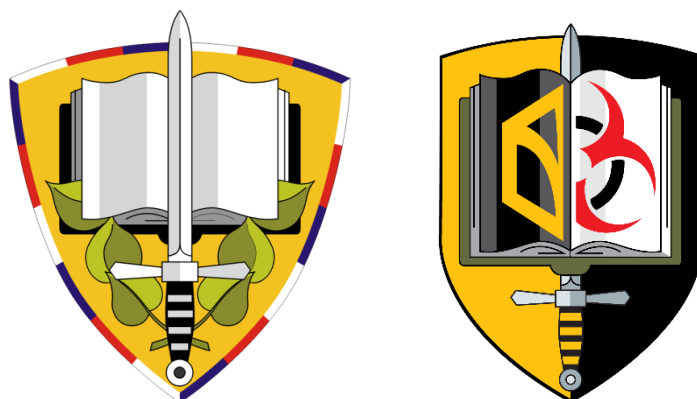


UNIVERZITA OBRANY
Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení



CBRN PROTECT 2025

Sborník statí

mezinárodní vědecké konference konané ve dnech 15. – 16. října 2025

Editoři

Ing. Petr ŽUJA, Ph.D.

kpt. Ing. Erik RAJCHL, Ph.D.

BRNO 2025

Odborný garant konference

plk. gšt. prof. Ing. Stanislav **FLORUS**, CSc. – ředitel ÚOPZHN UO

Vědecký výbor konference

prof. Ing. Zbyněk **KOBLIHA**, CSc. – ÚOPZHN UO

prof. Ing. Vladimír **PITSCHMANN**, CSc. – ČVUT v Praze

mjr. Ing. Tomáš **ROZSYPAL**, Ph.D. - ÚOPZHN UO

Ing. Jiří **KADLČÁK**, CSc.

Organizační výbor konference

kpt. Ing. Erik **RAJCHL**, Ph.D., tel. 973/452344, mob. 601501660

e-mail: erik.rajchl@unob.cz

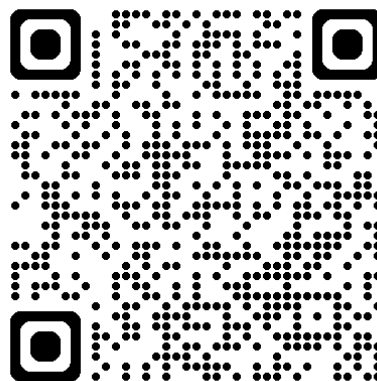
kpt. Ing. Bronislav **PROKOP**., tel. 973/452312

Ing. Petr **ŽUJA**, Ph.D., tel. 973/452333

doc. Ing. Daniel **SAS**, Ph.D., tel. 973/452341

e-mail: konferenceuopzhn@unob.cz

web: <https://konference.unob.cz/cbrn-2025/>



Konferenci podpořily společnosti:



Ve sborníku statí konference jsou uveřejněna plná autorská znění statí, která nebyla po stránce obsahové editory upravována.

Statě neprošly jazykovou úpravou.

Mezinárodní vědecká konference CBRN PROTECT 2025 byla podpořena projektem Ministerstva obrany České republiky v rámci Dlouhodobého plánu rozvoje organizace - Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany "Výzkum metod a technologií ochrany před účinky zbraní hromadného ničení a průmyslových nebezpečných látek II" (DZRO-UOPZHN22-PROTECT II).

© Ústav OPZHN, Univerzita obrany, Brno, 2025

ISBN 978-80-7582-583-4 (online; pdf)

ISBN 978-80-7582-586-5 (CD-ROM)

OBSAH

Autor / Autoři	Název stati česky / anglicky	strana
ANDREJSOVÁ Lenka, ŠINKOROVÁ Zuzana, ČÍŽKOVÁ Jana, JANDA Jiří, RAJCHL Erik, CARRILLO Anna	Terapie vnitřní kontaminace radionuklidů a moderní přístupy dekorporace ¹³⁷ Cs. Therapy of internal radionuclide contamination and modern ¹³⁷ Cs decorporation approaches.	8-18
BEDNÁŘ Kamil, ŽUJA Petr	Využití simulačních technologií v oblasti cbrn defence. Use of simulation technologies in the cbrn defence area.	19-30
BELŠÁN Michal	Integrace postupů technical exploitation do CBRN prostředí. Technical exploitation procedures integration in CBRN environment. (abstrakt bez statě)	31-33
BELŠÁN Michal	Zastoupení AČR v panelech JCBRNDCDG. The Army of the Czech Republic representation in JCBRNDCDG Panels. (abstrakt bez statě)	34-36
BRACHNA Róbert, GRÍSA Tomáš, ČEŠKA Jakub	Výpočetní nástroj pro stanovení účinnosti kalibrace detektoru: EffTrace. Computational tool for detector efficiency calibration: EffTrace.	37-47
ČASTULÍK Pavel, CHRÁSTEK Jiří, VANĚK Jakub	Odolnost prodyšných ochranných textilních materiálů proti plameni. Flame resistance of breathable protective textile materials.	48-58
FIŠERA Ota, KAREŠ Jaroslav, PROUZOVÁ PROCHÁZKOVÁ Lenka, ČUBA Václav, VLK Martin, KOZEMPEL Ján, FIALOVÁ Kateřina, PALUŠÁK Martin, POPOVICH Kseniya, BÁRTA Jan	Oxidické nanočástice pro zpracování použitých dekontaminačních roztoků na bázi kyseliny citronové. Oxidic nanoparticles for the treatment of spent decontamination solutions based on citric acid.	59-70
HELÁN Václav	Zobrazování (nejen analytických) výsledků. Displayng (not only analytical) results.	71-75
HORNA Aleš, HLAVINKA Matyáš, PECÁK Oldřich, MATĚJ Zdeněk	Spektrometrický systém pro neutrony a záření gama. Spectrometric system for neutrons and gamma rays.	76-83

HOSKOVCOVÁ Monika, ŽERAVÍK Jiří	Ionty kovů v regulaci inhibice acetylcholinesterázy nervově paralytickými látkami. Metal ions in the regulation of acetylcholinesterase inhibition by nerve agents.	84-94
CHMEL Martin	Nanoporové sekvenování v terénu pro zlepšení biologické obrany. Field-forward nanopore sequencing for enhanced biodefense capabilities.	95-103
CHMIL Vojtěch, FILIPOVÁ Alžběta, TICHÝ Aleš, MILANOVÁ Marcela	Vývoj nových látek na bázi derivátů piperazinu pro ochranu proti ionizujícímu záření. Development of new compounds based on piperazine derivatives for protection against ionizing radiation.	104-111
KRÁLÍK Lukáš, ČASTULÍK Pavel, VANĚK Jakub, LUNEROVÁ Kamila, CHRÁSTEK Jiří	Přínosy použití pokročilých uhlíkových materiálů v ochranných oděvech. Benefits of using advanced carbon materials in protective clothing. (abstrakt bez statě)	112
LORINČÍK Jan, ELANTYEV Ivan, NEUMANN Jakub, SIHELSKÁ Kristína, VESELÁ Daniela, GUT Jan	Datování uranových částic v jaderné forenzní vědě. Age dating of uranium particles in nuclear forensics.	113-123
MARŠÁLEK Blahoslav, ODEHNALOVÁ Klára, ZEZULKA Štěpán, ŠTAHEL Pavel, MAYER Barbora, HORŇÁK Radek, ČECH Jan, RUDOLF Pavel, HUDEC Martin	CaviPlasma v terénu: validace a výrobní zajištění inovativní dekontaminační technologie. CaviPlasma in action: validating and assuring production of an innovative decontamination technology.	124-129
MAZANEC Karel, ŠMÍD Roman, SKOUMAL Miroslav	Vyhodnocení rizik spojených s kontaminací veřejných budov parami BCHL. Evaluation of risks associated with contaminating the interiors of public buildings with CWA vapours.	130-139
MILANOVÁ Marcela, ŠINKOROVÁ Zuzana, TICHÝ Aleš, CHMIL Vojtěch	Analýza dicentrických chromozomů: základní kámen biologické dozimetrie při radiačních mimořádných událostech. Dicentric chromosome assay: a cornerstone of biological dosimetry in radiation emergency scenarios.	140-148
PROKOP Bronislav, SAS Daniel, OHERA Marcel	Využití bezpilotních detekčních systémů v oblasti monitorování radiační situace v reálných podmínkách. The use of unmanned detection systems in the field of monitoring radiation situations in real conditions.	149-162

TOMANOVÁ Tereza, JANDA Jiří	Využití softwaru Geometry Composer pro účinnostní kalibrace necharakterizovaných HPGE detektorů. Application of Geometry Composer software for efficiency calibration of uncharacterized HPGE detectors.	163-168
TREFILÍK Dušan, HOSKOVCOVÁ Monika	Vyhodnocení účinnosti reaktivátorů nervově paralytických látek typu „G“, „V“ a na základě kinetiky barevných změn biosenzoru DETEHIT a strojového učení s využitím neuronových sítí. Machine learning-based evaluation of reactivators against nerve agents „G“, „V“ and a type agents using color kinetics of the DETEHIT biosensor.	169-178
VANĚK Jakub, LUNEROVÁ Kamila, ŠESTÁK Jozef, HAMERNÍK Ivan	Použití přenosného kapalinového chromatografu pro analýzu nebezpečných látek v mobilních laboratořích. Application of portable liquid chromatograph for analysis of hazardous substances in mobile laboratories. (abstrakt bez statě)	179-180
VYDRA Karel	Současné hrozby v oblasti ochrany proti chemickým, radioaktivním a jaderným látkám a materiálům. Current chemical, radiological and nuclear threads. (abstrakt bez statě)	181
MAŠÍN Michal, KALOUSKOVÁ Veronika, VESELÝ Tomáš	Modulární multisenzorický profesní oděv pro členy IZS s implementací metod umělé inteligence. Modular multisensory professional clothing for IRS members with implementation of artificial intelligence. (poster)	182

TERAPIE VNITŘNÍ KONTAMINACE RADIONUKLIDY A MODERNÍ PŘÍSTUPY DEKORPORACE ^{137}Cs

THERAPY OF INTERNAL RADIONUCLIDE CONTAMINATION AND MODERN ^{137}Cs DECORPORATION APPROACHES

Lenka Andrejsová^a, Zuzana Šinkorová^a, Jana Čížková^a, Jiří Janda^b, Erik Rajchl^b, Anna Carrillo^{a*}

^a Katedra radiobiologie, Vojenská lékařská fakulta, Univerzita obrany, Třebešská 1575, 500 01 Hradec Králové, Česká republika

^b Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, Univerzita obrany, Víta Nejedlého 1, 682 01 Dědice-Vyškov, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: anna.carrillo@unob.cz, tel.: +420 777 328 094

Abstrakt

V případě radioaktivního spadu tvoří radioizotop ^{137}Cs spolu s ^{131}I hlavní část škodlivých kontaminantů v atmosféře. Vzhledem k tomu, že se cesium chová jako biologický analog draslíku, který je lidským tělem snadno absorbován jako typický intracelulární kation, je velmi důležité ^{137}Cs z těla co nejrychleji odstranit. Chelatační činidla patří do skupiny léčiv s největším potenciálem pro účinné odstranění radionuklidů z těla. Jejich účinek je založen na tvorbě komplexů s radioaktivními prvky. Stupeň chelatace je do značné míry určen povrchovou plochou aktivních částic. Současná terapie při expozici ^{137}Cs je založena na perorálním podávání chelatačního komplexu hexacyanoferátu železa (pruské modři). Moderní přístupy přinášejí inovace v oblasti syntézy pruské modři ve formě nanopartikulí (NP), které disponují vyšší chelatační kapacitou a odlišným chováním v organismu než standardně zavedené léčivo.

Klíčová slova: pruská modř, cesium, nanopartikule

Abstract

In the event of radioactive fallout, the radioisotope ^{137}Cs , together with ^{131}I , form the main part of harmful contaminants in the atmosphere. Since the caesium behaves as a biological analogue of potassium easily absorbed by the human body as a typical intracellular cation, it is very important to remove ^{137}Cs from the body as quickly as possible. Chelating agents belong to the group of drugs with the greatest potential for effective removal of radionuclides from the body. Their effect is based on the formation of complexes with radioactive elements. The degree of chelation is largely determined by the surface area of the active particles. Current therapy for exposure to ^{137}Cs is based on the oral administration of chelating complex of iron hexacyanoferrate (Prussian blue). Modern approaches bring innovations in the synthesis of Prussian blue in the form of nanoparticles (NP) with higher chelation capacity and different behaviour in the body than the standard drug.

Key words: Prussian blue, caesium, , nanoparticles

ÚVOD

Možnost vzniku radiační havárie, která je nejzávažnějším stupněm radiační mimořádné události, je spojena zejména s rizikem poškození jaderných elektráren a dále s hrozbou použití jaderných zbraní hromadného ničení. Závažnost těchto událostí je mezinárodně hodnocena pomocí Mezinárodní stupnice jaderných a radiologických událostí (International Nuclear and Radiological Event Scale, INES) (IAEA, b.r.). Oba tyto možné zdroje kontaminace využívají

řízenou štěpnou reakci k uvolnění značně velkého množství energie. Jako palivo jaderných reaktorů je využíván izotop uranu ^{235}U (palivové články ve formě UO_2), který je ze svého zastoupení v přírodním uranu (cca 0,73 %) obohacován většinou na obsah 3–4 %. V důsledku štěpné reakce vznikají v jaderném reaktoru štěpné a aktivační produkty (tzv. inventář reaktoru), jejichž složení se může dle typu reaktoru lišit. Mezi nejvýznamnější radionuklidy, které se mohou v případě havárie uvolnit do prostředí ve formě částic, plynů nebo aerosolů, patří vzácné plyny kryptonu a xenonu, a dále radioizotopy, mezi něž patří například ^{14}C , ^{16}N , ^{35}S , ^{41}Ar , ^{133}I , ^{60}Co , ^{137}Cs .

