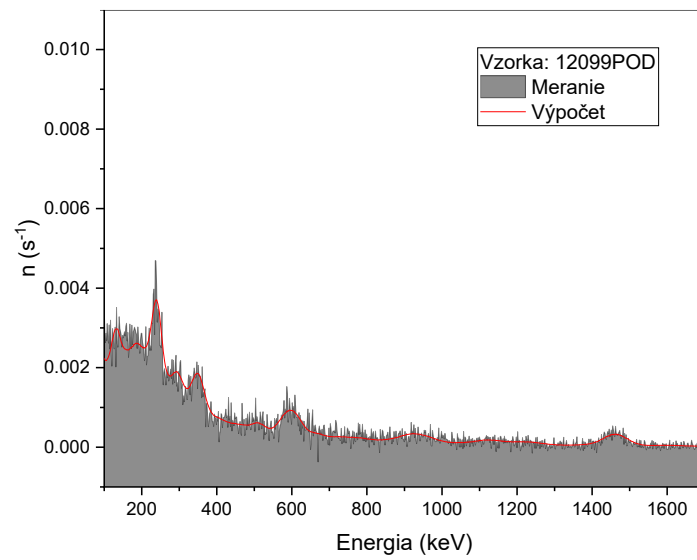
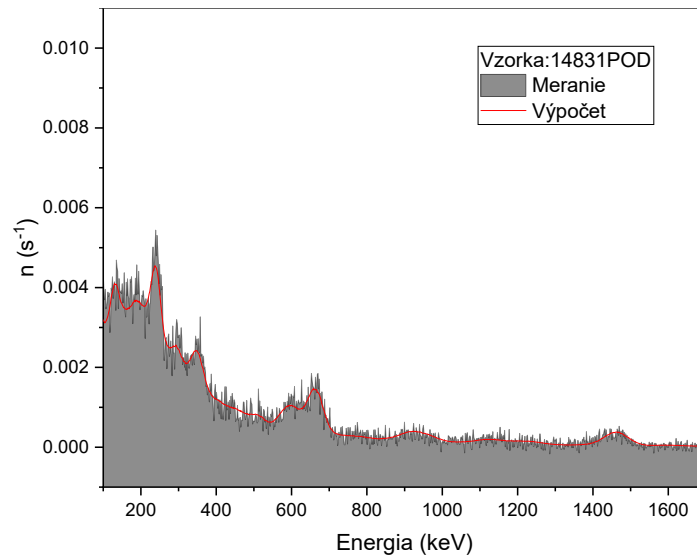
3.2.1 Stanovenie rádionuklidového vektora pôdy v okolí JE A1 a V1 na území SR

Pre stanovenie aktivity predmetných rádionuklidov boli odobrané vzorky pôdy z okolia JE A1 a V1 v Jaslovských Bohuniciach. Odobratých bolo 25 vzoriek pôdy a spracovaných štandardizovaným postupom laboratória spoločnosti VUJE, a.s, podľa vykonávacieho predpisu [22]. V Tab. 1 sa nachádza zoznam relevantných rádionuklidov a ich hmotnostných aktivít s rozšírenou neistotou. Merné aktivity boli stanovené ako priemerná hodnota všetkých 25 odobratých vzoriek pomocou priameho merania GSP, alebo analyticky na základe rádioaktívnej rovnováhy [23].

Tab. 1 Zoznam rádionuklidov stanovených pomocou odberu vzoriek.

Rádionuklidy	Aktivita (Bq/kg)	Rozšírená neistota, $k = 2$	
		Absolútna (Bq/kg)	Relatívna (%)
^{234}Pa	37.67	2.01	5.34
^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi	43.86	0.77	1.76
^{235}U , ^{227}Th , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Bi , ^{211}Bi	1.74	0.09	5.17
^{208}Tl	17.39	0.18	1.03
^{228}Ac	42.63	2.36	5.54
^{228}Th , ^{224}Ra , ^{212}Pb , ^{212}Bi	48.38	0.50	1.03
^{40}K	525.67	11.93	2.27
^{137}Cs	30.55	0.97	3.18

Kvôli verifikácii modelu detektora, verifikácii správnosti vybraných rádionuklidov nachádzajúcich sa v pôde, ich aktivít a výťažkov, ako aj verifikácii správnosti metodiky zostrojenia matice odozvy bolo vykonané porovnanie spektier meraných vzoriek pôdy s vypočítanými spektrami. Meranie vzoriek pôdy sa uskutočnilo v laboratórnych podmienkach v olovenej nízkoopozad'ovej komore. Na nasledujúcom Obr. 7 je porovnanie vypočítaných a nameraných spektier vzoriek pôdy – 14831POD, 14817POD (vzorky pôdy z okolia elektrární A1 a V1) a 12099POD (IAEA vzorka). V energetickom intervale 100 – 1400 keV, ktorý je predmetný v prípade návrhu skenovacieho merania, relatívna odchýlka medzi vypočítanými a nameranými spektrami neprekročila 5 % [24].



Obr. 7 Porovnanie nameraných a vypočítaných spektier vzoriek pôdy.

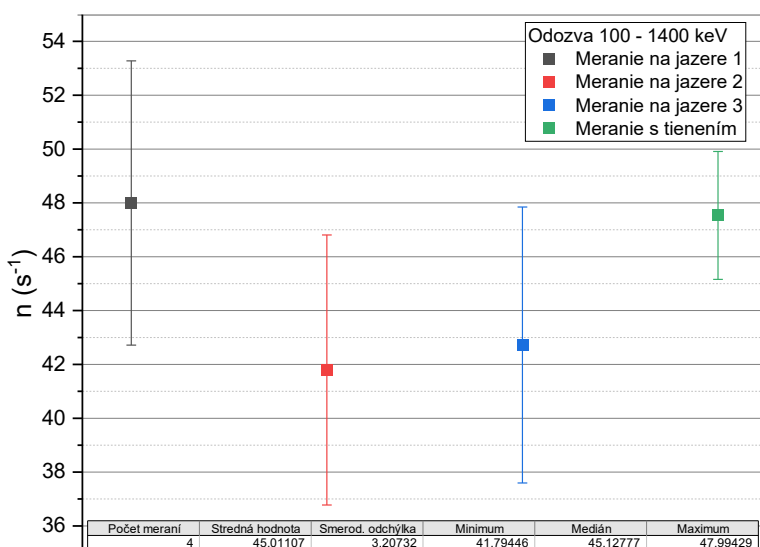
3.2.2 Stanovenie odozvy detektora NaI(Tl) od kozmického žiarenia v spektre pozadia

Príspevok od kozmického žiarenia bol stanovený priamym meraním. Priame meranie bolo vykonané dvomi spôsobmi - 5 cm nad olovom tienenou pôdou a nad vodnou hladinou.

V prvom prípade bolo použité olovené tienenie hrúbky 5 cm a bolo umiestnené priamo medzi pôdou a detektorom a v bezprostrednej blízkosti tienenia.

V druhom prípade bol príspevok kozmického žiarenia zmeraný priamo na vodnej hladine pre porovnanie oboch prístupov a potvrdenie správnosti toho prvého. Pre tieto účely boli vykonané tri takmer 5 hodinové merania na člne na jazere. Jazero má dĺžku približne 550 m a šírku 130 m. Orientačná hĺbka jazera v mieste merania je asi 1.5 až 2 m.

Namerané spektrá na vodnej hladine boli porovnané aj spoločne s meraním na zemi v intervale od 100 do 1400 keV. Stredná hodnota odozvy od kozmického žiarenia je 45.01 ± 3.21 impulzov za sekundu. Na Obr. 8 sa nachádzajú namerané početnosti so základnými údajmi z merania.



Merania kozmického žiarenia

Obr. 8 Výsledky merania príspevku kozmického žiarenia.

3.3 Analýza neistôt

Celková neistota bola vypočítaná pomocou zákona šírenia chýb a jednotlivé príspevky podľa Tab. 2 sú nasledujúce:

- Rozmer pôdy – neistota spôsobená nedostatočne veľkým pôdnym segmentom.
- Hustota pôdy – neistota spôsobená zmenou hustoty pôdy určená ako maximálna možná odchýlka účinnosti v prípade zmeny hustoty pôdy.

- Zloženie pôdy – neistota spôsobená zmenou zloženia pôdy určená ako maximálna možná odchýlka účinnosti v prípade zmeny zloženia pôdy.
- Model + štatistická neistota – maximálna neistota spôsobená nesprávne určenými parametrami modelu detektora spolu so štatistickou neistotou stochastického výpočtu MCNP.

Tab. 2 Celková neistota a individuálne príspevky jednotlivých parametrov do celkovej neistoty stanovenia pozadia/skenovacej MDA.

Celková neistota	18.34 %
Príspevok do celkovej neistoty	Relatívna neistota príspevku (%)
Rozmer pôdy	1.00
Hustota pôdy	7.04
Zloženie pôdy	1.85
Model + štatistická neistota	13.34

3.4 Stanovenie skenovacej MDA pre vybranú geometriu merania

Skombinovaný vzťah pre výpočet skenovacej MDA podľa MARSSIM [4], [5], [8] možno všeobecne vyjadriť nasledovne

$$scan\ MDA\ \left(\frac{Bq}{kg}\right) = \frac{v \cdot d' \cdot \sqrt{B_i}}{L_{eff} \sqrt{p_{sur}} \varepsilon_x Y_x \cdot m}, \quad (1)$$

kde

v ($m \cdot s^{-1}$) je rýchlosť skenovania,

d' (-) je index citlivosti popisovaný vyššie,

B_i (-) je počet impulzov v pozadí pre časový interval i (s), pričom i sa dá napísať ako:

$$i = \frac{L_{eff}}{v} \quad (2)$$

L_{eff} (m) je efektívna dĺžka – priemer, priemer maximálnej kruhovej plochy pôdy, z ktorej môže detektor počas merania detegovať žiarenie v špecifickej geometrii,

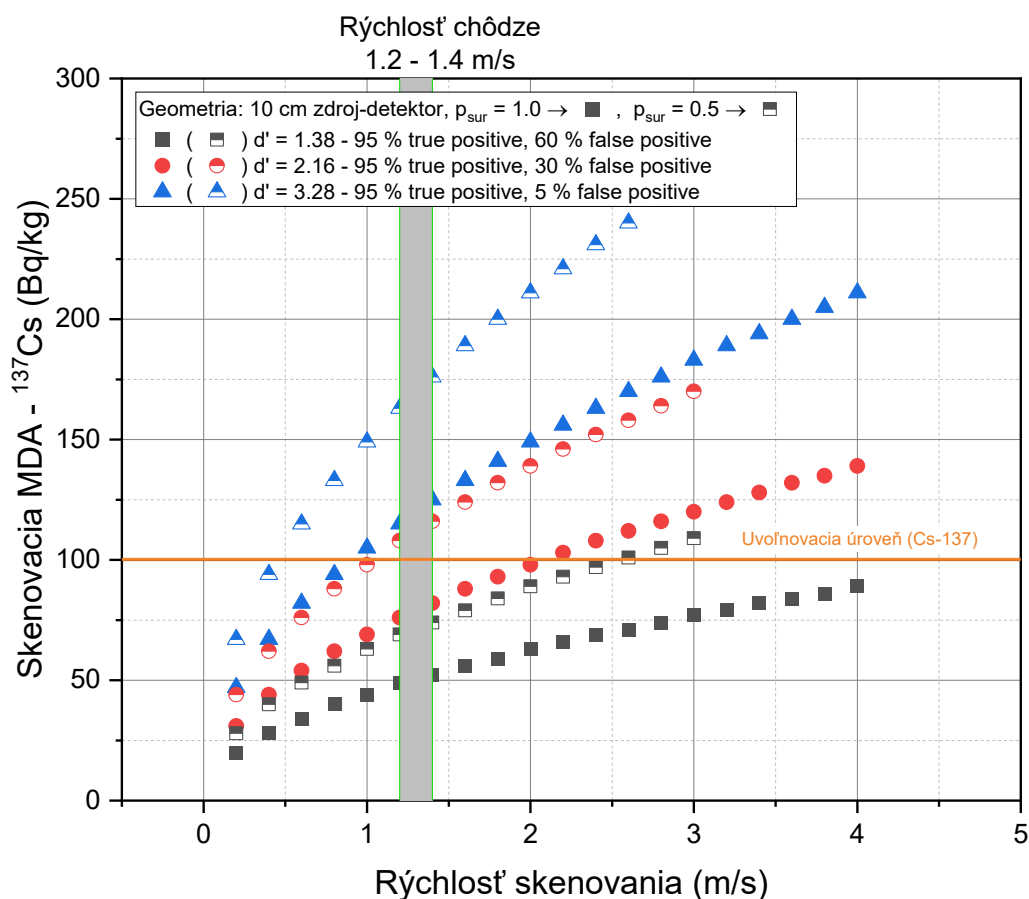
P_{sur} (-) je výkonnosť vykonávateľa merania – miera zlyhania pri meraní vplyvom ľudského faktoru,

ε_x (-) je účinnosť pre záujmový rádionuklid počas skenovania,

Y_x (-) je výťažok záujmového rádionuklidu,

m (kg) je hmotnosť vyšetřovaného objemu pôdy pri skenovaní [8].

Na nasledujúcom obrázku Obr. 9 sa nachádzajú vypočítané hodnoty skenovacej MDA v závislosti od rýchlosti skenovania. Šedá oblasť na obrázku vyznačuje rýchlosť skenovania, ktorá zodpovedá priemernej rýchlosti chôdze. Skenovacie MDA vypočítané pri použití parametra $p_{sur} = 0.5$ (symboly sfarbené do polovice) reprezentujú stav, že skenovanie vykonáva človek, teda môže sa dopustiť chyby spôsobenej ľudským faktorom. Naopak, v prípade použitia parametra $p_{sur} = 1$ (plno sfarbené symboly), ide o skenovanie vykonávané autonómne. Na obrázku tiež možno vidieť závislosť skenovacej MDA od indexu citlivosti d' . V prípade indexu citlivosti $d' = 1.38$ ide o stav, kedy je zaznamenaných 95 % správne pozitívnych a 60 % nesprávne pozitívnych výsledkov, resp. v prípade $d' = 2.16$ ide o 95 % správne pozitívnych a 30 % nesprávne pozitívnych výsledkov, resp. v prípade $d' = 3.28$ ide o 95 % správne pozitívnych a 5 % nesprávne pozitívnych výsledkov. Vo všetkých troch prípadoch je falošne negatívnych výsledkov iba 5 %.



Obr. 9 Závislosť skenovacej MDA od rýchlosti skenovania pre rôzne parametre d' a p_{sur} .

4 VÝSLEDKY DIZERTAČNEJ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV

Prototyp meracej aparatúry bol poskladaný z viacerých súčastí, a to najmä z týchto: detektor s fotonásobičom, MCA, GNSS prijímač, ťahací vozík a držiak detektora.