1 KONTAMINACE RADIONUKLIDY

Z hlediska radiace se proti ozáření, které se uvolní do prostředí v okamžiku exploze během vteřin, nelze účinně ochránit. Biologické změny v organismu s možnými zdravotními dopady souvisí zejména s velikostí absorbované dávky a homogenitou ozáření. Obecně jakákoliv dávka absorbovaného ionizujícího záření zvyšuje u jedince pravděpodobnost pozdějšího výskytu nádorového onemocnění (tzv. stochastické účinky) v souvislosti s poškozením genetické informace buněk. Dojde-li k překročení hranice 1 Gy (jednorázové, rovnoměrné, celotělové nebo téměř celotělové ozáření), rozvíjí se u ozářených osob akutní nemoc z ozáření (tzv. deterministické účinky). Proti vnější i vnitřní kontaminaci osob radionuklidy se lze účinně bránit dekontaminačními postupy. Míra poškození pak závisí na délce působení kontaminantu, typu radionuklidu a možnostech jeho eliminace z povrchu těla (dekontaminace) nebo z vnitřního prostředí organismu (dekorporace). Kromě zvýšení pravděpodobnosti výskytu stochastických účinků ozáření tkví nejvyšší riziko kontaminace v lokálním poškození, a to dle místa největší koncentrace kontaminantu. V případě povrchové kontaminace může hrozit při dávkách ≥ 3 Gy (gama a beta záření) rozvoj radiační dermatitidy (příklad deterministických účinků), která je výsledkem zánětlivých procesů vyvolaných poškozením epidermis a dermis mezibuněčné hmoty ionizujícím zářením. Onemocnění se vyvíjí postupně a nastupuje s časovým odstupem zpravidla dnů po ozáření.

V případě vnitřní kontaminace je míra zvýšení pravděpodobnosti stochastických účinků spojena zejména s typem radionuklidu a jeho biologickou aktivitou. Příkladem je specifická afinita radioaktivního jódu ke štítné žláze nebo osteotropní vlastnosti stroncia. Vnitřní kontaminace je způsobena přítomností radioaktivního materiálu uvnitř organismu. Možnou cestou vstupu jsou vdechnutí (inhalace) radioaktivních částic nebo plynů, požití (ingesce) radioaktivního materiálu (prach nebo kontaminované jídlo a pití), vstřebání radioaktivního materiálu přes rány jako důsledek povrchové kontaminace, absorpce radioaktivního materiálu přes neporušenou kůži a injekční vpravení radioaktivního materiálu do těla (např. ve formě radiofarmaka). Následný osud radioaktivního materiálu v organismu závisí nejen na způsobu příjmu do těla, ale také na jeho fyzikálně-chemických vlastnostech, jimiž jsou velikost částic, rozpustnost a biokinetika radionuklidu. Každý radionuklid se v organismu chová tak, jak by se choval neradioaktivní stabilní izotop téhož prvku. Organismus nerozlišuje, zda je izotop daného prvku stabilní či nikoliv. V souvislosti s tím se různé prvky specificky vstřebávají a případně kumulují v různých tkáních organismu, jak je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1 Radionuklidy významné při radiační mimořádné události a místa jejich kumulace v organismu (Radiobiology Textbook, 2023)

Radionuklid	Preferenční orgán
Am, Pu, Po	plice
Po	lymfatická uzlina
C, Po, U	ledvina
Pu	vaječník / varle
I	štítná žláza
Am, Cf, Co, Cu, Pu, Po	játra
Ir, Po	slezina
Am, Pu, P, Po	kostní dřeň
Am, Cf, Cu, P, Pu, Ra, Sr, Th, U, Y	kost
Cs	pankreas, slinné žlázy, kosterní svalstvo, tlusté střevo

2 ZAVEDENÉ MOŽNOSTI DEKONTAMINACE

Radionuklidy, které jsou v radioaktivní stopě přítomné, můžeme na základě jejich vstřebatelnosti do organismu rozdělit na dobře vstřebatelné (např. Cs, I), středně dobře vstřebatelné (např. Sr, Ba) a špatně vstřebatelné (těžké kovy, lanthanoidy, transurany). Z hlediska zdravotních dopadů vnitřní kontaminace na příjemce mají však významný vliv i zdravotní stav kontaminované osoby, jeho věk, váha či pohlaví. Cílem terapie při vnitřní kontaminaci je dekontaminace radioaktivního materiálu z organismu v co nejkratším čase, aby se omezila doba, kdy je osoba vystavena působení ionizujícího záření emitovaného z daného radionuklidu. Některé nástroje, jak toho dosáhnout, jsou společné pro všechny typy kontaminace (Parrish a kol., 2019). Patří sem výplachy spojivkového vaku, ústní a nosní dutiny, žaludku, případně plic, podání diuretik (a/nebo zvýšený přísun tekutin) nebo laxativ (příklady těchto látek jsou uvedeny v Tabulce 2). K zábraně či snížení vstřebávání radionuklidu, zejména z trávicího traktu, se používají látky chelatační nebo látky specifické pro jednotlivé radionuklidy (příklady těchto látek jsou uvedeny v Tabulce 3).

Tabulka 2 Látky urychlující vylučování radionuklidů z organismu

NÁZEV	LÁTKA	MECHANIZMUS ÚČINKU	CÍLOVÝ PRVEK
ditripentat-heyhl (DTPA)	diethyl-triaminopentaacetát Ca/Zn	váže transurany a zrychluje vylučování ledvinami	Pu, Am, Cm, Cf, Bk
jodid draselný	KI	kompetitivní inhibitor radioizotopů jódu ve štítné žláze	I
uhličitan sodný	Na ₂ CO ₃	zvyšuje diurézu solí uranu, inhibuje toxické poškození ledvin	U
furosemid forte	Berlínská modř	diuretikum zvyšující eliminaci absorbovaných radionuklidů	veškeré radionuklidy

Tabulka 3 Látky zabraňující vstřebávání radionuklidů do organismu

NÁZEV	ÚČINNÁ LÁTKA	MECHANIZMUS ÚČINKU	CÍLOVÝ PRVEK
ALGINÁT	alginát sodný	blokuje střevní resorpci	Ra, Sr
GAsterin GEL	CaCO ₃	významně inhibuje vstřebávání radionuklidů ve střevě	veškeré radionuklidy
METALCAPTASE	penicilamin	váže těžké kovy a zabraňuje tak jejich vstřebání	Po, Co, Cu, Zn, Au
RADIOGARDASE-Cs	Berlínská modř	dává vzniknout nevstřebatelným komplexům, inhibuje enterohepatální cyklus	Cs, Tl, Rb
kyselina dimerkaptosukcinová, dimerkaprol a deferoxamin		chelatační účinek	veškeré radionuklidy
Chlorid amonný	NH ₄ Cl	perorálním podáním snižuje pH krve a zvyšuje eliminaci již internalizovaného radiostroncía	Sr

3 BIOLOGICKY VÝZNAMNÉ RADIONUKLIDY

Mezi nejvýznamnější radionuklidy spojené s rozvojem jaderné havárie patří především izotopy dobře vstřebatelných prvků, které nemají, z pohledu délky lidského života, ani příliš krátký ani příliš dlouhý poločas rozpadu. Zkušenosti získané při haváriích jaderných elektráren v Černobylu a Fukušimě prokázaly, že mezi biologicky důležité radionuklidy patří například ⁹⁰Sr, jež je zodpovědné za významnou část radioaktivity vyhořelého jaderného paliva. Snadno inkorporuje do kostí a odsud se pak již jen obtížně eliminuje. Ovšem hlavní část škodlivých kontaminantů v atmosféře a radioaktivním spadu tvořily radioizotopy ¹³¹I a ¹³⁷Cs (Aaseth a kol., 2019). Díky relativně krátkému poločasu rozpadu v řádu dní představuje ¹³¹I spíše dočasnou zátěž pro potravinové řetězce, jež je spojena s rizikem akutní vnitřní kontaminace osob v krátkém čase po jaderné nehodě. Oproti tomu, kontaminace životního prostředí radionuklidem ¹³⁷Cs, který v přírodě přetrvává desítky let, s sebou nese zátěž dlouhodobou. Svůj význam má také ⁶⁰Co, který se jako zdroj ionizujícího záření využívá hojně v průmyslu i ve zdravotnictví, díky čemuž se stal relativně významně rozšířeným radionuklidem se zvýšeným rizikem zneužití (Leyssens a kol., 2017, Blust, 2017).

3.1. Stroncium

Radioaktivní izotopy stroncía se v životním prostředí vyskytují od rozvoje jaderného průmyslu, v důsledku nadzemních zkoušek jaderných zbraní, z výpustí z jaderných zařízení a v následkem jaderných havárií, neboť stroncium je přímým štěpným produktem uranu (Burger a kol., 2019). Díky tomu, že je stroncium svými fyzikálně-chemickými vlastnostmi velmi podobné vápníku, chová se obdobně jako vápník i v životním prostředí a v organismu (Agency for toxic substances and disease registry, 2004). Stroncium se do organismu dostává přirozeně z potravy a ze vzduchu. Do organismu je tedy vstřebáváno trávicím traktem i dýchacími cestami. Krevním oběhem se poté dostává do cílových orgánů, a to zejména do kostí (až 50 % Sr, osteotropní), kde ho lze detekovat již 4 hodiny po kontaminaci. Je zdrojem jaderného záření beta, které ionizuje tkáň ve svém okolí do hloubky cca 2 cm a vytváří tak prostředí chemicky vysoce aktivních volných radikálů. To ve svém důsledku může vést při chronické kontaminaci k poškození krve tvořících buněk v kostní dřeni a následně ke zdravotním komplikacím spojeným s anémií, leukopénií a trombocytopenií. Největším rizikem je izotop ⁹⁰Sr, jehož poločas rozpadu je 28,9 let a případná vnitřní kontaminace představuje významnou a dlouhodobou zátěž pro organismus. Ostatní nestabilní izotopy Sr mají poločas rozpadu

většinou v řádu vteřin a minut. Podání stabilního stroncia může kompetitivně inhibovat metabolismus a zvýšit exkreci radiostroncia. Ústní podání fosforečnanu hlinitého může snížit absorpci až na 85 %, pokud je medikován ihned po požití. Velké dávky solí vápníku (např. laktát vápenatý, uhličitan vápenatý nebo fosfát vápenatý) a acidifikace moči umožní zvýšení jeho exkrece (Aaseth a kol., 2019).

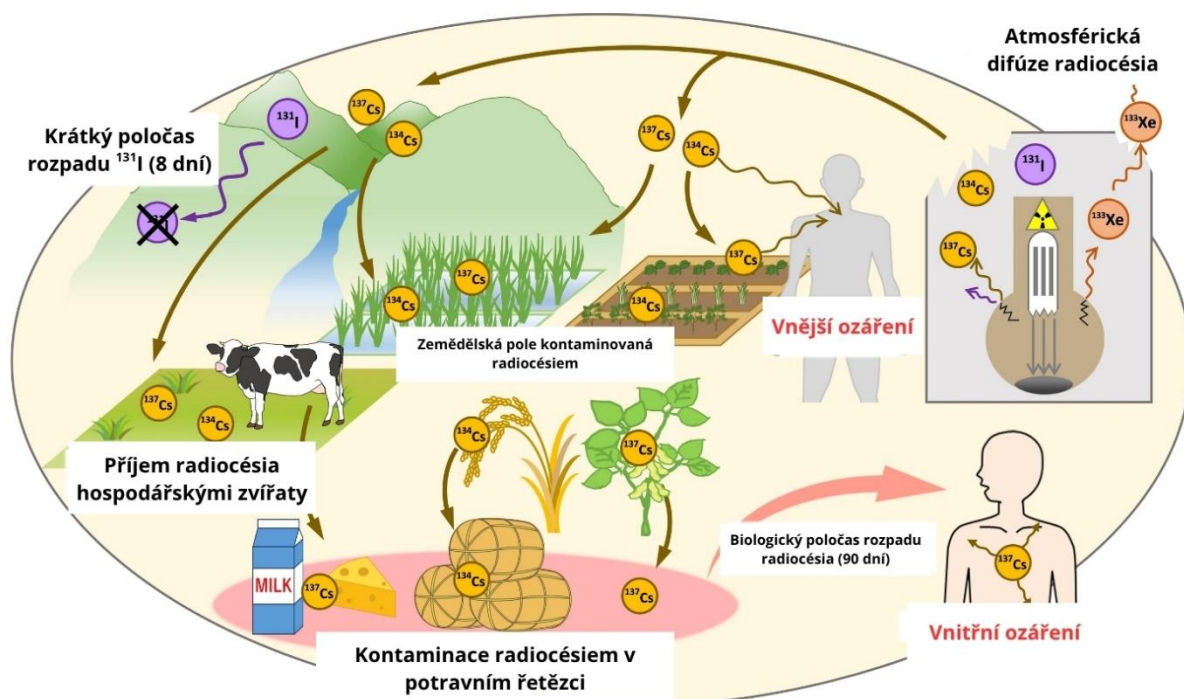
3.2. Jód

Stabilní jód je nenahraditelnou složkou výživy. Jedná se o nejtěžší známý esenciální prvek, který zajišťuje mnoho životně důležitých biologických funkcí. Dosud je známo na 37 izotopů jódu, přičemž jediným stabilním izotopem je ^{127}I . Většina izotopů má poločas rozpadu v řádu minut a méně, poločas rozpadu ostatních je v řádu hodin až dní (Agency for toxic substances and disease registry, 2004). Mezi nejdůležitější přírodní zdroje jódu patří oceány a mořské řasy, ze kterých se jód dostává do vzduchu a dál do vegetace. V životním prostředí se vyskytuje zejména ve formě jodidu. Předpokládá se, že 30 % přijatého jódu se akumuluje ve štítné žláze a 70 % se vylučuje přímo do moči. Ve skutečnosti existují poměrně velké individuální rozdíly v závislosti na mnoha faktorech, jako je např. obsah stabilního jódu v přijímaných potravinách či funkčnost štítné žlázy. Ve štítné žláze je jód využíván pro tvorbu hormonů štítné žlázy tyroxinu a trijodtyroninu, které zajišťují správný vývoj mozku a pohybové soustavy (Aaseth a kol., 2019). Jeho biologický poločas v krvi je 6 hodin. Jód inkorporovaný do hormonů štítné žlázy opouští tento orgán s poločasem 80 dnů a vstupuje do jiných tkání, kde je zachycován s biologickým poločasem 12 dní. Většina jódu (80 %) je následně uvolněna do krve a je k dispozici v krevním oběhu nebo je vyloučena močí. Zbytek jódu (20 %) se vylučuje stolicí v organické formě. Zdrojem nestabilních forem jódu jsou jaderné elektrárny, kde je radioaktivní jód (zejména ^{131}I) hlavním produktem štěpení uranu a plutonia. Následky atmosférické kontaminace ^{131}I po haváriích v Černobylu a Fukušimě jsou podrobně popsány v literatuře (Ory a kol., 2020). Díky tomu, že našel své uplatnění ve zdravotnictví, může se jód vyskytovat také ve výpustích odpadních vod z lékařských výzkumných institucí (Chee a kol., 2020). V případě vnitřní kontaminace, kdy je ^{131}I selektivně vychytáván štítnou žlázou, může vést jeho kumulace k indukci stochastických následků rakoviny štítné žlázy a nezhoubných uzlů štítné žlázy (Espino-Vázquez a kol., 2022). Z hlediska terapie jsou profylakticky podávány tablety s neradioaktivním izotopem jódu ve formě jodidu draselného (KI), který zabezpečí nasycení štítné žlázy a zabrání ukládání radioaktivního formy. Při preventivním dávkování je podáno 130 mg KI do 1–6 hodin před kontaminací (100% ochrana). Pokud již došlo ke kontaminaci radioaktivním izotopem jódu, je podáváno v prvních 6 hodinách 300 mg KI (50% účinnost) a opakuje se 24 hodin po kontaminaci. V případě kontaminace delší jak 6 hodin nemá smysl tablety užívat (Österreicher a kol., 2003).