Obr. 10 Fotografia meracej aparatúry.

Zvolená plocha pre účely pilotného skenovacieho merania mala rozlohu približne 1775 m² a nachádza sa v areáli jadrovej elektrárne A1 v Jaslovských Bohuniciach. Jednalo sa o relatívne rovnú, prevažne trávnatú oblasť bez významných prekážok. Nakoľko sa nejedná o kontaminovanú plochu, pred meraním boli v tejto oblasti náhodne rozmiestnené dva bodové zdroje ¹³⁷Cs (viď. Obr. 11 a Tab. 3).

Tab. 3 Informácie o použitých bodových zdrojoch.

Sériové číslo bodového zdroja	RN	Aktivita* (kBq)
EG3 863-30	¹³⁷ Cs	136.6
EG1 584-99	¹³⁷ Cs	6.8

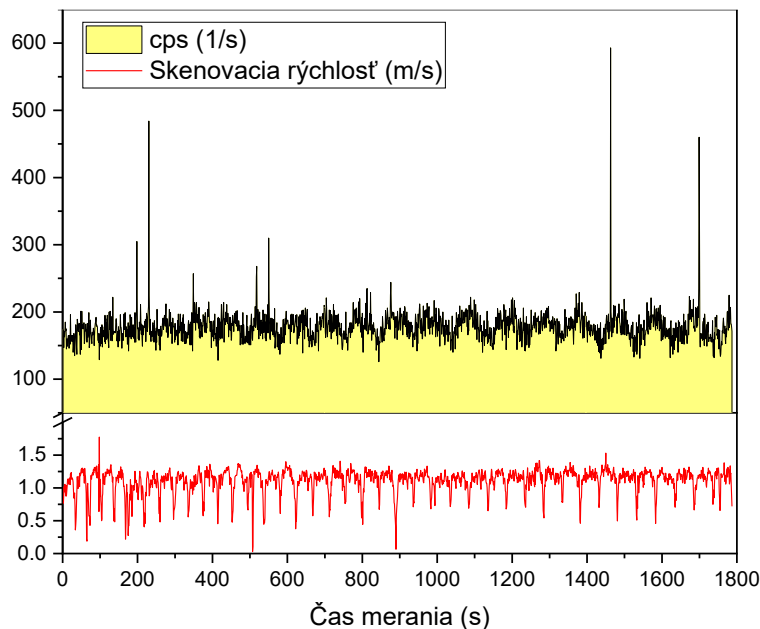
* – aktivita prepočítaná ku dňu merania

Následne bolo vykonané meranie formou ťahania vozíka po ploche v tvare „S“, inými slovami, v paralelných líniách s rozstupom približne 80 cm. Pri tomto pilotnom meraní sa zúčastnili dvaja pracovníci, nakoľko prototyp vozíka mal malé kolieska a bolo potrebné dvoch pracovníkov na ťahanie vozíka po trávnom povrchu.



Obr. 11 Bodový zdroj ^{137}Cs umiestnený na vyšetrovanej ploche (vľavo) a fotografia počas merania (vpravo).

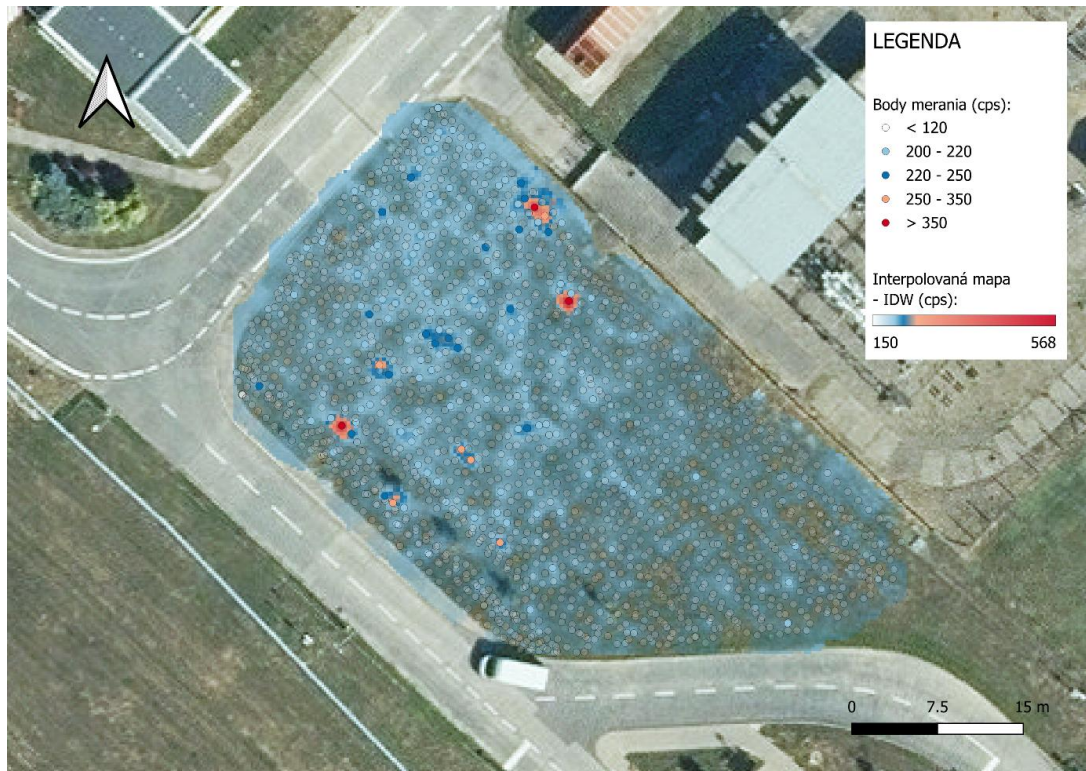
Na nasledujúcom Obr. 12 sa nachádza časová závislosť skenovacej rýchlosti a nameranej početnosti počas pilotného skenovacieho merania na vybranej lokalite. Priemerná skenovacia rýchlosť bola 1.2 m/s, čo zodpovedá dolnej hranici priemeru štandardnej chôdze človeka.



Obr. 12 Nameraný počet impulzov a rýchlosť skenovania počas merania.

Keďže cieľom skenovacieho merania je zobrazit' namerané dáta priestorovo, pre tento účel bolo použitý voľne dostupný softvér QGIS [25] a SAGA GIS [26]. Na nasledujúcom Obr. 13

sa nachádza radičná mapa vybranej lokality získaná skenovacím meraním a spracovaním nameraných údajov.



Obr. 13 Radičná mapa vybranej lokality.

Radiačné mapy na Obr. 13 boli zostrojené pomocou interpolácie nameraných bodov početnosti – cps. Pre interpoláciu bodov bola použitá metóda inverznej váženej vzdialenosti (z anj: Inverse Distance Weighted - IDW).

Pri predpoklade, že priemerná skenovacia rýchlosť je 1.2 m/s, výkonnosť vykonávateľa p_{sur} je 0.5 a index citlivosti d' je 1.38 (ide o 95 % správne pozitívnych a 60 % nesprávne pozitívnych výsledkov), možno vypočítať, že skenovacia MDA pri takejto konfigurácii aj s uvažovaním neistoty je 69 Bq/kg pre ^{137}Cs pri meraní celkovej odozvy od gama žiarenia v energetickom intervale od 100 keV – 1400 keV. Hodnota cps zodpovedajúca uvoľňovacej úrovni ^{137}Cs pri takejto konfigurácii je 330. Limit cps pre označenie potenciálne kontaminovaného miesta bol zvolený 250 cps, čo zodpovedá aktivite približne 88 Bq/kg. Výkonnosť vykonávateľa merania bola zvolená na hodnotu 0.5, avšak tu treba jednoznačne povedať, že odporúčaná hodnota medzi 0.5 až 0.75 sa vzťahuje iba na stav, že vykonávateľ merania sa bude rozhodovať na mieste.