3.3. Cesium

Přírodní cesium se vyskytuje pouze v jedné formě, a to jako stabilní izotop ^{133}Cs . Jedná se o alkalický kov, který je rozpustný ve vodě. V přírodě se vyskytuje ve velmi nízkých koncentracích jako ion cesný. Dále je známo na 40 různých nestabilních a 21 metastabilních izotopů cesia. Většina z nich má však poločas rozpadu velmi krátký (zlomky vteřin až dny), případně velmi dlouhý ($^{135}\text{Cs} \sim 2,3$ milionu let). Významnou roli v životním prostředí tak hrají pouze radionuklidy ^{137}Cs ($T_{1/2} \sim 30,08$ let) a ^{134}Cs ($T_{1/2} \sim 2$ roky), které vznikají při štěpných reakcích v jaderném reaktoru a do prostředí se dostávají v důsledku radiačních mimořádných událostí. ^{137}Cs je jedním z hlavních zdrojů radioaktivity z vyhořelého jaderného paliva. Rozpadové řady štěpných produktů jaderného paliva prochází během rozpadu různými izotopy jódu a xenonu, které jsou téžavé, mohou difundovat jaderným palivem a šířit se vzduchem. ^{137}Cs proto často vzniká daleko od původního místa štěpení. Po jaderných haváriích v Černobylu a Fukušimě bylo odhaleno, že radioizotop ^{137}Cs tvořil společně s ^{131}I hlavní část škodlivých kontaminantů v atmosféře a radioaktivním spadu (Aaseth a kol., 2019). Dopady

a důsledky černobylské havárie jsou podrobně popsány ve zprávě UN Chernobyl Forum Expert Group (2006). Mechanismus šíření radiocesia do životního prostředí a jeho začlenění do potravního řetězce je detailně znázorněn na Obrázku 1.



Obrázek 1 Difúze radiocesia (^{134}Cs a ^{137}Cs) a kontaminace půdy a potravin v důsledku havárie jaderné elektrárny Fukušima (Aoyama a Fujiwara, 2020).

Přírodní cesium je vázán v horninách a do prostředí se volně dostává v důsledku eroze a zvětrávání minerálů. Sekundární redistribuce je zapříčiněna například lesními požáry, kde vysoká teplota umožňuje uvolňování Cs do ovzduší (Hao a kol., 2018). V organismu ovšem nemá Cs žádnou významnou funkci. Ve vysokých koncentracích se může akumulovat a vyvolávat toxicitu, která způsobuje mimo jiné i inhibici růstu (Aaseth a kol., 2019). Při radioaktivním spadu hraje významnou roli zejména izotop cesia ^{137}Cs (množství ^{134}Cs je zanedbatelné), které se jako významný radioaktivní kontaminant a zdroj gama záření (^{137}Cs se důsledkem beta – přeměny mění na $^{137\text{m}}\text{Ba}$, které vnitřní konverzí za vyzáření paprsků gama přechází na stabilní ^{137}Ba) začleňuje do potravinových řetězců. Vzhledem k tomu, že jeho pohyblivost v půdě je nízká, může sloužit jako ukazatel pohybu půdy a sedimentů z doby, kdy se do prostředí dostalo jako součást radioaktivního spadu z testů jaderných zbraní nebo jaderných havárií. Míru začlenění do potravinových řetězců, na jejichž vrcholu je člověk, lze omezit odklizením svrchní vrstvy půdy (5-10 cm), která se zakope do mělkého výkopu. Příjem cesia rostlinami lze také omezit prostřednictvím hnojiva se zvýšeným obsahem draslíku (Venturi, 2021). Z hlediska fyzikálně-chemických vlastností je cesium podobné právě draslíku. S vodou reaguje za vzniku rozpustného CsOH a do organismu je zcela vstřebáván jak z plic, tak trávicím traktem, případně otevřenými ranami, přičemž distribuce cesia v organismu je nezávislá na způsobu vstupu. Díky své vysoké rozpustnosti a biokinetice obdobné draslíku je snadno transportováno krví a následně migruje zejména do měkkých tkání: svaly, kůže, GIT, játra (Hood et al. 1953). Jeho aktivita spočívá v tom, že soutěží s draslíkem o transport přes draslíkové kanály, čímž je schopen aktivovat sodíkové pumpy a následně se transportovat do buňky (Agency for toxic substances and disease registry, 2004). Z těla dobře vylučuje močí (86 %), proto ho lze zjistit v ledvinách a močovém měchýři (Nelson a kol., 1961), případně stolicí, pankreatickou šťávou a slinami (14 %). Novější studie uvádí, že ^{137}Cs není v lidských orgánech šířeno zcela rovnoměrně. Vyšší radiační poškození tak nastává v orgánech, kde se akumuluje, tj. exokrinní pankreas, slinné žlázy, tlusté a tenké střevo, kosterní svalstvo.

Důsledkem toho může být vznik akutní pankreatitidy nebo diabetes mellitus pankreatického původu (Venturi, 2021). Chronická inkorporace radioaktivního cesia může způsobit aplázii kostní dřeně vedoucí k pancytopenii s veškerými hematologickými i imunologickými dopady. Dlouhodobé působení cesia může vést také ke genotoxickému poškození zárodečných buněk v reprodukční oblasti. Míra eliminace ^{137}Cs je závislá na věku, pohlaví a množství svalové hmoty. Vyloučení radioaktivního cesia je pomalejší u dospělých mužů než u dospělých žen a nejkratší poločas eliminace mají děti ve věku 5-14 let, a to 20 dní (Agency for toxic substances and disease registry, 2004). Jinak je biologický poločas Cs v závislosti na okolnostech uváděn literaturou v rozsahu 50–150 dní.

4 SOUČASNÉ A MODERNÍ PŘÍSTUPY DEKORPORACE ^{137}Cs

Terapií v případě expozice radioaktivním cesiem je perorální podání pruské modři, chemickým názvem hexakynoželeznanu železitého. Jedná se o schválený lék, jehož komerční název je Radiogardase-Cs a objevuje se na trhu od 70. let 20. století. Úlohou tohoto léčiva je vyvázání cesia už ve střevním traktu, čímž se zabrání enterohepatální cirkulaci (Sandal a kol., 2017). Mechanismem účinku se předpokládá součinnost výměny iontů a fyzikální adsorpce vedoucí ke vzniku komplexu, který je následně vyloučen stolicí. Kromě cesia je pruská modř využívána také při kontaminaci izotopem Thalia (^{201}Tl). Modré tobolky obsahují krystaly velikosti 1 mm. Dávkování pro dospělé osoby je 3 x 6 tablet denně po dobu 30 dnů, přičemž maximální denní dávka, aby nedošlo k poškození střevního traktu, je 10 g. Terapie vede ke snížení biologického poločasu cesia ze 150 dní na 30 dní, u thalia z 8 na 3 dny (Martínez-Alonso a kol., 2024). Léčbu lze též podpořit podáváním uhličitanu draselného ve formě tablet v dávkách 1,6 – 4,8 g denně (Aaseth a kol., 2019). Způsob podání pruské modři je možný ve dvou fyzikálně-chemických formách. Koloidní, tedy rozpustné a také nekoloidní, nerozpustné formě, přičemž obě varianty jsou *in vivo* stejně účinné. Rozdíly v účinnosti u pacientů mohou být způsobeny odlišností v kvalitě přípravy, velikostí částic a velmi důležité je působení lokálního pH, které ovlivňuje adsorpci cesia na krystalovou mřížku. Pruská modř má obecně široké spektrum využití v biomedicínských aplikacích. Hlavně díky vynikající biologické bezpečnosti, kvalitním magnetickým vlastnostem, fotometrickým vlastnostem a také schopnosti imitovat enzymatické chování, což je zásluhou stabilní struktury. Své využití našla například v přípravě nanoenzymů, fotometrické terapii, jako kontrastní látka v magnetické rezonanci a jako prostředek pro dodávání léčiv s řízeným transportem postupného uvolňování (Lu a kol., 2023).

Vzhledem ke skutečnosti, že hlavními mechanismy dekontaminace jsou protonová výměna, povrchová adsorpce a mechanické zachycení v krystalové struktuře (Jang a kol., 2014), hraje proces syntézy pruské modři, který ovlivňuje výslednou strukturu látky, zásadní roli v kvalitě a účinnosti léčiva. Z hlediska přípravy lze rozlišit syntézu dvouprekurzorovou a syntézu s jedním prekurzorem. Duální syntéza spočívá v mísení roztoku Fe^{2+} nebo Fe^{3+} s ekvimolárním obsahem železa a $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ nebo $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ za vzniku pruské modři. Syntéza s jedním prekurzorem obsahuje jediný zdroj železa, a to $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, případně $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ nebo jiný monomer. Mezi soudobé trendy patří využití pruské modři v oblasti nanotechnologií. Díky porézní struktuře dokáží nanopartikelé (NP) pruské modři urychlovat proces odstranění iontů cesia a thalia z těla. Kvalita závisí mimo jiné opět na způsobu syntézy NP. Lze sem zařadit například koprecipitaci (vysrážení dvou a více iontů v roztoku během reakčního procesu) nebo mikroemulzní metodu (NP rostou a agregují v kapičkách, které se utváří na rozhraní vodné a olejové fáze) (Lu a kol., 2023). Účinnost pruské modři v organismu je ovlivněna hodnotou pH okolního prostředí. Správné působení léčiva vyžaduje jeho cirkulaci a akumulaci ve specifických místech. Aby byl tento proces splněn, musí být pruská modř stabilní v oběhovém systému několik hodin nebo i dnů, přičemž při pH <6 setrvává stabilní i více jak 24 hodin. Při perorálním podání a průchodu léčiva trávicím traktem se však původně kyselé pH postupně zvyšuje a v terminálním ileu dosahuje hodnoty 7,4. Při pH vyšším než 6 se pruská modř stává nestabilní a během 24 hodin degraduje. Tento problém lze řešit prostřednictvím pokrytí NP

pruské modři stabilizačním činidlem, ideálně návrhem perorální lékové formy uvolňující se v závislosti na pH (Doveri a kol., 2023). Příkladem pro přípravu takového typu polymeru je alginát sodný. Alginát sodný je netoxický, při perorálním podání biologicky odbouratelný a díky mukoadhezivní činnosti ulpívá na střevní sliznici delší dobu, čímž prodlužuje lokální působení pruské modři (Sandal a kol., 2017).

Dalším příkladem zvýšení biokompatibility a účinnosti je vývoj magnetických NP pruské modři, které obsahují polyethylenglykol (PEG). PEG má schopnost potlačit adsorpci bílkovin, což zlepšuje biokompatibilitu materiálu a snížení vedlejších účinků v těle. Tyto relativně nové magnetické NP s PEG jsou syntetizovány hydrotermickou reakcí pomocí dodecylsulfonátu sodného, kyseliny chlorovodíkové a octanu sodného. Vznikají nepravidelné kulovité NP s průměrem přibližně 30 nm. Z hlediska cytotoxicity těchto částic bylo prokázáno, že PEG zvyšuje biokompatibilitu adsorbentů (životaschopnost buněk neklesla pod 80 %). Adsorpční účinnost odstranění cesia z krve dosahuje během první hodiny 64,8 % (Qian a kol., 2017).

Mezi další inovace z hlediska dekontaminace cesia z gastrointestinálního traktu při vnitřní kontaminaci patří využití porézní aerogelu z pruské modři a celulózy. Celulóza je přírodní polymer, který je ideální pro svou fyzikální stabilitu, biokompatibilitu a díky přítomným hydroxylovým funkčním skupinám má silnou afinitu k samoasociaci a tvorbě rozšířené sítě vlivem mezimolekulárních a vnitromolekulárních vodíkových vazeb. Porézní aerogel vzniká přidáním pruské modři k celulóze. Ze vznikajícího hydrogelu vlivem difúze acetátových iontů z hydroxylových skupin celulózy do deionizované vody a následné lyofilizaci vzniká aerogel. Cytotoxicita tohoto činidla byla testována na střevních epitelálních buňkách (Caco-2) a na buňkách obdobných makrofágům (THP-1). Jelikož jsou tyto částice pruské modři větší, nedochází k endocytóze do buněk. Účinnost byla testována pomocí testu stability v simulované žaludeční tekutině a střevní tekutině imitující prostředí gastrointestinálního traktu. Z hlediska stability, životaschopnosti buněk, biokompatibility a adsorpční kapacity má tento porézní aerogel velký potenciál k využití jako perorálního léku dekontaminace radioaktivního cesia z trávicího traktu (Lee a kol., 2018).

Hexakynoželezitan měďnatý ($\text{Cu}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$) je chemickým analogem pruské modři. Jeho úloha v ochraně proti důsledkům vnitřní kontaminace ^{137}Cs je však odlišná. Po příjmu radioaktivního cesia buňkami dochází k působení ionizujícího záření v jádře a cytoplazmě buňky, jež vede ke vzniku velkého množství reaktivních forem kyslíku, které nejsou schopny intracelulární antioxidační enzymy v dostatečné míře likvidovat. Hexakynoželezitan měďnatý má obdobné funkce jako enzymy kataláza a superoxiddismutáza, které účinně eliminují volné radikály, konkrétně superoxidový radikál a peroxid vodíku. Ve výsledku má tento analog významné antioxidační vlastnosti, které přispívají k ochraně buněk proti dopadům ionizujícího záření (Xue a kol., 2023).

Mezi novinky v léčbě vnitřní kontaminace radioaktivním cesiem patří chelatační polymer na bázi chitosanu. Funkcionalizovaný chitosan představuje chelatační látku, která setrvává v gastrointestinálním traktu a váže radionuklidy jako je cesium, kobalt, stroncium, uran nebo thorium. Společně s navázanými radionuklidy je následně eliminována stolicí. Výhodou této látky je účinné působení při pH 1-7, což umožňuje vychytávání radionuklidů jak v kyselém prostředí žaludku, tak v méně kyselém prostředí tlustého střeva nebo konečníku (Durand a kol., 2024).

ZÁVĚR

Při vzniku a následném průběhu radiační mimořádné události vedoucí k rozšíření širokého spektra radioaktivních látek do životního prostředí musí být nastoleny mechanismy a postupy vedoucí k ochraně obyvatel před vnější, a hlavně vnitřní kontaminací. Z tohoto důvodu je nutné včasné hromadné ošetření kontaminovaných osob. Ideálním léčivem první volby je takové, které je účinné proti širokému spektru radioaktivních izotopů, má netoxické vlastnosti a není

z gastrointestinálního traktu vstřebáváno do krevního oběhu. Dojde-li již k absorpci radioaktivních látek do krve, je vyhovujícím absorbentem takový, který má velkou kapacitu a splňuje podmínku dostatečné selektivity, rychlé kinetiky, biokompatibility, minimálních vedlejších účinků a snadné separace. Jednotlivé radionuklidy jsou do organismu vstřebávány na základě svých chemicko-fyzikálních vlastností a z organismu jsou vylučovány a/nebo v něm přetrvávají, na základě svého biologického charakteru.

Mezi nejvýznamnější radionuklidy z hlediska možné dlouhodobé zátěže obyvatelstva v důsledku radioaktivního spadu po jaderné havárii patří zejména radioaktivní izotop ^{137}Cs . Moderní přístupy terapie vnitřní kontaminace cesiem se zaměřují na využití chelatačních vlastností NP pruské modři. Velikost NP je srovnatelná s biologickými molekulami, velká chelatační kapacita je dána vysokou hodnotou poměru povrch / objem, mají dobrou rozpustnost i stabilitu a v neposlední řadě široké možnosti modifikací, včetně vazby funkčních skupin na povrchu umožňujících dosažení cíleného chování. Nové formy výroby radioprotektiv namířených proti radionuklidům obsažených v radioaktivním spadu na bázi chelatačního komplexu hexacyanoferátu představují velký potenciál, který si v současné době získává místo v oblasti ochrany obyvatelstva proti jaderným zbraním hromadného ničení.

Použitá literatura

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) User's Manual. Online. Vídeň: IAEA. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/pub1661-web.pdf>.
2. RADIOBIOLOGY TEXTBOOK. 2023. Radiobiology Textbook. S.l.: Springer International Publishing. [online]. Dostupné z: <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/76707>. ISBN 978-3-031-18809-1.
3. PARRISH, J.S. a SEDA, G. Disasters Resulting from Radiologic and Nuclear Events. Critical care clinics. 2019, 35(4), s.619-631. Dostupné z doi: 10.1016/j.ccc.2019.06.005
4. AASETH, J.; NURCHI, V. M. a ANDERSEN, O. Medical Therapy of Patients Contaminated with Radioactive Cesium or Iodine. Biomolecules. 2019, 9(12). Dostupné z doi: 10.3390/biom9120856.
5. LEYSSENS, L.; VINCK, B.; VAN DER STRAETEN, K.; WUYTS, F. a MAES, L. Cobalt toxicity in humans—A review of the potential sources and systemic health effects. Toxicology. 2017, 387, s. 43-56. Dostupné z doi: 10.1016/j.tox.2017.05.015.
6. BLUST, R. Cobalt. Homeostasis and Toxicology of Essential Metals. 2017, s. 291-326. Dostupné z doi: 10.1016/S1546-5098(11)31006-0.
7. BURGER, A. a LICHTSCHEIDL, I. Strontium in the environment: Review about reactions of plants towards stable and radioactive strontium isotopes. Science of The Total Environment. 2019, s. 1458-1512. Dostupné z doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.312.
8. AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. TOXICOLOGICAL PROFILE FOR CESIUM. 2004. Dostupné z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK594670/pdf/Bookshelf_NBK594670.pdf.
9. ORY, C.; LEBoulLEUX, S.; SALVATORE, D.; LE GUEN, B.; DE VATHAIRE, F.; CHEVILLARD, S.; SCHLUMBERGER, M. Consequences of atmospheric contamination by radioiodine: the Chernobyl and Fukushima

accidents. *Endocrine* 2020, 71, s. 298-309. Dostupné z doi: 10.1007/s12020-020-02498-9.

10. CHEE, T.S.; TIAN, Z.; ZHANG, X.; LEI, L. a XIAO, CH. Efficient capture of radioactive iodine by a new bismuth-decorated electrospinning carbon nanofiber. *Journal of Nuclear Materials*. 2020, 542. Dostupné z doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152526.
11. ESPINO-VÁZQUEZ, A.N.; ROJAS-CASTRO, F.C. a FAJARDO-YAMAMOTO, L.M. Implications and Practical Applications of the Chemical Speciation of Iodine in the Biological Context. *Future pharmacology*. 2022, 2(4), s. 377-414. Dostupné z doi: 10.3390/futurepharmacol2040026.
12. ÖSTERREICHER, Jan a Jiřina VÁVROVÁ, 2003. *Přednášky z radiobiologie*. 1. vyd. Praha: Manus. ISBN 978-80-86571-01-0.
13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2006. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment"*. Vídeň: IAEA. Radiological Assessment Reports Series No. 8, STI/PUB/1239. ISBN 92-0-114705-8.
14. AOYAMA, H., a FUJIWARA, T. (2020). Cesium Dynamics in Plants and Fungi for Phytoremediation. *Frontiers in Plant Science* 11, 528. Dostupné z doi: 10.3389/fpls.2020.00528.
15. HAO, W.M.; BAKER, S.; LINCOLN, E.; HUDSON, S.; LEE, S.D.; LEMIEUX, P. Cesium Emissions from Laboratory Fires. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2018, 68(11), s. 1211–1223. Dostupné z doi: 10.1080/10962247.2018.1493001.
16. VENTURI, S. Cesium in Biology, Pancreatic Cancer, and Controversy in High and Low Radiation Exposure Damage—Scientific, Environmental, Geopolitical, and Economic Aspects. *International journal of environmental research and public health*. 2021, 18(17). Dostupné z doi: 10.3390/ijerph18178934.
17. HOOD, S. L. and COMAR, C. L.: Metabolism of cesium 137 in rats and farm animals. *Arch Biochem*. 45 (1953), 423.
18. NELSON, A., ULLBERG, S., KRISTOFFERSSON, H., RONNBACK, C.: Distribution of Radiocesium in Mice. *Acta Radiologica*. 1961, 55:5, S. 374-384, Dostupné z doi: 10.3109/00016926109175132.
19. SANDAL, N.; MITTAL, G.; BHATNAGAR, A.; PATHAK, D.P., SINGH, A.K. Preparation, Characterization, and In Vivo Pharmacoscintigraphy Evaluation of an Intestinal Release Delivery System of Prussian Blue for Decorporation of Cesium and Thallium. *Journal of drug delivery*. 2017. Dostupné z doi: 10.1155/2017/4875784.
20. MARTÍNEZ-ALONSO, B.; TORRES PABÓN, N.S.; TORRADO DURÁN, G.; GONZÁLEZ CRESPO, R. a TORRADO-SALMERÓN C, C.F.; JUBERÍAS SÁNCHEZ, A.; PEÑA ÁNGELES, M.F Physicochemical and pharmacotechnical characterization of Prussian blue for future Prussian blue oral dosage forms formulation. *Heliyon*. 2024, 10(2). Dostupné z doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24284.

21. LU, K.; ZHU, X.Y. a GU, N. Progress in the preparation of Prussian blue-based nanomaterials for biomedical applications. *Journal of materials chemistry B*. 2023, 11, s. 5272-5300. Dostupné z doi: 10.1039/D2TB02617A.
22. DOVERI, L.; DACARRO, G., FERNANDEZ, Y.A.D.; RAZZETTI M.; TAGLIETTI, A.; CHIRICO, G.; COLLINI, M.; SORZABAL-BELLIDO, I.; ESPARZA, M.; ORTIZ-DE-SOLORZANO, C.; URTEGA, X.M.; MILANESE, CH.; PALLAVICINI, P. Prussian Blue nanoparticles: An FDA-approved substance that may quickly degrade at physiological pH. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2023, roč. 227. Dostupné z doi: 10.1016/j.colsurfb.2023.113373.
23. QIAN, J.; XU, J.; KUANG, L. a HUA, D. Cesium Removal from Human Blood by Poly(ethylene glycol)-Decorated Prussian Blue Magnetic Nanoparticles. *Chempluschem full papers*. 2017, 82(6), s. 888-895. Dostupné z doi: 10.1002/cplu.201700183.
24. LEE, I.; KIM, S.H.; RETHINASABAPATHY, M. a HALDORAI, Y. Porous 3D Prussian blue/cellulose aerogel as a decorporation agent for removal of ingested 79 cesium from the gastrointestinal tract. *Scientific reports*. 8(1). Dostupné z doi: 10.1038/s41598-018-22715-w.
25. XUE, T.; LIU, F.; LU, B.; DONG, Q.; ZHAO, B.; CHEN, T.; ZHANG, K.; LI, J.; DU, J. A Prussian blue analog as a decorporation agent for the simultaneous removal of cesium and reactive oxygen specie. *Nanoscales advances*. 2023, 5(20), s. 5661–5670. Dostupné z doi: 10.1039%2Fd3na00388d.
26. DURAND, A.; BORISOVA, T.; LUX, F.; HOWARD, A.J.; TILLEMENT, A.; KUZNIETSOVA, H.; DZIUBENKO, N.; LYSENKO, V.; DAVID, L.; MOREL, D.; BERBECO, R.; KOMISARENKO, S.; TILLEMENT, O.; DEUTSCH, E. Enhancing radioprotection: A chitosanu-based chelating polymer is a versatile radioprotective agent for prophylactic and therapeutic interventions against radionuclide contamination. *Plos one*. 2024, 13(4). Dostupné z doi: 10.1371/journal.pone.0292414.

Poděkování - podpora

Poděkování za odbornou spolupráci při přípravě práce patří Mgr. Karolíně Bacílkové.

Práce byla podpořena MO ČR „Dlouhodobý plán rozvoje organizace 1011“ – Zdravotnická problematika ZHN II Vojenské lékařské fakulty Hradec Králové Univerzity obrany (DZRO-FVZ22-ZHN II).

VYUŽITÍ SIMULAČNÍCH TECHNOLOGIÍ V OBLASTI CBRN DEFENCE

USE OF SIMULATION TECHNOLOGIES IN THE CBRN DEFENCE AREA

Kamil Bednář, Petr Žuja*

Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, Univerzita obrany, Sídliště Víta Nejedlého, 682 01 Vyškov, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: kamil.bednar@unob.cz, tel.: +420 973 452 335

Abstrakt

Základem úspěchu každé vojenské operace je především rychlé a pružné velení a řízení. Jedním z možných řešení zkvalitnění podpory procesů velení a řízení je využití konstruktivní simulace. V armádním prostředí je tato metoda využitelná spíše pro vyšší taktické celky (brigáda, BÚU), ale lze ji využít i pro nižší jednotky na úrovni praporů či rot. Modelování a simulace nejsou ve vojenství úplnou novinkou, ale dynamický vývoj v oblasti informačních technologií (zejména v rozvoji umělé inteligence) přidal rozvoji těchto technologií na akceleraci. Je metodou, která může být využitelná jako podpora štábů v rámci rozhodovacího procesu, ale i pro výcvikové účely v rámci štábních nácviků. Pro eliminaci hrozeb v oblasti ochrany proti zbraním hromadného ničení lze pak simulovat různé druhy situací od úniků nebezpečných látek po působení jednotek za podmínek kontaminace zájmového prostoru. Výstupy z těchto simulací lze uplatnit jak při plánování manévru, tak například při simulaci vlivu nošení prostředků individuální ochrany v ochranné poloze na realizaci bojové činnosti.

Klíčová slova: CBRN Detence, učební a výcviková základna, konstruktivní simulace, velení a řízení, rozhodovací proces

Abstract

The foundation of success in any military operation lies primarily in rapid and flexible command and control. One possible solution for improving the support of command and control processes is the use of constructive simulation. In a military environment, this method is more applicable to higher tactical units (brigades, battalions), but it can also be utilized for lower units at the level of battalions or companies. Modeling and simulation are not entirely new in the military, but the dynamic development of technologies in the IT field (such as the development of AI) has accelerated the development of these technologies. It is a method that can be used to support staff in the decision-making process, as well as for training purposes in staff exercises. To eliminate threats in the area of CBRN, various types of situations can be simulated, from releases of hazardous substances to the actions of units under contamination conditions. The outputs can then be applied in planning maneuvers, for instance, in simulating the impact of wearing personal protective equipment on combat activities.