Z Obr. 13 možno určiť 8 potenciálne kontaminovaných miest – vid' Obr. 14. Je tiež treba poznamenať, že interpolácia bodov (namerané body sú viditeľné na Obr. 13 hore) pomohla identifikovať ešte jedno hraničné miesto č. 3. V skutočnosti bolo na lokalite umiestnených 7 zdrojov, čo znamená, že falošne pozitívnych výsledkov je v tomto prípade 13 % (práve na

mieste č. 3 sa zdroj nenachádzal). Pre kompletne doplnenie počiatkových podmienok je potrebné poznamenať, že na vyznačených potenciálne kontaminovaných miestach č. 1, 2, 4 a 5 sa nachádzal bodový zdroj EG3 Cs-137 (silnejší) a na miestach č. 6, 7 a 8 sa nachádzal bodový zdroj EG1 Cs-137 (slabší).



Obr. 14 Detail radiacej mapy s vyznačenými potenciálne kontaminovanými miestami.

Čistý čas merania počas tohto pilotného projektu bolo necelých 30 min (29.78 min). S uvažovaním celkovej meranej plochy a rozstupov medzi jednotlivými prechodmi lokalitou možno konštatovať, že takouto rýchlosťou bol preskenovaný 1 m^2 za 1 sekundu. Avšak treba brať do úvahy aj čas strávený dodatočnými meraniami. V tomto prípade by išlo o celkovo 8 statických in-situ meraní, maximálne 10, ak by bol použitý konzervatívny prístup. Počas pilotného uvoľnenia časti lokality kontrolovaného pásma JE A1 spod administratívnej kontroly bola zistená výkonnosť „in-situ“ statických meraní pomocou 1.5×1.5 palcového scintilačného tieneneho detektora LaBr na úrovni 50 m^2 za jeden 7.5 hodinový pracovný deň (dvaja pracovníci, meraný je každý 1 m^2). To zodpovedá 0.3 človek-hodiny na 1 m^2 . Pri takejto výkonnosti by charakterizácia rovnakej lokality, aká bola použitá pre účely pilotného skenovacieho merania, trvala približne 266 hodín. Aj s uvažovaním dodatočných statických in-situ meraní na vyznačených potenciálne kontaminovaných miestach po vykonaní skenovacieho merania by takáto forma charakterizácie lokality trvala 2 hodiny. Podľa uvedeného nemožno spochybniť časovú efektívnosť takejto prístupu použitia skenovacieho merania v kombinácii s overovacími in-situ statickými meraniami.

Vyhodnotená bola aj výkonnosť skenovacieho merania v porovnaní so štandardným prístupom statických meraní v sieti 1 x 1 m, čo je súčasný postup v praxi v súlade s platnou legislatívou na území SR. V nasledujúcej Tab. 4 sa nachádza porovnanie výkonnosti skenovacieho merania a štandardného prístupu (statické merania v sieti) normované na 1 m² plochy. Pri tomto vyhodnotení bolo uvažované aj s dodatočnými overovacími statickými meraniami všetkých označených potenciálne kontaminovaných miest. Pri tomto časovom vyhodnotení je vzaté do úvahy, že aj skenovacie a aj statické merania vykonávajú dvaja pracovníci. Je potrebné doplniť, že i tento prístup je konzervatívny, nakoľko mnohokrát nebude potrebné vykonávať dodatočné statické merania, ak sa nameraná aktivita označeného potenciálne kontaminovaného miesta nachádza významne nad MDA.

Tab. 4 Porovnanie výkonnosti statického a skenovacieho merania.

Potenciálne kontaminovaná plocha	0%	25%	50%	75%	100%
	Výkonnosť metódy (s / 1 m²)				
Skenovanie + dodatočné overenie	1	136	271	406	541
Statické meranie	540				

Je zrejmé, že v prípade nekontaminovanej vyšetrovanej plochy, čo však môže reprezentovať aj stav, že skenovacie meranie je dostatočne citlivé pre charakterizáciu alebo rozhodovanie o uvoľnení lokality bez dodatočných statických meraní, je časový náskok skenovacieho merania enormný. Ak by vyšetovaná lokalita mala 2000 m², čo zodpovedá približne takej lokalite, aká bola vyšetovaná počas pilotného prieskumu v tejto práci, skenovací prieskum by trval približne pol hodinu. Ak by sa vykonávali na takejto lokalite statické merania v sieti 1 x 1 m, trvalo by to približne 300 hodín. Ak by však bolo 50 % lokality označenej ako potenciálne kontaminovaná a boli by potrebné overovacie statické merania, trvalo by to približne 150 hodín. Z tejto jednoduchej úvahy vyplýva, že ak by sa vykonávalo kombinované meranie (či už charakterizačné alebo uvoľňovacie), tak platí, že čím má lokalita nižší potenciál byť kontaminovaná, tým výhodnejšie je použiť skenovacie meranie. K tejto úvahe je potrebné dodať, že 2000 m² je približne 0.5 % celkovej plochy areálu JE A1 a V1. Navyše, potenciál výskytu kontaminácie na tejto rozsiahlej lokalite mimo KP je relatívne nízky. Charakterizácia a uvoľnenie takejto rozsiahlej lokality pri súčasných legislatívnych požiadavkách konvenčným prístupom, ktorý predstavujú statické merania v sieti, je takmer nemožné, nakoľko je požadované zmerať 100 % plochu.

Meracia aparátúra a postup skenovania v tejto konfigurácii je možné v praxi použiť ako komplementárnu metódu k štandardnému prístupu, čo významne zníži časové a finančné zaťaženie na vykonanie charakterizačného alebo uvoľňovacieho prieskumu lokality.

5 SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV, ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY

Táto dizertačná práca sa zaoberala vývojom metodiky skenovacieho merania pôdy s cieľom jej využitia pri rádiologickej charakterizácii lokalít a pri záverečnom prieskume lokalít vyradovaných jadrových zariadení. Hlavným zámerom bolo vytvoriť prakticky aplikovateľný postup, ktorý zabezpečí rýchle a efektívne meranie malých aj veľkých plôch s cieľom identifikovať potenciálne kontaminované oblasti a podporiť proces charakterizácie a rozhodovania pri uvoľňovaní lokalít do životného prostredia.