Key words: CBRN Defence, classroom training base, training and education, constructive simulation, Command and control, decision making process

ÚVOD

Učební a výcvikovou základnu (dále jen UVZ) Armády České republiky (dále jen AČR) ve svém komplexu tvoří interní normativní akty rezortu MO (předpisy, pomůcky, učebnice, příručky aj.) a technické a materiální prostředky vhodné pro realizaci výuky a výcviku. Tyto

prostředky jsou využívány k materiálnímu zabezpečení útvarů a zařízení AČR, centra simulačních a trežanéroých technologií aj. pro vedení výuky a výcviku, šíření informací, ucelování vědomostí, dovedností a návyků a schopností potřebných k operačnímu nasazení jednotek, útvarů a zařízení. Její základ tvoří:

- učební základna – soubor speciálních zařízení a prostorů včetně jejich základního vybavení v nichž probíhá jak výuka, tak i výcvik;
- výcviková základna – soubor speciálních prostorů, pracovišť a zařízení včetně jejich specifického vybavení v nichž se realizuje výcvik vojsk a umožňují získání dovedností a návyků v řízení a vedení bojové činnosti.

Dále můžeme UVZ rozdělit na:

- učební pomůcky – určité předměty, které prezentují vyučovací jev, vztah nebo činnost;
- didaktickou techniku – technické prostředky, co podporují používání učebních pomůcek. Jedná se o vizuální a auditivní sdělování informací, techniku prořízení a osvojování si vědomostí, dovedností a návyků;
- vyučovací, výchovná a výcviková místa a prostory – jejich koncepce, materiální vybavení a dislokace umožňuje racionálně využívat daného času a materiální základny k plnění výukových a vzdělávacích cílů přípravy vojáků. Patří sem např. učebny, dílny, kabinety, studovny, knihovny, střelnice, cvičiště, laboratoře, trenažerová centra aj.

Významné místo k plnění některých funkcí řízení, osvojování si vědomostí, dovedností a návyků mají moderní technické prostředky programovaného vyučování a učení. Tyto sice nemohou zastoupit učitele ve všech fázích vyučování, mohou však relativně samostatně realizovat určité učební a výcvikové operace. Výpočetní technika je využívána jako nejprogresivnější prostředek pro řízení výuky. Počítač s terminálovou sítí umožňuje vyučovat nová témata, procvičovat je, přezkušovat získané znalosti atp. Na výpočetní technice lze simulovat nebezpečné nebo jinak těžko dostupné procesy buď jeho demonstrací, nebo simulováním podmínek pro činnost či rozhodnutí. Počítač může vystupovat v roli trenažeru pro řízení jednotlivých úloh nebo i komplexní velitelské činnosti.

Vysoké požadavky na profesionalitu vojáků a zabezpečení připravenosti jednotek a útvarů AČR současně určují nároky na kvalitu a úroveň vojenského vyučování a výcviku, jehož cílem je dosažení potřebných vědomostí, návyků a dovedností pro výkon příslušné odbornosti i velitelské funkce. Zárukou dosažení potřebné úrovně v oblasti přípravy vojsk, v čase vymezeném příslušnými programy přípravy vojsk, je mimo jiné i kvalitní a moderní UVZ. Zavedením moderní, vysoce účinné výzbroje, techniky a materiálu a zvýšené nároky na jejich obsluhu nabyla i aktuálnost proniknutí moderních vědeckých a technických poznatků do oblasti výuky a výcviku vojsk. Hlavním úkolem je tedy připravit v co nejkratším časovém úseku profesionální vojáky pro zastávání jejich funkcí a dále připravit velitelský sbor tak, aby byl schopen splnit požadavky kladené na vedení ozbrojeného konfliktu a řešení krizových situací v době mírové činnosti.

Rozvoj UVZ chemického vojska (dále jen CHV) vychází z potřeby maximálně přiblížit výcvik jednotlivce, osádky, jednotek a útvarů podmínkám soudobého boje a na minimum zkrátit čas, věnovaný osvojení si teorie, techniky a materiálu chemického vojska a tím zvýšit dobu věnovanou výcviku v poli. Vlastní rozvoj a intenzivní využívání UVZ podmiňuje i charakter zbraní hromadného ničení (dále jen ZHN) a ochrana proti nim, protože podmínky jejich reálného použití je možné v mírové době pouze simulovat. Na druhé straně je nutno si uvědomit reálnou hrozbu použití ZHN i době míru, a to v souvislosti s CBRN terorismem (např. v roce 1985 - použití BCHL sarin v Tokijském metru).

Jednou z oblastí UVZ CHV AČR jsou učební pomůcky a zejména pak didaktická technika. Tyto lze charakterizovat jako prostředky vojenského vyučování a výcviku, jejichž využití pomáhá jednotlivcům a jednotkám při osvojování si vědomostí a získávání dovedností v ovládání techniky, vedení bojové činnosti, získávání potřebných návyků nebo umožňující imitaci takových činností, které nelze z bezpečnostních nebo ekonomických důvodů při výcviku použít. Patří sem např. simulátory, imitátory, trenažéry, výukové a výcvikové programy, obrazy, softwarové produkty a další.

Významnou oblastí rozvoje UVZ CHV představují výukové programy. V současné době jsou do používání zavedeny a využívány výukový program CBT (Computer Based Training = počítačem řízená výuka) pro vozidlo ACHR-90M, Směšovač EDS a vozidlo LR-RCH. Tyto umožňují nový způsob přípravy obsluh prostředků a vozidel a svým interaktivním, modulárním charakterem a využitím multimediálních prostředků naplňují požadavky na atraktivnost a efektivitu přípravy a předčí dosud zavedené klasické metody přípravy.

Perspektivní oblastí je i oblast modelování. V současné době se u jednotek a útvarů CHV využívá zejména v problematice monitorování CBRN situace. Jedná se o aplikační programová vybavení (dále jen APV), která je nutno chápat jako nástroj, který poskytuje vizualizaci o celkové CBRN situaci v zájmovém prostoru a vytváří základní předpoklady pro kvalifikované rozhodnutí velitelů a jejich štábů k přijetí nezbytných ochranných opatření a vedení další činnosti při plnění úkolu. Nutnou podmínkou pro využití daného situačního modelu je jeho správná interpretace, neboť samotný výstup ve formě zákresu o stavu a předpovědi šíření nebezpečné kontaminace není bez kvalifikovaného komentáře experta chemického vojska pro vševojskového velitele a jeho štáb plně vypovídající pro přijetí účinných opatření a k vedení bojové činnosti zájmovém prostoru. Mezi nejčastěji využívané APV patří CBRN Analysis, HPAC, TerEx a Aloha. Dále jsou pak využitelné různé pomůcky, databáze a kalkulačky jako např. ERG, WISER nebo Rad Pro Calculator.

Pro posouzení jednotlivých faktorů, které ovlivňují bojeschopnost jednotek a útvarů AČR se jako perspektivní jeví metoda konstruktivní simulace. Konstruktivní simulaci je možné využít v případě, že je potřeba analyzovat situaci, která by mohla nastat v reálném prostředí, ale její provedení v reálném světě by bylo příliš nákladné, nebo nebezpečné. Výhodou této metody je její nenáročnost na počet personálu, protože operuje jen subjekt simulace (uživatel), který simulaci vytváří a vyhodnocuje výsledky simulace. Jednou z hlavních výhod pro vojenské účely je možnost použití metody konstruktivní simulace při plánovacím a rozhodovacím procesu velitele při zpracování a analýze variant činnosti, která se provádí formou tzv. „válečné hry“. O možném využití simulačních technologií s použitím konstruktivní simulace v oblasti CBRN Defence, resp. OPZHN pojednávají následující kapitoly této statě.

1 KONSTRUKTIVNÍ SIMULACE

Simulace je definována jako napodobení nějaké skutečné věci, stavu nebo procesu, přičemž tzv. „počítačová simulace“ je pokusem o vymodelování reálného prostředí či hypotetické situace zprostředkované počítačem tak, aby bylo možné studovat tento systém a vysledovat, jak funguje. Chování tohoto systému může být pak předpovídáno změnou vybraných proměnných.

Ve vojenství se o simulaci (modelování) bitev pokoušeli již vojevůdci před několika stovkami let s využitím primitivních prostředků. Jejím rozvoj pak nastal až s rozvojem výpočetní techniky a vývojem APV k tomu určeného, a to přibližně na počátku 90. let 20. století. Další značný rozvoj pak nastal po vstupu ČR do NATO, kde se naskytla příležitost získat přístup k v té době již dostupným špičkovým technologiím a simulačním programům, které již tehdy měly zčásti za úkol podpořit rozhodovací procesy štábů.

Obecně lze říci, že pro vojenské účely jsou využívány tři základní typy simulací, a to:

- živá simulace;
- virtuální simulace a
- konstruktivní simulace.

Právě konstruktivní simulace se jeví jako možná metoda vhodná pro podporu rozhodovacího procesu, jelikož dokáže s velkou přesností simulovat procesy, které se mohou na bojišti odvíjet. Základem jsou logicko-matematické modely stochastického nebo deterministického charakteru. Představuje tak systematické seskupení technických a programových prostředků obsahujících integrované modely reálných objektů, terénu, prostředí a meteorologických podmínek, modely jednotek i jednotlivců s přesně definovaným vybavením a prostředky.

Simulační program provede simulaci činnosti jak vlastních, tak nepřátelských vojsk na základě zadaných parametrů. Výsledek je pak zobrazen na monitoru v grafické nebo textové podobě a poskytne veliteli informace potřebné k rozhodnutí, zda konkrétní manévry realizovat či nikoliv a jaká případně vyplývají z daného manévru rizika.

Konstruktivní simulaci lze využít zejména na operační či na taktické úrovni, a to na stupni brigáda a prapor v rámci rozhodovacího a plánovacího procesu MDMP (Military decision making proces). Součástí tohoto procesu je porovnání zvolených variant, které se často provádí formou tzv. „válečné hry“. Ta představuje de facto simulaci vojenské situace a porovnání sledovaných variant činnosti. Výsledkem může být zjištění nedostatků, kritických míst jednotlivých variant s ohledem na očekávanou činnost nepřítele.

Konstruktivní simulace je vhodnou metodou pro vzájemné porovnání variant činnosti a snižuje na minimum osobní preference a subjektivní náhled na danou situaci z řad velitelů i příslušníků štábů. Je schopna zaznamenávat a popsat výhody, nevýhody a rovněž hrozby, které z dané varianty vyplývají. Podmínkou kvalitní konstruktivní simulace je vložení správně nadefinovaných parametrů pro jednotky, doktríny a prostředky (materiál), dále pak mapové podklady, aktuální meteorologická situace aj. tak, aby simulace byla, pokud možno, co nejvíce přesná.

V současné době již jsou některé APV schopny využívat prvky umělé inteligence (dále jen AI), čímž se snižují nároky na vyplňování a zadávání všech procesů a vstupních dat. V prostředí Univerzity obrany je v současnosti využíván ke konstruktivní simulaci program Masa SWORD. Jedná se o komplexní simulační program, který využívá prvků umělé inteligence čímž dokáže automaticky simulovat a přizpůsobovat dané chování v souladu s aktuálním doktrinálním modelem. Výhodou tohoto programu je rychlost provedení simulace, možnost snadného provedení změn parametrů simulace a schopnost téměř okamžitého porovnávání daných scénářů. Výstupy lze graficky znázornit či zobrazit formou tabulek a grafů se sledováním závislostí, a to na základě zadání operátora (např. sledování závislosti ztrát v čase). Tak je možné např. sledovat i efektivitu jednotlivých fází boje.

Nevýhodou může být časová náročnost na proškolení operátorů a jeho složitost (uživatel by měl mít i určité IT schopnosti a schopnost porozumět, jak APV funguje). Další nevýhodou je nutnost vytvoření aktuálních databází s potřebnými informacemi danými pro prostředí AČR (např. struktur jednotek, parametrů jednotlivých prostředků, techniky, zbraňových systémů aj.).

1.1. Konstruktivní simulace v oblasti CBRN Defence

Konstruktivní simulace v oblasti CBRN Defence, resp. OPZHN představuje pokročilý nástroj pro hodnocení operační efektivnosti a podporu rozhodování v rámci plánování schopností ozbrojených sil. Je využitelná i v oblasti ochrany obyvatelstva. Konstruktivní simulace se využívá například pro:

- trénink štábů a velitelů jako podpora rozhodovacího procesu;
- modelování scénářů pro optimalizaci taktických činností,
- analýzu efektivity rozhodnutí v různých krizových podmínkách.

Výhodou konstruktivní simulace je především zvýšení kvality rozhodovacího procesu díky simulaci různých variant řešení, úspora nákladů oproti výcviku v reálném prostředí, možnost testování hypotetických scénářů bez rizika či podpora plánování schopností v rámci obranného plánování NATO (např. NDPP – NATO Defence Planning Process).

Jedním z hlavních softwarových nástrojů využívaných Univerzitou obrany je tedy již výše uvedené APV MASA SWORD, který umožňuje simulaci taktických operací a analýzu jejich výsledků.

Program MASA SWORD dokáže částečně simulovat i situace spojené s CBRN hrozbami. Ke správnému fungování programu v dané oblasti je nejprve nutné správně nastavit parametry jak na straně sledovaných vlastností zájmových kontaminantů, tak na straně přístrojů a techniky pro provedení jejich detekce a popř. i identifikace a parametrů zavedených prostředků individuální ochrany v AČR. V tomto případě u parametrů prostředků individuální ochrany je možné nastavit několik klíčových parametrů, které ovlivní danou simulaci. Z těchto parametrů lze zvolit následující úrovně ochrany:

- ochrana dýchacích orgánů osob - ochranná maska (Mask only);
- ochrana povrchu těla osob - ochranný oděv (Suit only);
- plná ochrana osob - (ochranná maska a ochranný oděv - Full protection);
- plná radiologická ochrana osob.

Dále pak vlivy, které ovlivňují účinky použití ZHN na zájmovou jednotku:

- Vliv na rychlost (Effects on speed) - faktor udávající kolikrát se zvolenou úrovní ochrany sníží rychlost jednotky při plnění úkolu.
- Vlivy na rychlost přebití (Effects on reloading duration) – faktor násobící čas potřebný pro přebití zbraňového systému v souvislosti se zvolenou úrovní ochrany.
- Vliv na dobu trvání změny postoje (Effect on posture change duration) – faktor ovlivňující pohyb vojáka, tedy násobí čas potřebný pro změnu postoje, držení těla, například změna pozice z leže do stoje.
- Vliv na pravděpodobnost zásahu (Effect on probability of Hitting) - nasazené prostředky individuální ochrany mají vliv na přesnost střelby, tento faktor udává kolikrát se přesnost zásahu v nasazených prostředcích sníží.
- Vliv na dosah detekce – faktor násobící a snižující schopnost rozsahu detekce a identifikace senzorů, a to jak senzorů, které jsou součástí přístrojového vybavení, tak lidských senzorů.

Dále mohou být v simulačním prostředí nastaveny další parametry, které mají vliv na plnění úkolu jako například čas, který jednotka potřebuje pro sejmutí daného typu ochrany či jeho nahrazení jiným.

Z parametrů zájmových kontaminantů je nutné nastavení druhu a typu kontaminantu a z vlastností jeho odpařování, vliv jednotlivých koncentrací na lidský organismus, intoxikace, vzdálenost od prostorů kontaminace (či úbytek dávky v závislosti na vzdálenosti) a schopnost prostředků individuální ochrany tyto kontaminanty zachytit v čase.

1.2. Ověření možností APV MASA SWORD při plánování operací

V rámci zkoušky využití zvoleného APV proběhlo testování vlivu použití prostředků individuální ochrany na bojeschopnost jednotek. Předmětem zkoumání byla mechanizovaná

rota, která byla součástí mechanizovaného praporu a měla za úkol ovládnout zájmový prostor v rámci daného vševojskového námětu. Zkoumány byly scénáře zaměřené na útok a přesun jak v kontaminovaném prostředí (chemická kontaminace BCHL v plynném a v kapalném skupenství), tak v nekontaminovaném prostředí. Předmětem zkoumání byly pak především parametry sledující počet raněných a mrtvých, počet kontaminovaných osob, míru jejich kontaminace a intoxikace a čas potřebný ke splnění úkolu, a to jak v souvislosti s lidským faktorem, tak v souvislosti s typem prostředku individuální ochrany, který jednotka měla při plnění úkolu nasazen v ochranné poloze. Protože do ovládnutí simulace se zapojuje i umělá inteligence a některá její rozhodnutí plynou z aktuální situace jednotky, byla každá simulace provedená 5x a výsledky byly následně zprůměrovány.

Typy sledovaných scénářů pro simulaci:

1. Útok mechanizovaného praporu na nepřítele o velikosti roty v prostředí, kde nebyl použit žádný chemický kontaminant.
2. Útok mechanizovaného praporu na nepřítele o velikosti roty přes kontaminovaný prostor, kde byl použit chemický kontaminant v plynném skupenství.
3. Útok mechanizovaného praporu na nepřítele o velikosti roty přes kontaminovaný prostor, kde byl použit chemický kontaminant v kapalném skupenství.
4. Přesun mechanizovaného praporu přes kontaminovaný prostor, kde byl použit chemický kontaminant v plynném skupenství.
5. Přesun mechanizovaného praporu přes kontaminovaný prostor, kde byl použit chemický kontaminant v kapalném skupenství.

Pro potřeby této statě uvádíme provedení konstruktivní simulace zvoleným APV u druhého výše uvedeného scénáře, kdy jednotka realizovala útok mechanizovaného praporu na nepřítele o velikosti roty přes kontaminovaný prostor, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství. Tento scénář byl nejprve zkoumán za situace, kdy jednotka měla nasazenou plnou ochranu osob a ve druhém případě, kdy použila k ochraně pouze ochrannou masku.

1.2.1. První provedená simulace podle zvoleného scénáře

Výsledky simulace útoku mechanizované roty v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství, kdy jednotka měla nasazenu plnou ochranu osob, jsou znázorněny v tabulkách 1, 2, 3 a 4. Počet zraněných a mrtvých v závislosti na zkušenosti je graficky vyjádřen na obrázku 1.

Tabulka 1 Doba plnění úkolu v závislosti na lidském faktoru v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou plnou ochranu osob [3]

Vyčerpanost	Morálka	Zkušenosti	Stres	Začátek plnění úkolu	Konec plnění úkolu	Celkový čas plnění úkolu
Neunavení	Standardní	Zkušení	Střední obavy	9:26	12:26	3:00
Neunavení	Nízká	Nováčci	Vystresovaní	9:26	12:44	3:18

Tabulka 2 Počet zraněných, typ zranění a počet mrtvých vycvičených vojáků v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou plnou ochranu osob [3]

Typ zranění	Hodnost		
	Počet důstojníků	Počet praporčíků	Počet vojáků
Lehké	0	0	3
Střední	0	0	1
Těžké s šancí na přežití	0	1	4
Velmi těžké	0	0	3
Ranění spolu	0	1	11
Mrtví	0	1	10

Tabulka 3 Počet zraněných, typ zranění a počet mrtvých nevycvičených vojáků v prostředí kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou plnou ochranu osob [3]

Typ zranění	Hodnost		
	Počet důstojníků	Počet praporčíků	Počet vojáků
Lehké	0	0	3
Střední	0	0	2
Těžké s šancí na přežití	0	0	4
Velmi těžké	0	0	5
Ranění spolu	0	0	14
Mrtví	1	3	20



Obrázek 1 Počet zraněných a mrtvých osob v plné ochraně v závislosti na zkušenosti – kontaminace chemickým kontaminantem v plynném stavu [3]

Tabulka 4 Míra kontaminace a obdržená dávka intoxikace osob v závislosti na lidském faktoru v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenu plnou ochranu osob [3]

Vyčerpanost	Morálka	Zkušenosti	Stres	Kontaminace	Obdržená dávka intoxikace
Neunavení	Standardní	Zkušení	Střední obavy	0	0
Neunavení	Nízká	Nováčci	Vystresovaní	0	0

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že zkušená jednotka se středními obavami (stres) byla schopna v nekontaminovaném prostředí splnit úkol o 18 minut rychleji než jednotka nováčků, která je nevytrénovaná, vystresovaná a s nízkou morálkou. Co se počtu zraněných a mrtvých týká, zkušená jednotka měla v průměru po splnění úkolu celkem 12 zraněných a 11 mrtvých, což pro mechanizovanou rotu představuje 34,4 % ztrát z 96 vojáků. Nováčci měli v průměru po splnění úkolu celkem 14 zraněných a 24 mrtvých, což pro mechanizovanou rotu představuje 39,6 % ztrát z 96 vojáků, v dané situaci má velitel k dalšímu plnění úkolu bojeschopnou jednotku pouze na 60,4 %.

V celkovém měřítku lze konstatovat, že jednotka nováčků měla o 5,2 % vyšší ztráty než jednotka zkušených vojáků. Z pohledu velení a řízení je patrné, že zkušená jednotka neměla ani jednoho zraněného nebo usmrčeného důstojníka, ale měla 1 zraněného a 1 mrtvého praporčíka. Nováčci přišli při útoku v průměru právě o 1 důstojníka a zemřeli jim 3 praporčíci. Ani v jedné sledované jednotce nedošlo při použití plné ochrany ke kontaminaci osob a neobdržela ani žádnou dávku intoxikace.

1.2.2. Druhá provedená simulace podle zvoleného scénáře

Výsledky simulace útoku mechanizované roty v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství, kdy jednotka měla nasazenou pouze ochrannou masku, jsou znázorněny v tabulkách 5, 6, 7 a 8. Počet zraněných a mrtvých v závislosti na zkušenosti je graficky vyjádřen na obrázku 2.

Tabulka 5 Doba plnění úkolu v závislosti na lidském faktoru v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou ochrannou masku [3]

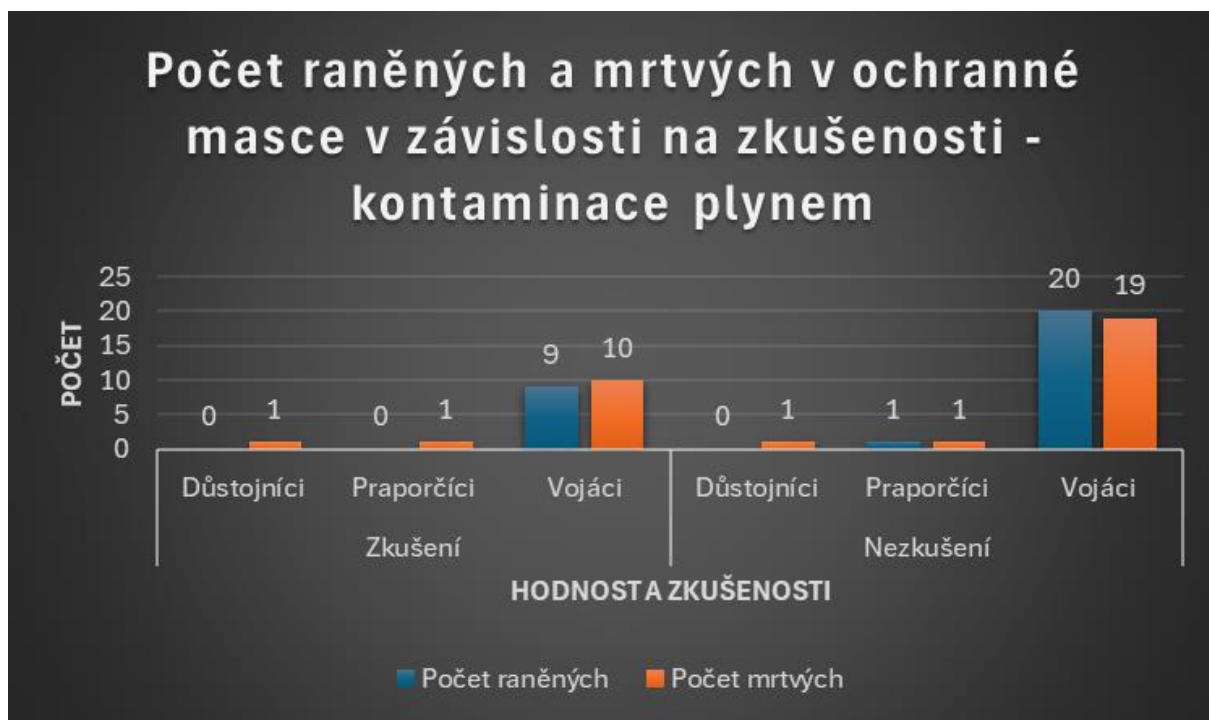
Vyčerpanost	Morálka	Zkušenosti	Stres	Začátek plnění úkolu	Konec plnění úkolu	Celkový čas plnění úkolu
Neunavení	Standardní	Zkušení	Střední obavy	9:26	11:42	2:16
Neunavení	Nízká	Nováčci	Vystresovaní	9:26	12:04	2:38

Tabulka 6 Počet zraněných, typ zranění a počet mrtvých vycvičených vojáků v prostředí, byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou ochrannou masku [3]

Typ zranění	Hodnost		
	Počet důstojníků	Počet praporčíků	Počet vojáků
Lehké	0	0	1
Střední	0	0	1
Těžké s šancí na přežití	0	0	4
Velmi těžké	0	0	3
Ranění spolu	0	0	9
Mrtví	1	1	10

Tabulka 7 Počet zraněných, typ zranění a počet mrtvých nevycvičených vojáků v prostředí, byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou ochrannou masku [3]

Typ zranění	Hodnost		
	Počet důstojníků	Počet praporčíků	Počet vojáků
Lehké	0	0	5
Střední	0	0	3
Těžké s šancí na přežití	0	1	6
Velmi těžké	0	0	6
Ranění spolu	0	1	20
Mrtví	1	1	19



Obrázek 21 Počet zraněných a mrtvých osob v ochranné masce v závislosti na zkušenosti – kontaminace chemickým kontaminantem v plynném stavu (BCHL) [3]

Tabulka 8 Míra kontaminace a obdržená dávka intoxikace osob v závislosti na lidském faktoru v prostředí, kde byl použit chemický kontaminant (BCHL) v plynném skupenství a jednotka měla nasazenou ochrannou masku [3]

Vyčerpanost	Morálka	Zkušenosti	Stres	Kontaminace	Obdržená dávka intoxikace
Neunavení	Standardní	Zkušení	Střední obavy	0	0,4149
Neunavení	Nízká	Nováčky	Vystresovaní	0	0,3869

Z výsledků lze konstatovat, že zkušební jednotka se středními obavami (stres) byla schopna v nekontaminovaném prostředí splnit úkol o 22 minut rychleji než jednotka nováčků, která je nevytrénovaná, vystresovaná a s nízkou morálkou. Co se počtu zraněných a mrtvých týká, zkušební jednotka měla v průměru po splnění úkolu celkem 9 zraněných a 12 mrtvých, což pro mechanizovanou rotu představuje 21,9 % ztrát z 96 osob. Nováčci měli v průměru po splnění úkolu celkem 21 zraněných a 21 mrtvých, což pro mechanizovanou rotu představuje 43,8 % ztrát z 96 osob a bojeschopnost jednotky představuje pouze 56,2 %. Lze tedy konstatovat, že jednotka je takticky nebojeschopná.

V celkovém měřítku lze konstatovat, že nováčci měli o 21,9 % vyšší ztráty než jednotka zkušených vycvičených vojáků. Z pohledu velení a řízení je tedy patrné, že zkušební jednotka měla v průměru jednoho usmrceného důstojníka, 1 raněného a 1 mrtvého praporčíka. Jednotka nováčků přišla v důsledku usmrcení průměrně o 1 důstojníka a 2 praporčíky, kdy jeden byl usmrcen a druhý zraněn. Obě sledované skupiny obdržely intoxikační dávky, kdy byla tato dávka u skupiny nováčků o 0,0028 jednotek nižší, než u skupiny zkušených vojáků.