V rámci riešenia bola vypracovaná kompletná metodika detekčného systému so scintilačným detektorom NaI(Tl). Zahŕňala výber geometrie merania, modelovanie odozvy detektora pomocou metódy Monte Carlo vo výpočtovom prostredí MCNP, výpočet minimálnej detegovateľnej aktivity (MDA) pri skenovaní, ale aj vyhotovenie pilotnej verzie meracej aparatury. Navrhovaný postup systematicky rieši kľúčové analytické a prevádzkové vlastnosti a parametre súvisiace s výkonom merania aj vyhodnotením nameraných dát pre potreby projektov vyradovania lokalít elektrární A1 a V1 v Jaslovských Bohuniciach. Navrhnutá metodika a postup sú rámcovo použiteľné aj pre iné lokality, nakoľko poskytujú kritický technický základ v striktnom súlade s požiadavkami a odporúčaniami IAEA a manuálmi MARSSIM a EURSSEM. Je však potrebné poznamenať, že platná legislatíva na území Slovenskej republiky nie je pripravená na uplatnenie manuálu MARSSIM alebo EURSSEM, nakoľko zákon definuje, že priemerná hodnota plošnej aktivity povrchovej kontaminácie pôdneho segmentu uvoľňovaného do ŽP získaná reprezentatívnym meraním (maximálne 100 m²) neprekročí limit pre uvoľnenie do ŽP. Významnou súčasťou práce bola aj analýza neistôt, ktorá zohľadnila parametre ako zloženie a hustota pôdy, geometrické rozloženie potenciálnej kontaminácie, ako aj vplyv prirodzeného pozadia pôdy a okolia, vrátane príspevku kozmického žiarenia.

Experimentálna časť práce zahŕňa metodické merania odobratých vzoriek pôdy pre účely stanovenia RN vektora pôdy, hustoty pôdy a meranie príspevku kozmického žiarenia, ako aj zostrojenie prototypu meracej aparatury a realizáciu pilotného skenovacieho prieskumu v teréne. Teoretické, technicky prísne úvahy, a praktické merania potvrdili uplatniteľnosť navrhovanej metodiky a postupu v praxi, ale poskytli tiež podnety na ďalšie technické a prakticky realizovateľné zlepšenia. Otvárajú priestor pre ďalší výskum v oblasti kombinácie skenovacích technológií s pokročilou dátovou automatizáciou a integráciou s GIS systémami. Z dlhodobého hľadiska má vyvinutá metodika potenciál stať sa štandardným nástrojom pri

hodnotení koncového stavu lokalít a uvoľňovaní území do životného prostredia. V tomto štádiu rozpracovania už je možné metodiku a postup použiť ako komplementárnu meraciu procedúru k existujúcemu štandardnému prístupu použitia statických meraní v sieti.

Hlavným prínosom využívania navrhutej metodiky v oblasti charakterizácie a uvoľňovania lokality do životného prostredia je vo forme ušetreného času pri výkone prieskumu lokality v porovnaní s aktuálnym štandardným prístupom, čo možno aj priamoúmerne premietnuť do zníženia finančných nákladov a personálneho zaťaženia. Pripravený a validovaný model detektora ako aj pripravený rádionuklidový vektor pôdy okolia elektrární A1 a V1 možno použiť pre ďalšie analýzy a prispôbovať rôznym podmienkam na mieste a scenárom kontaminácie, čo ponúka škálovateľný prístup pre bežné aj komplexné projekty.

Priestor pre ďalší výskum kotví jednoznačne v možnosti využiť pre skenovací prieskum väčší detektor, napr. 1 L scintilačný detektor NaI(Tl), pri ktorom bolo odhadnuté až 5-násobné zníženie skenovacej MDA (odhad bol vykonaný vo výpočtovom prostredí MCNP iba formou zväčšenia citlivého objemu detektora). Nevyhnutným krokom pre zavedenie metodiky a navrhnutého skenovacieho prieskumu do praxe je test v reálnych podmienkach s kontaminovanou pôdou ^{137}Cs , pričom overenie skenovacieho prieskumu by bolo vykonané pomocou statických meraní a odberov vzoriek pôdy. Pre ďalšie zlepšenie metodiky je nepochybne priestor v jej rozšírení pre viaceré rádionuklidy, najmä ^{60}Co , ktorý bude predmetom záujmu pri uvoľňovaní lokality JZ V1 do ŽP. Ďalším technickým a prakticky realizovateľným zlepšením je použitie UGV, prípadne aj s implementáciou AI algoritmov, ktoré by umožnilo ešte vyšší štandard presnosti a ešte výraznejšie zníženie nákladov spojených s výkonom skenovacieho prieskumu, ktoré už i tak prináša takmer neporovnateľný časový náskok v porovnaní so štandardnými postupmi.

Víziou naďalej zostáva, aby sa metodika a postup po úspešnej validácii stali overeným meraním, čo predstavuje najvyšší stupeň spoľahlivosti a zároveň najvyšší dosiahnuteľný cieľ.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Nuclear Energy Agency, Radiological Characterisation for Decommissioning of Nuclear Installations; Radioactive Waste Management, [online], September 2013, [cit. 8.4.2023]. Dostupné na internete: <https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-wpdd2013-2.pdf>, NEA/RWM/WPDD(2013)2.
- [2] International Atomic Energy Agency, Radiological Characterisation of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes, Technical reports Series No. 389, IAEA, Vienna, [online], 1998, [cit. 5.5.2023]. Dostupné na internete: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS389_scr.pdf, ISBN 92-0-103198-X.
- [3] International Atomic Energy Agency, Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors, Safety Standards Series, Safety Guide, No. WS-G-2.1, IAEA, Vienna, [online], 1999, [cit. 20.5.2023]. Dostupné na internete: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P079_scr.pdf, ISBN 92-0-102599-8.
- [4] Multi-Agency Radiation Survey And Site Investigation Manual (MARSSIM), NUREG-1575, Rev. 1; EPA 402-R-97-016, Rev. 1; DOE/EH-0624, Rev. 1, August 2000.
- [5] VAN VELZEN L, et al. Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual (EURSSEM), 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, October 11-15, 2009, Liverpool, UK, Dostupné na internete: cordis.europa.eu/docs/projects/files/508/508855/cndwp4eurssemfinalreport.pdf
- [6] Nuclear Energy Agency, Nuclear Site Remediation and Restoration during Decommissioning of Nuclear Installations; Report by the NEA Co-operative Programme on Decommissioning, [online], 2014, [cit. 27.5.2023]. Dostupné na internete: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-02/7192-cpd-report.pdf>.
- [7] International Atomic Energy Agency, Integrated Approach to Planning the Remediation of Sites Undergoing Decommissioning, Nuclear Energy Series No. NW-T-3.3, IAEA, Vienna, 2009, ISBN 978-92-0-102009-3.
- [8] ABELQUIST E. W., Final Status Survey Using MARSSIM Survey Methodologies at the Cushing Refinery Site, Final Report: Environmental Survey and Site Assessment Program Environmental and Health Sciences Division, (1997) Oak Ridge Institute for Science and Education, Oak Ridge, Tennessee 37831-0117, dostupné na internete: <https://www.nrc.gov/docs/ML2014/ML20149H939.pdf>.
- [9] International Atomic Energy Agency, Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events, IAEA Safety Standards for protectig people and the environment, General Safety Guide No. GSG-15, IAEA, Vienna, [online], 2022, [cit. 6.6.2023]. Dostupné na internete: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1969_web.pdf, ISBN 978-92-0-136521-7.
- [10] U. S. Environmental Protection Agency, Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objectives Process, EPA QA/G-4, Washington DC, USA, [online], Február 2006, [cit. 14.7.2024]. Dostupné na internete: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/g4-final.pdf>.
- [11] International Atomic Energy Agency, Characterization of radioactively contaminated sites for remediation purposes, IAEA-TECDOC-1017, IAEA, Vienna, 1998, [cit. 23.7.2024]. Dostupné na internete: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1017_prn.pdf.
- [12] International Atomic Energy Agency, Site characterization techniques used in environmental restoration activities, IAEA-TECDOC-1148, IAEA, Vienna, 2000, [cit. 23.7.2024]. Dostupné na internete: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1148_prn.pdf.
- [13] Zákon č.87/2018 Z.z. o radiačnej ochrane a o zmene a doplnení niektorých zákonov.