2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ KE ZLEPŠENÍ STAVU

Na zhodnocení využitelnosti APV typu Masa SWORD pro posouzení vlivu úrovně ochrany osob s použitím prostředků individuální ochrany (PIO) v ochranné poloze na bojovou efektivitu jednotky v podmínkách chemické kontaminace je nutné nahlížet z několika uhlů pohledu.

Základní verze CBRN databáze, se kterou APV ve stávající verzi pracuje, sice umožňuje tvorbu scénářů, ve kterých se vyskytuje kontaminované prostředí zájmovým chemickým kontaminantem (BCHL), ale naráží na několik nedostatků a omezení. Tyto nedostatky spočívají zejména v seznamu zájmových kontaminantů a jejich charakteristice. Kontaminanty, které obsahuje základní verze, jsou definovány pouze obecně a chybí databáze jednotlivých BCHL či dalších zájmových chemických kontaminantů typu průmyslových chemických látek. Použité jednotky, ve kterých je nastavena koncentrace a intoxikace pro daný chemický kontaminant, nejsou přesně definovány, což je pro interpretaci výsledků z odborného pohledu značný problém. Co se samotných PIO týká, výběr a jejich nastavení pro provádění simulací a možnosti změny stupně ochrany, resp. připravenosti je v základní verzi Masa SWORD dostatečný pro testování použití pouze u ochranné masky a testování stupně připravenosti PIO 3 a 4 dle ATP-65.

V případě databáze jednotlivých typů jednotek AČR se potýkáme s problémem absence pěších jednotek. I když AČR nemá ve své struktuře čistě pěší jednotky, některé vlivy stupňů připravenosti PIO na bojovou efektivitu jednotky v podmínkách chemické kontaminace by bylo vhodné posuzovat právě na pěší jednotce a ne jednotce částečně chráněné např. ve vozidlech či jiných objektech. Důvodem je především vliv umělé inteligence na interpretaci výsledků, která je součástí APV. Ve výsledcích úrovně chemické kontaminace, případně obdržené dávky intoxikace jednotky, totiž zohledňuje určitou úroveň ochrany poskytnutou vozidlem, ve kterém jednotka plní stanovený úkol. Při provádění konstruktivních simulací je naráženo i na další vlivy umělé inteligence, která zasahuje také do samotného provádění úkolu. Tento jev se vyskytoval především v okamžiku, kdy chtěla jednotka vstoupit do kontaminovaného prostoru bez řádné úrovně ochrany, tedy buď bez ochranné masky nebo pouze v ochranném oděvu. Umělá inteligence v tento moment automaticky jednotce spustila filtroventilační zařízení ve vozidle, i když bylo v nastaveních toto zařízení předem vypnuto. V případě kdy byl vydán povel „SESEDNOUT“ umělá inteligence v případě kontaminace automaticky tyto sesednuté jednotky přesune do vozidla vybaveného filtroventilačním zařízením, aniž by umožňovala činnost jednotky mimo toto vozidlo. Tato skutečnost tak snižuje schopnost simulací při pohybu jednotek na bojišti bez techniky. Vzhledem k tomu, že AČR nedisponuje možností měnit doktrinální chování jednotek, je odstranění nebo zmírnění vlivu umělé inteligence na průběh situace takřka nemožné.

V oblasti vyhodnocování výsledků bojeschopnosti vojsk v podmínkách chemické kontaminace byl program schopen vyhodnotit počty zraněných, mrtvých a kontaminovaných pouze v simulacích, kdy provádí útok na nepřítele. Při přesunu, kde jednotka nebojuje, simulace vyhodnotila pouze čas plnění úkolu, nikoliv počty zraněných, mrtvých a kontaminovaných. V širším pojetí problematiky lze konstatovat, že APV typu MASA SWORD se jeví jako možnost podpůrného nástroje pro velitelské rozhodnutí od stupně rota a výš. Tento nástroj lze využít právě v kroku analýzy variant činnosti, a to jako možnost částečné analýzy dopadu použití chemického kontaminantu (BCHL) na jednotky. Nicméně velitel musí brát v úvahu možné odchylky jednotlivých výsledků simulací, protože výsledky a průběh jednotlivých simulací se může mnohdy lišit. A to především kvůli využití prvků již výše uvedené umělé inteligence, která se autonomně rozhoduje, jak provede splnění úkolu na základě dané situace. Pro směrodatnější a přesnější výsledek je tedy potřeba zopakovat simulaci v co nejvyšším možném počtu, v závislosti na čase, který je k dispozici.

ZÁVĚR

Zavádění nových informačních technologií a rozmach využití prvků umělé inteligence nabralo v současné době výrazné tempo. V dané souvislosti se tak zrychluje možnost zpracování dat v co nejkratším čase s cílem poskytnout velitelům a štábům informace k následnému rozhodnutí. Simulace jsou nástrojem, který umožňuje zvýšit velitelům a štábům situační povědomí a situační porozumění a umožnit tak správně rozhodnout o dalším postupu s cílem snížení rizik.

Metoda konstruktivní simulace s využitím vhodného aplikačního programového vybavení je vhodná pro provádění možného posouzení jednotlivých faktorů, které ovlivňují bojeschopnost jednotek a útvarů AČR. Je využitelná zejména k provedení situační analýzy, která by mohla nastat v reálném prostředí, ale její provedení v reálném světě by bylo příliš nákladné, nebo nebezpečné.

Využití konstruktivní simulace na bojovou činnost jednotek se jeví jako perspektivní i v oblasti CBRN Defence, resp. OPZHN, jako možná podpora velitelů a štábů v rámci zkvalitnění plánovacího procesu. Nicméně stávající APV, které AČR využívá tj. MASA SWORD, by vyžadovalo ke zvýšení věrohodnosti interpretovaných výsledků a jejich plné využitelnosti v praxi ve prospěch jednotek AČR provedení zásadních úprav a uzpůsobení jak v doktrinálním přístupu, tak i doplnění stávajících softwarových databází potřebnými informacemi o výzbroji jednotek a útvarů AČR.

Použitá literatura

1. *Učební a výcviková základna*. Vševojsk-10-6. Praha: Ministerstvo obrany, 2010.
2. *ATP-65(B): The effect of wearing CBRN individual protection equipment on individual and unit performance during military operations*. 2. North Atlantic Treaty Organization. Brusel: NATO standardization office (NSO), 2021.
3. ŠAFÁRIKOVÁ, Andrea. *Posouzení vlivu používání prostředků individuální ochrany na bojovou činnost jednotek metodou konstruktivní simulace*. Diplomová práce. Brno: Univerzita obrany, 2024.
4. HUBÁČEK, Martin; VRÁB, Vladimír. *Výcvik vybraných bezpečnostních složek s využitím konstruktivní simulace. The Science for Population Protection [online]*. 2012 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <http://www.populationprotection.eu/prilohy/casopis/19/130.pdf>
5. MASA Group. *Masa SWORD Simulation pour les officiers des États-Majors [online]*. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.masasim.com/sword>
6. ZAHRAVNÍČEK, Radim; BEDNÁŘ, Kamil; ŽUJA, Petr. *Zbraně hromadného ničení a ochrana proti nim*. Brno: Univerzita obrany, 2023. ISBN 978-80-7582-279-6.

Poděkování – podpora

Tato stať byla podpořena projektem Ministerstva obrany České republiky v rámci Dlouhodobého plánu rozvoje organizace - Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany "Výzkum metod a technologií ochrany před účinky zbraní hromadného ničení a průmyslových nebezpečných látek II" (DZRO-UOPZHN22-PROTECT II).

INTEGRACE POSTUPŮ TECHNICAL EXPLOITATION DO CBRN PROSTŘEDÍ

TECHNICAL EXPLOITATION PROCEDURES INTEGRATION IN CBRN ENVIRONMENT

Michal Belšán*

31. pluk radiální, chemické a biologické ochrany, Štefánikovo náměstí 1, Liberec 6, 460 06

* *Korespondující autor;* belsan.cbrn@gmail.com, michal.belsan@mo.gov.cz, tel.: +420 721 238 877

Abstrakt

Oblast Technical Exploitation (TE) představuje limitované zahrnutí forenzních věd do vojenského prostředí NATO s cílem získání zpravodajských informací. Vzhledem k celosvětovému trendu meziresortní spolupráce civilních a vojenských sektorů (CIV-MIL Cooperation), stejně jako muti-doménových operací (MDO), je nevyhnutelné, aby byla část procedur TE integrována také do činnosti schopností CBRN Defence, vyčleňovaných pro NATO. V tomto směru proběhly v letech 2019 a 2021 dva workshopy pod patronátem Framework Nations Concept (FNC), CBRN Protection Cluster, následované praktickým experimentem v roce 2023. Integrace postupů TE do CBRN prostředí probíhá ve spolupráci s NATO Technical Exploitation Group (NTEG), garantem budování TE Framework pro spojenecké operace, a v současnosti dospělo do bodu, v němž musí NATO CBRN Defence komunita učinit rozhodnutí do jaké hloubky a v jakém rozsahu hodlá postupy TE integrovat.

Klíčová slova: NATO, CBRN Defence, FNC, Technical Exploitation

Abstract

Technical Exploitation (TE) branch represents a limited inclusion of forensic science into the NATO military environment with intention to gain intelligence information. In consideration of worldwide trends in CIV-MIL Cooperation, and Multi-Domain Operations (MDO), the partial integration of TE procedures in CBRN Defence capabilities become inevitable. The Framework Nations Concept (FNC), CBRN Protection Cluster, provided support to two workshops in years 2019 and 2021 to elaborate on a proper approach of integration. Workshops were concluded by the practical Experiment in 2023. The work is coordinated with the NATO Technical Exploitation Group (NTEG) responsible for building the TE Framework for Allied Operations. Currently, the effort has reached the state where the crucial decision about the depth and extension of TE procedures integration should be made by the NATO CBRN Community.

Key words: NATO, CBRN Defence, FNC, Technical Exploitation

ÚVOD

Nový koncept CBRN Defence NATO¹ definoval zásadní prvky, určující trendy v oblasti vojenství pro blízkou budoucnost. Vedle naprosto nezbytné mezinárodní spolupráce se jedná zejména o realitu multidoménových operací (MDO), vyžadujících blízkou a nepřetržitou spolupráci všech vojenských odborností, podpořenou stálým provázáním vojenského a civilního sektoru (CIV-MIL Cooperation) v monitorování a vyhodnocování bezpečnostní situace v zájmovém prostoru. Vzhledem ke skutečnosti, že většina evropských armád nemá dostatečné prostředky k udržování komplexní forenzní úrovně postupů u CBRN Defence schopností, TE představuje integraci forenzních věd do vojenského prostředí, sice v omezené

míře, avšak stále dostačující k limitovanému využití získaného důkazního materiálu také mimo vojenskou sféru (např. soudní řízení u mezinárodního tribunálu).

Pokračující spolupráce mezi iniciativou Framework Nations Concept (FNC), CBRN Protection Cluster a NATO Technical Exploitation Group (NTEG) nadále zajišťuje v kontextu NATO's CFBRN Defence Policy, že koordinace aktivit mezi TE a CBRN Defence komunitami bude pokračovat tak, aby se stala pro budoucí operace NATO přínosem, nikoli limitem nebo dokonce zátěží.

1 1st CBRN-MERT CAPABILITY DEVELOPMENT WORKSHOP

Integrace procesů Technical Exploitation (TE) byla poprvé cíleně diskutována NATO CBRN komunitou v rámci workshopu, který organizoval 31. pluk radiální, chemické a biologické ochrany v roce 2019, pod patronátem iniciativy Framework Nations Concept (FNC), CBRN Protection Cluster. Cílem workshopu bylo podpořit budování schopnosti CBRN-MERT (Multirole Exploitation Reconnaissance Team) pro jednotky NRF (NATO Rapid Reaction Forces), zařazené do CJ CBRND TF (Combined Joint CBRN Defence Task Force), kde Česká republika vystupovala v roli Lead Nation.

2 2nd CBRN-MERT CAPABILITY DEVELOPMENT WORKSHOP

Druhý workshop, původně plánovaný na rok 2020, byl z důvodu pandemie Covid-19 uspořádán až v roce 2021. V jeho průběhu vznikl zásadní produkt, definující prioritní zaměření snahy spojení oblasti TE a CBRN Defence (Obrázek 1). Z diskuze se zástupci TE komunity bylo jasné, že aktuální problém nepředstavuje samotné zajištění Collected Exploitable Material (CEM), tedy odběr vzorků, nýbrž jejich uchování a vytěžení, pakliže byly kontaminovány. Hlavní iniciativa tedy musí být zaměřena na vytvoření funkčních procesů manipulace se zabezpečeným CEM poté, co byl dopraven a převzat ve vojenské CBRN laboratoři. Je zřejmé, že dekontaminace může zničit signifikantní množství informací na povrchu nebo ve vzorku, na druhou stranu TE Framework nedisponuje žádnými prostředky, umožňujícími manipulaci s kontaminovaným materiálem. Tuto problematiku detailně rozebírá dokument „*Study paper on TE Procedures integration in CBRN Environment.pdf*“, vytvořený Sub-Cluster Education and Training (SC EaT) FNC CBRN Protection Cluster.