-
- [14] FENG, T.C., et al. Method-sensitivity of in-situ γ spectrometry to determine the depth-distribution of anthropogenic radionuclides in soil. In: Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, Vol. 661 (2012), s. 20 – 30, dostupné z: DOI: [10.1016/j.nima.2011.09.014](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.014).
- [15] HJERPE, T., et al. Accounting for the depth distribution of ^{137}Cs in on-line mobile gamma spectrometry through primary and forward-scattered photons, In: Radiation and Environmental Biophysics, Vol. 41 (2002), s. 225 – 230, dostupné z DOI: [10.1007/s00411-002-0158-3](https://doi.org/10.1007/s00411-002-0158-3).
- [16] X-5 Monte Carlo Team, MCNP – A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5 Volume 1: Overview and Theory. USA: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [17] CHUONG, H. D. et al. Validation of gamma scanning method for optimizing NaI(Tl) detector model in Monte Carlo simulation. In: Applied Radiation and Isotopes, vol. 149 (2019), s. 1– 8, dostupné z DOI: [10.1016/j.apradiso.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.04.009).
- [18] SANG, T. T. et al. Simple procedure for optimizing model of NaI(Tl) detector using Monte Carlo simulation. In: Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 322 (2019), s. 1039– 1048, dostupné z DOI: [10.1007/s10967-019-06787-0](https://doi.org/10.1007/s10967-019-06787-0).
- [19] Canberra Industries, Genie™ 2000 Spectroscopy Software – Customization Tools, Canberra Industries Inc., 800 Research Parkway, Meriden, USA, CT 06450, 2013.
- [20] BEDNÁR, D., et. al. Comparison of deterministic and stochastic methods for external gamma dose rate calculation in the decommissioning of nuclear power plants. In: Annals of Nuclear Energy, Vol. 134 (2019), s. 67-76, dostupné z DOI: [10.1016/j.anucene.2019.06.003](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.06.003).
- [21] BEDNÁR, D., et. al. Efficiency calibration of $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ and NaI(Tl) scintillation detectors with MCNP6 for various in-situ measurements for NPP decommissioning purposes. In: Annals of Nuclear Energy, Vol. 159 (2021), dostupné z DOI: [10.1016/j.anucene.2021.108335](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108335).
- [22] LIŠTJAK, M., et al. Polovodičová gamaspektrometria vzoriek v laboratóriu dozimetrie žiarenia, VP-024/15 – Vykonávací predpis, VUJE, a.s., 2021.
- [23] BEDNÁR, D., et. al. Determination of NORM vector according to laboratory analysis of soil samples in the area of NPP A1 in Slovakia. AIP Conference Proceedings 2411 (1): 080001 (November 2021), dostupné z DOI: doi.org/10.1063/5.0068228.
- [24] BEDNÁR, D., et. al. Comparison of the background gamma-ray spectrum from soil obtained by direct measurement and by calculation using MCNP6 with NaI(Tl) scintillation detector. In: Radiation Protection Dosimetry, Vol. 198 (2022), Issue 911, s. 754-758, dostupné z DOI: doi.org/10.1093/rpd/ncac130.
- [25] QGIS.org (2025). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>".
- [26] CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., and BÖHNER, J.: System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, (2015), s. 1991–2007, dostupné z DOI: doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015.

PRÍLOHA 1: ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. Výpočty dávkových polí pri viacvrstvových tieneniach metódami point-kernel a Monte Carlo a ich overenie experimentálnym meraním. In *XL. Dny radiační ochrany : zborník abstraktů. Mikulov, Česká republika. 5.-9. 11. 2018*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2018, S. 100. ISBN 978-80-01-06504-4.
Kategória publikácie do 2021: AFG
- V2_02 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. Comparison of different build-up factor calculations with Monte Carlo simulations. In *APCOM 2019 : 25th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 19-21, 2019*. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2019, Art. no. 020001 [5] s. ISBN 978-0-7354-1873-8. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85070567650 ; WOS: 000535987500001.
Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_03 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - DOLNIAK, Jakub - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. In-situ radiological characterization of contaminated concrete compared to characterization by sampling. In *NUPP 2019 : 3rd International conference on nuclear power plants: Structures, risk and decommissioning. London, United Kingdom. June 10-11, 2019*. Glasgow : ASRANet Ltd, 2019, S. 22-25. ISBN 978-1-9996144-4-7.
Kategória publikácie do 2021: AFC
- V2_04 BEDNÁR, Dávid - NEČAS, Vladimír - LIŠTJAK, Martin. Comparison of various deterministic codes with MCNP in the field of optimization of radiation protection during decommissioning of nuclear installations. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj] : 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [4] s. ISBN 978-80-227-5001-1.
Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_05 BEDNÁR, Dávid - NEČAS, Vladimír - LIŠTJAK, Martin. Radiation protection calculations in the vicinity of the workplace for pumping sludge into barrels. In *ELITECH'21 [elektronický zdroj] : 23th Conference of Doctoral Students, May 26, 2021*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, [5] s. ISBN 978-80-227-5098-1.
Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_06 BEDNÁR, Dávid - DOLNIAK, Jakub - LIŠTJAK, Martin - NEČAS, Vladimír. Determination of NORM vector according to laboratory analysis of soil samples in the area of NPP A1 in Slovakia. In *APCOM 2021 : 26th International conference on applied physics of condensed matter. Štrbské Pleso, Slovak Republic. June 23-25, 2021*. 1. ed. Melville : AIP Publishing, 2021, Art. no. 080001 [5] s. ISBN 978-0-7354-4138-5. V databáze: DOI: 10.1063/5.0068228 ; SCOPUS: 2-s2.0-85118877596 ; WOS: 000859097600058.
Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2_07 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - NEČAS, Vladimír. Efficiency calibration and optimization of LaBr₃(Ce) probe with MCNP6. In *Transactions of the American Nuclear Society : Vol. 123, Virtual Winter Meeting. November 16-19, 2020*. Illinois : American Nuclear Society, 2020, S. 51-53. ISSN 0003-018X.
Kategória publikácie do 2021: AFC

V2_08 PAŽITNÝ, Andrej - SEDLAČKOVÁ, Katarína - BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin. Optimalizácia modelu scintilačného detektora NaI(Tl) pre „in-situ“ merania pomocou kódu MCNP6. In *ŠVOČ 2021 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác. 21. apríl 2021.* Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2021, S. 127-132. ISBN 978-80-227-51 04-9. Typ výstupu: príspevok; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

V3_01 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. Comparison of deterministic and stochastic methods for external gamma dose rate calculation in the decommissioning of nuclear power plants. In *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 134, (2019), s. 67-76. ISSN 0306-4549 (2019: 1.378 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.918 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85067083883 ; CC: 000489190300009. Kategória publikácie do 2021: ADC

V3_02 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. Comparison of MCNP and visiplan dose-field calculations for multilayer shielding. In *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 186, Iss. 2-3 (2019), s. 310-314. ISSN 0144-8420 (2019: 0.773 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.363 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85082779600 ; CC: 000530582200034 ; DOI: 10.1093/rpd/ncz224. Kategória publikácie do 2021: ADC

V3_03 BEDNÁR, Dávid - PAŽITNÝ, Andrej - LIŠTJAK, Martin - NEČAS, Vladimír. Efficiency calibration of LaBr3(Ce) and NaI(Tl) scintillation detectors with MCNP6 for various in-situ measurements for NPP decommissioning purposes. In *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 159, (2021), Art. no. 108335 [9] s. ISSN 0306-4549 (2021: 1.810 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.875 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85104988289 ; CC: 000659137100032 ; WOS: 000659137100032 ; DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108335. Kategória publikácie do 2021: ADC

V3_04 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - NEČAS, Vladimír. Comparison of the background gamma-ray spectrum from soil obtained by direct measurement and by calculation using MCNP6 with NAI(Tl) scintillation detector. In *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 198, No. 9-11 (2022), s. 754-758. ISSN 0144-8420 (2022: 1 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.321 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1093/rpd/ncac130 ; WOS: 000844405700044 ; CC: 000844405700044 ; SCOPUS: 2-s2.0-85136588008. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

O2 Odborný výstup publikačnej činnosti ako časť knižnej publikácie alebo zborníka

O2_01 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - HINCA, Róbert - NEČAS, Vladimír. Porovnanie deterministických a stochastických výpočtových prostriedkov pri výpočtoch v oblasti optimalizácie radiačnej ochrany v priebehu vyradovania jadrových zariadení. In *Odborná konferencia Mladej generácie Slovenskej nukleárnej spoločnosti 2018 : Časť-Papiernička, Slovenská republika, 26. apríl 2018.* Bratislava : Slovenská nukleárna spoločnosť, 2018, S. 2-8. ISBN 978-80-89928-02-6. Kategória publikácie do 2021: BEF

O2_02 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLANINKA, Alojz - NEČAS, Vladimír. Determination of the minimum detectable activity for scanning measurement during characterization and final status survey. In *XLIII. Dni radiačnej ochrany 2022 : Kniha abstraktov. Stará Lesná, Slovenská Republika. 19. - 23. 11, 2022.* 1. vyd. Bratislava : Slovenská zdravotnícka univerzita, 2022, S. 46. ISBN 978-80-89702-98-5. Typ výstupu: abstrakt z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: BFB

PRÍLOHA 2: OHLASY PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

Autor: Bednár, Dávid
Vo svetových databázach spolu 18 ohlasov

V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

- V2_01 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - NEČAS, Vladimír. Efficiency calibration and optimization of LaBr₃(Ce) probe with MCNP6. In *Transactions of the American Nuclear Society : Vol. 123, Virtual Winter Meeting. November 16-19, 2020*. Illinois : American Nuclear Society, 2020, S. 51-53. ISSN 0003-018X.
Kategória publikácie do 2021: AFC

Ohlasy:

1. LI, Yurong - WANG, Sijia - WANG, Jing - HE, Lixia. Detection Efficiency Fitting Method Research by γ -Ray Spectroscopy for Quantitative Nuclear Material Holdup. In: International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE, 2022-01-01, 15, pp., Registrované v: SCOPUS
Ohlas: zahraničný

V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu

- V3_01 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. Comparison of deterministic and stochastic methods for external gamma dose rate calculation in the decommissioning of nuclear power plants. In *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 134, (2019), s. 67-76. ISSN 0306-4549 (2019: 1.378 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.918 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85067083883 ; CC: 000489190300009.
Kategória publikácie do 2021: ADC

Ohlasy:

1. KIM, Juyoul - TSEREN, Batbuyan. Occupational ALARA Planning for Reactor Pressure Vessel Dismantling at Kori Unit 1. In INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH, 2020, vol. 17, no. 15, pp., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS
Ohlas: zahraničný
2. GUADAGNI, Ettore - LE LOIREC, Cindy - MANCUSI, Davide. Comparison of variance-reduction techniques for gamma dose rate determination. In EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL PLUS, 2021, vol. 136, no. 2, pp. ISSN 2190-5444., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS
Ohlas: zahraničný
3. YANG, Wen - CHAO, Fei - TAI, Yun - LI, Longze. Flux rate calculation and analysis of the integrated small pressurized water reactor based on monte carlo method. In International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE, 2021-01-01, 1, pp., Registrované v: SCOPUS, WOS
Ohlas: zahraničný
4. ALRAMMAH, Ibrahim - SAEED, Ismael Mohammed Mohammed - MHAREB, M. H. A. - ALOTIBY, Mohammed. Atmospheric dispersion modeling and radiological environmental impact assessment for normal operation of a proposed pressurized water reactor in the eastern coast of Saudi Arabia. In PROGRESS IN NUCLEAR ENERGY, 2022, vol. 145, no., pp. ISSN 0149-1970., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS
Ohlas: zahraničný
5. PARK, Kwangheon - SON, Seunghyun - OH, Jinhyuk - KIM, Sunkuk. Sustainable Decommissioning Strategies for Nuclear Power Plants: A Systematic Literature Review. In SUSTAINABILITY, 2022, vol. 14, no. 10, pp., Registrované v: WOS, CC
Ohlas: zahraničný
6. ZHANG, Zehuan - GUO, Yaping - TAO, Qian. Dynamic multi-objective path-order planning research in nuclear power plant decommissioning based on NSGA-II. In Annals of Nuclear Energy, 2024, vol. 199, art. no. 110369. ISSN 0306-4549., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC
Ohlas: zahraničný
7. STENDARDO, Giorgia - ANDENNA, Claudio - FATTIBENE, Paola - FERRARI, Paolo - NUC CETELLI, Cristina - VENOSO, Gennaro - ZICARI, Carmine. Evaluation of RESRAD-BUILD and MicroShield codes for the simulation of small accident scenarios in nuclear medicine therapy patients' rooms. In: EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL PLUS, 2024, vol. 139, no. 4, art. no. 347. ISSN 2190-5444., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS
Ohlas: zahraničný
8. XIAO, Xingyu - LIANG, Jingang - TONG, Jiejuan - WANG, Haitao. Emergency Decision Support Techniques for Nuclear Power Plants: Current State, Challenges, and Future Trends. In: ENERGIES, 2024, vol. 17, no. 10, art. no. 2439. ISSN 1996-1073., Registrované v: WOS, SCOPUS, CC
Ohlas: zahraničný

9. CAHILL, James - DAVIS, Victoria - KING, Caleb - MILLER, Lilith - NORRGARD, Tristan - CASTANO, Carlos E. - MOHAMMADI, Reza - ROJAS, Jessika - GODDARD, Braden. Modeling and benchmarking XRF analysis using MCNP for applications in accident tolerant fuel and cladding. In: *Progress in Nuclear Energy*, 2025, vol. 178, art. no. 105487. ISSN 0149-1970., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC
Ohlas: zahraničný

10. SUN, Pei - ZHANG, Huayang - XING, Liang - ZHONG, Bin - YING, Yangjun - SHEN, Huayun. NPTS-PK: A new point kernel code for fast calculation of 3D gamma radiation field. In: *Radiation Physics and Chemistry*, 2025, vol. 226, art. no. 112329. ISSN 0969-806X., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC
Ohlas: zahraničný

V3_02 BEDNÁR, Dávid - LIŠTJAK, Martin - SLIMÁK, Andrej - NEČAS, Vladimír. Comparison of MCNP and visiplan dose-field calculations for multilayer shielding. In *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 186, Iss. 2-3 (2019), s. 310-314. ISSN 0144-8420 (2019: 0.773 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.363 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85082779600 ; CC: 000530582200034 ; DOI: 10.1093/rpd/ncz224.

Kategória publikácie do 2021: ADC

Ohlasy:

1. JEONG, Ugyu - BYEON, Hyeongjin - PARK, Jaeyeong. RUCAS: Software for assessing radiological risk to the public in metallic radioactive waste recycling from decommissioning nuclear facilities. In: *Nuclear Engineering and Technology*, 2025, Vol. 57, no. 8, pp. 345-354. ISSN 1738-5733., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

V3_03 BEDNÁR, Dávid - PAŽITNÝ, Andrej - LIŠTJAK, Martin - NEČAS, Vladimír. Efficiency calibration of LaBr₃(Ce) and NaI(Tl) scintillation detectors with MCNP6 for various in-situ measurements for NPP decommissioning purposes. In *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 159, (2021), Art. no. 108335 [9] s. ISSN 0306-4549 (2021: 1.810 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.875 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85104988289 ; CC: 000659137100032 ; WOS: 000659137100032 ; DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108335.

Kategória publikácie do 2021: ADC

Ohlasy:

1. ALMISNED, Ghada - ZAKALY, Hesham M.H. - ALI, Fatema T. - ISSA, Shams A.M. - ENE, Antoaneta - KILIC, Gokhan - IVANOV, V. - TEKIN, H. O. A closer look at the efficiency calibration of LaBr₃/inf(Ce) and NaI(Tl) scintillation detectors using MCNPX for various types of nuclear investigations. In: *Heliyon*, 2022-10-01, 8, 10, pp. ISSN 24058440., Registrované v: SCOPUS, Ohlas: zahraničný

2. HILA, Frederick C. - GUILLERMO, Neil Raymund D. - AMORSOLO, Alberto V. - MERCADO, Candy C. A new Excel-based Monte Carlo transport code for simulating energy response spectra and efficiencies in gamma-ray detection materials. In: *Radiation Physics and Chemistry*, 2024, vol. 218, art.no.111616. ISSN 0969-806X., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC

Ohlas: zahraničný

3. YE, Erlei - SHEN, Chunxia - NAN, Hongjie - LAI, Yongfang. Study of a method for theoretical calculation of the efficiency of a LaBr₃/inf(Ce) for detecting gamma-rays from point sources. In: *Applied Radiation and Isotopes*, 2024, vol. 212, art. no. 111446. ISSN 0969-8043., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

4. YE, Erlei - SHEN, Chunxia - NAN, Hongjie - LAI, Yongfang. Sourceless efficiency calibration method for γ spectrum based on numerical analysis. In: *He Jishu/Nuclear Techniques*, 2024, vol. 47, no. 9, art. no. 090204. ISSN 0253-3219., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

5. TAJIK, M. MCNPX simulations of NE213 scintillator neutron response functions and detection efficiencies up to 1 GeV. In: *Annals of Nuclear Energy*, 2025, Vol. 217, art. no. 111369. ISSN 0306-4549., Registrované v: SCOPUS, WOS, CC

6. PROZOROVA, Irina V. - SABITOVA, Radmila R. - BEDENKO, Sergey V. - IRKIMBEKOV, Ruslan A. - POPOV, Yuriy A. - SVETACHEV, Stanislav N. - SAMARKHANOV, Kuanysh K. Optimization of the LaBr₃.sub.3./sub. detector model using differential evolution algorithms. In: *Applied Radiation and Isotopes*, 2025, Vol. 221, art. no. 111841. ISSN 0969-8043., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

ZHRNUTIE

Názov: Vývoj metodiky skenovacieho merania pôdy pre účely charakterizácie a uvoľňovania lokality do životného prostredia

Mnohé jadrové zariadenia, nielen na Slovensku, ale aj vo svete, vstupujú do záverečných fáz procesu vyradovania, kde je kladený dôraz na charakterizáciu a záverečný prieskum lokality. V tomto smere vedecká obec a prax jednotne odporúčajú vykonávať prieskum lokality aj formou skenovacieho merania pre podporu rozhodovania a zvýšenie efektivity monitorovania nielen v zmysle kvality dát, ale aj z časového a finančného hľadiska.

Dizertačná práca rieši návrh a metodiku skenovacieho merania pre účely charakterizácie a záverečného prieskumu lokality jadrových elektrární A1 a V1 na území Slovenskej republiky. Bol vybraný dostupný 2x2 palcový scintilačný detektor NaI(Tl), ktorého detailný model bol vytvorený a optimalizovaný vo výpočtovom prostredí MCNP6 a verifikovaný v energetickom rozsahu od 100 do 1400 keV, vrátane tvaru spektra.

Validovaný model bol potom použitý na matematickú rekonštrukciu spektra pôdy na základe metodicky laboratórne stanoveného RN vektora pôdy v okolí elektrární A1 a V1. Zmeraná bol aj príspevok kozmického žiarenia do celkového spektra pozadia priamym meraním na vodnej hladine.

Na základe známeho spektra pozadia bola vypočítaná skenovacia minimálna detegovateľná aktivita (MDA) pre rôzne parametre skenovacieho prieskumu, v rámci ktorej bola vykonaná citlivostná analýza a analýza neistôt. S predmetným scintilačným detektorom bola zostrojená pilotná zostava s inštrumentáciou pre vykonanie testu vyhľadávacieho skenovacieho prieskumu v teréne. Namerané dáta boli interpolované a rádiologicky a priestorovo vyhodnotené pomocou softvéru QGIS a SAGA.

Navrhnutá metodika a postup prakticky dopĺňujú štandardný spôsob charakterizácie a vykonávania záverečného prieskumu rozsiahlych území s rámcovým presahom lokality jadrových zariadení A1 a V1. Skenovacie meranie možno použiť ako komplementárnu metódu k existujúcemu štandardnému postupu pozostávajúceho zo statických gamaspektrometrických meraní pôdy. Jednoznačným nespochybniteľným prínosom je ušetrenie času pri výkone prieskumu, čo priamoúmerne prispieva k znižovaniu finančných nákladov) a personálneho zaťaženia.

SUMMARY

Title: Development of the methodology of scanning measurement of soil for the purposes of characterization and site release into the environment

Many nuclear facilities, not only in Slovakia but also around the world, are entering the final stages of decommissioning, where increased emphasis is placed on site characterization and final radiological survey. In this context, both the scientific community and practical experience consistently recommend performing site surveys using scanning measurements to support decision-making and enhance monitoring efficiency—not only in terms of data quality but also with regard to time and cost-effectiveness.

This dissertation addresses the design and methodology of scanning measurements for the purpose of characterization and final status survey of the A1 and V1 nuclear power plant sites in the Slovak Republic. A commercially available 2x2-inch NaI(Tl) scintillation detector was selected, for which a detailed model was developed and optimized using the MCNP6. The model was verified in the energy range of 100 to 1400 keV, including spectral shape verification.

The validated model was subsequently used for the mathematical reconstruction of the soil spectrum based on a methodologically established radionuclide (RN) vector, determined in laboratory conditions for soils in the vicinity of the A1 and V1 nuclear power plants. The contribution of cosmic radiation to the total background spectrum was also measured directly over a water surface.

Based on the known background spectrum, the scanning Minimum Detectable Activity (MDA) was calculated for various scanning parameters. This included a sensitivity analysis and uncertainty assessment. A pilot system with appropriate instrumentation was constructed using the selected scintillation detector, enabling a field test of the scanning survey method. The measured dataset was spatially and radiologically evaluated using QGIS and SAGA software through data interpolation.

The proposed methodology and practical implementation complement the standard approach to site characterization and final radiological surveys of large areas surrounding nuclear facilities A1 and V1. Scanning measurements can be used as a complementary technique to the conventional method based on static gamma spectrometric soil measurements.

One of the most prominent benefits of this approach is the significant reduction in time required to perform the survey, which directly contributes to lowering both financial costs and personnel workload.