3 CBRN-MERT EXPERIMENT

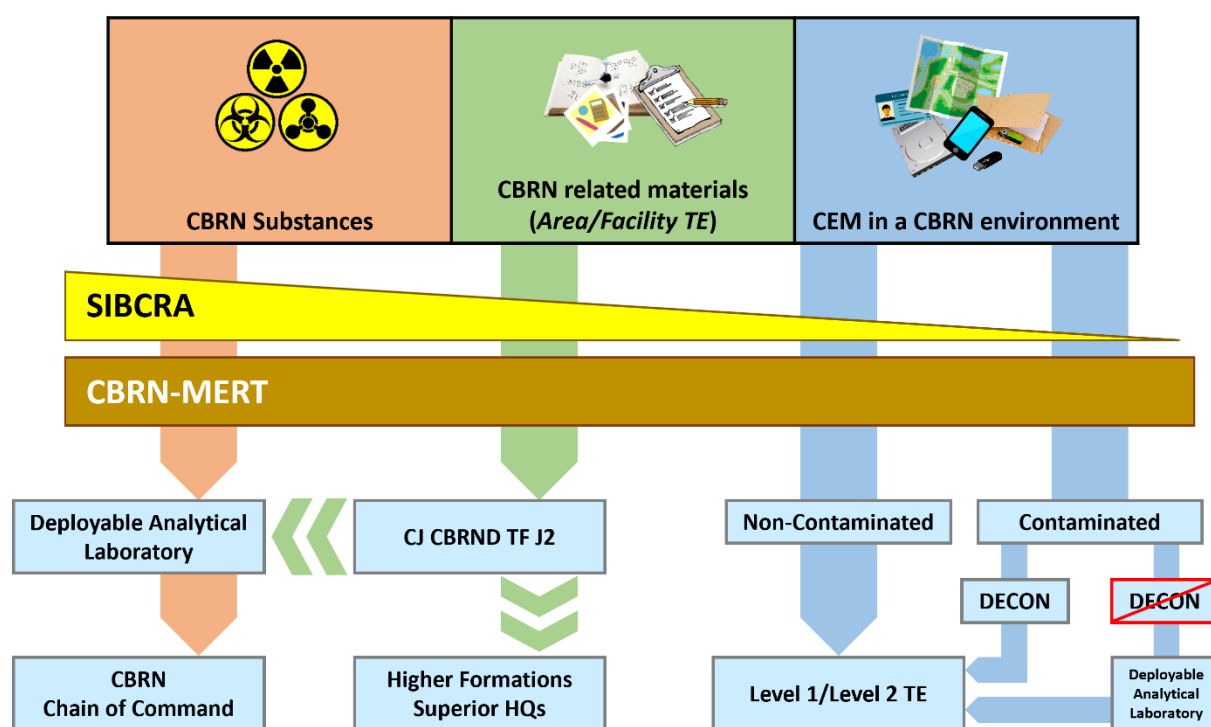
V roce 2023 proběhl praktický experiment s cílem určit míru integrace TE postupů do NATO CBRN Defence komunity. Ukázalo se, že schopnosti CBRN-MERT převážnou většinou těží své poznatky z kurzu Weapons Intelligence Team (WIT), který je však majoritně zaměřený na EOD problematiku. Dále experiment ukázal, že vybavení a postupy odběrových týmů jsou velice variabilní, založené na lokální, respektive národní interpretaci začlenění forenzních věd do vojenského prostředí. SME's (Subject Matter Experts) k tomu byly schopni pouze uvést, že adekvátní vybavení a postupy jsou takové, jež zachovají maximum důkazního materiálu na povrchu a uvnitř CEM neporušené. Z takového stanoviska je však velmi obtížné definovat základní vybavení a procedury pro CBRN schopnosti, což bylo také oznámeno zástupci NTEG se žádostí o bližší definování výchozích parametrů technického vybavení pro zabezpečení CEM a rámce postupů.

ZÁVĚR

V současnosti je integrace postupů TE do CBRN prostředí nesena výhradně schopnostmi CBRN-SICBRA, CBRN-MERT a CBRN-LAB (dle Bi-SC Capability Codes and Capability Statements). Interpretace velice všeobecných stanovisek dokumentu je ovšem vždy založena

na národním chápání daných vyjádření a všeobecně produkuje velmi variabilní přístup jednotlivých schopností stran postupů i vybavení, s výsledkem diskutabilní uplatnitelnosti v operacích NATO.

Je žádoucí, aby se zahrnutí dále rozšířilo také na zbytek schopností komponenty DIM (Detection, Identification and Monitoring), tj. především radiační, chemický a biologický průzkum. Současně je nezbytné, aby NATO CBRN Defence komunita definovala hloubku a rozsah integrace TE postupů do schopností své odbornosti tak, jak jsou pro ni žádoucí a přijatelné. Zejména se jedná o schopnost CBRN-LAB, kde bude docházet k převzetí zajištěných CEM.



Obrázek 1 Tok a zabezpečení zpracování/vytěžení informací z materiálů, zajištěných v rámci operací v CBRN prostředí

Použitá literatura

1. NATO's *CHEMICAL, BIOLOGICAL, RADIOLOGICAL AND NUCLEAR (CBRN) DEFENCE CONCEPT*. Intranet. MC 0603/2. P&C - PC-NCAB, 2025.

Pozn. Uvedená stať byla prezentována na jednání konference. Autor neposkytl souhlas se zveřejněním jejího plného znění ve Sborníku statí MVK CBRN PROTECT 2025. Tato skutečnost byla vědeckým a organizačním výborem konference respektována.

ZASTOUPENÍ AČR V PANELECH JCBRNDCDG

THE ARMY OF THE CZECH REPUBLIC REPRESENTATION IN JCBRNDCDG PANELS

Michal Belšán^{a*}

^a 31. pluk radiační, chemické a biologické ochrany, Štefánikovo náměstí 1, Liberec 6, 460 06

* Korespondující autor; belsan.cbrn@gmail.com, michal.belsan@mo.gov.cz, tel.: +420 721 238 877

Abstrakt

Joint CBRN Defence Capability Development Group (JCBRNDCDG) je ve struktuře North Atlantic Council (NAC) pod NATO Army Armament Group (NAAG) a zabezpečuje komplexní komunikační platformu k diskusi o trendech, směřování a rozvoji schopností k zabezpečení plné CBRN Defence pro jednotky v operacích NATO. JCBRNDCDG má aktuálně osm panelů, z nichž AČR má zastoupení ve čtyřech. Aktuálně jsou řešeny projekty ve vztahu k novému konceptu NATO pro problematiku CBRN Defence, revize schopností CBRN Defence a výzvy, vyplývající ze současného pojetí sil rychlé reakce pro NATO (NATO Forces Model).

Klíčová slova: JCBRNDCDG, NATO, CBRN Defence, NATO Forces Model

Abstract

In the structure of North Atlantic Council (NAC), the Joint CBRN Defence Capability Development Group (JCBRNDCDG) stands under NATO Army Armament Group (NAAG) and provides a complex communication platform for a discussion about trends, directions and development of full CBRN Defence to NATO units in the operations. From whole 8 panels the JCBRNDCDG has, the Army of the Czech Republic actively contributes in 4. The current projects are related to the new NATO CBRN Defence Concept, revision of CBRN Defence Capabilities, and challenges arise from actual structure of NATO Forces Model.

Key words: JCBRNDCDG, NATO, CBRN Defence, NATO Forces Model

ÚVOD

S oznámením nového pojetí a struktury sil vyčleňovaných pro spojenecké operace, NFM - NATO Forces Model¹, odsouhlaseného v roce 2022 a zveřejněného v roce 2023, vyvstaly pro členské státy nové výzvy, spojené s přípravou schopností, jež by daný model naplnily. Zvýšil se tím také tlak na iniciativy a skupiny uvnitř struktury NATO, odpovědné za definování směru a rozsahu, v nichž se mají schopnosti daných vojenských odborností rozvíjet.

1 PŘEDSTAVENÍ JCBRND CDG

Za doporučení k rozvoji schopností CBRN Defence je zodpovědná skupina Joint CBRN Defence Capability Development Group (JCBRND CDG), stojící ve struktuře North Atlantic Council (NAC) pod NATO Army Armament Group (NAAG)². JCBRND CDG je tvořeno panely se specifickým zaměřením na proces přípravy schopností nebo schopnosti samotné (Obrázek 1).

Jelikož samotné názvy panelů vysvětlují vlastní zaměření, je zde uveden pouze jejich seznam, korespondující mimo jiné s okruhy schopností (CBRN Defence Enabling Capabilities), uvedenými v novém konceptu NATO pro zabezpečení CBRN Defence³:

- Detection, Identification and Monitoring Panel (DIMP);
- Physical Protection Panel (PPP);
- Hazard Management Panel (HMP) – bez zastoupení ČR;
- Doctrine and Terminology Panel (DTP);
- Knowledge Management Panel (KMP);
- Training and Exercise Panel (TEP);
- Challenge Levels Panel (CLP) – bez zastoupení ČR;
- Maritime Team of Experts (MAR ToE);
- v současnosti připravovaný Aerial Team of Experts (AER ToE).

2 PROJEKTY JCBRND CDG

Projekty řešené v rámci JCBRND CDG panelů v současnosti reflektují zejména tři hlavní trendy, zmíněné v NATO's CBRN Defence Policy⁴. Prvním aspektem možného nasazení spojeneckých sil je MDO, kdy provázanost spolupráce jednotlivých domén bude zásadním způsobem rozšiřovat rozdíly mezi nimi.

Dalším trendem je tzv. CIV-MIL spolupráce, tedy provázání kooperace a koordinace aktivit mezi civilním a vojenským sektorem. Velmi často je zmiňována mezipřesortní spolupráce, z čehož je jasné, že pro budoucnost není nadále možné striktně separovat vojenské a civilní bezpečnostní resorty. Tato myšlenka byla několikrát podpořena také v rámci IV. části seriálu konferencí Vnitřní bezpečnost a odolnost států⁵, organizovaných v rámci Future Forces Forum platformy. Stejný poznatek vyplývá také z probíhajícího konfliktu mezi Ukrajinou a Ruskem.

Třetí trend, který však nepředstavuje žádnou novinku, je mezinárodní spolupráce. Její důležitost vychází ze skutečnosti, že žádný ze spojenců v NATO není dlouhodobě schopen zabezpečit komplexní rozvoj všech vojenských odborností najednou. Z tohoto důvodu je naprosto zásadní udržovat zastoupení ČR v mezinárodních kooperačních iniciativách, a to nejen přímo podporujících a umístěných ve struktuře NATO, ale také volně vytvořených iniciativ mimo alianční strukturu, jako Framework Nations Concept nebo Smart Defence.

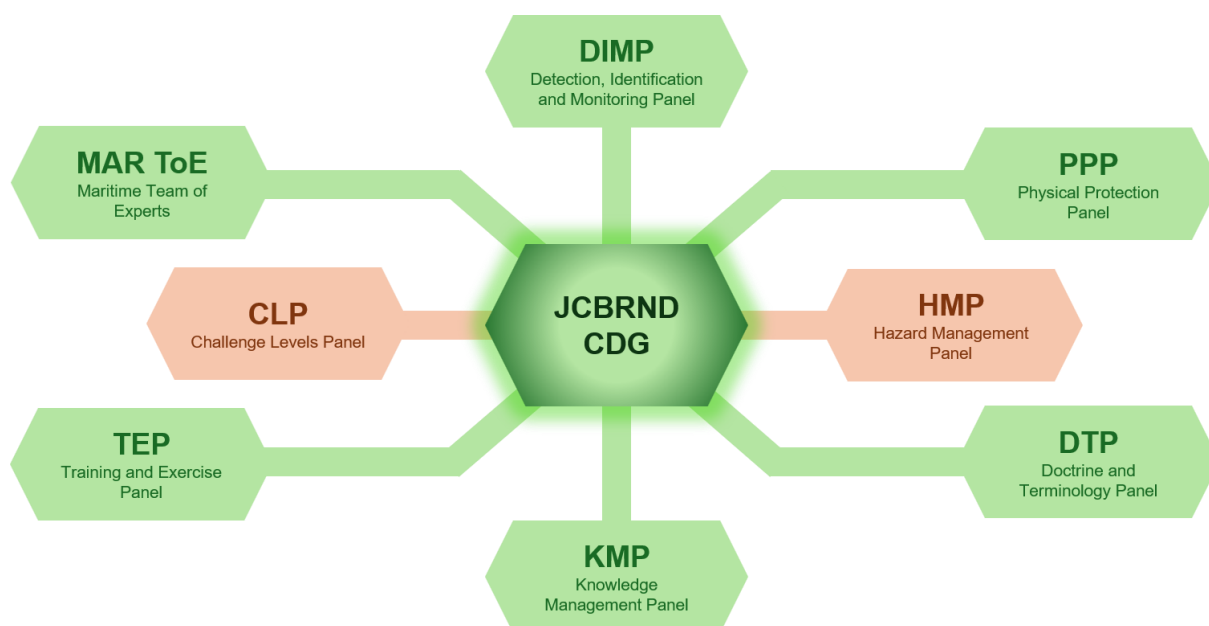
3 ZASTOUPENÍ ČR V PANELECH JCBRND CDG

Zastoupení ČR v panelech JCBRND CDG je v současnosti dostatečné, avšak z důvodu tristní personální situace AČR a časté migrace způsobilých osob mezi jednotkami je historicky i do budoucna stav spíše neuspokojivý. S přihlédnutím ke skutečnosti, že většina řešených projektů má několikaletý přesah, není žádoucí, aby účast v panelech byla vázána na funkční zařazení (tabulkové místo), nýbrž přímo určitou osobu se zabezpečením stálé zastupitelnosti.

Jelikož je současné zastoupení ČR v panelech formálně i neoficiálně pokryté téměř výhradně příslušníky jednotek na taktické úrovni, mělo by být nahlíženo jako žádoucí zahrnutí také akademické komunity AČR se zaměřením na akreditované a neakreditované vzdělávání.

ZÁVĚR

Panely JCBRND CDG řeší současné a budoucí směřování rozvoje schopností v oblasti CBRN Defence. Zastoupení ČR způsobilým personálem z řad Chemického vojska zabezpečí nejen možnost zasahovat a přispívat do tohoto procesu, ale zejména udržet povědomí AČR o aktuálních trendech v dané oblasti. Neopomenutelnou součástí účasti v panelech je také podíl na tvorbě doktríny v rámci NATO a networking s mezinárodní CBRN Defence komunitou, včetně zástupců průmyslu.



Obrázek 1 Struktura JCBRND CDG panelů, oranžově podbarvené panely aktuálně nemají zastoupení ČR

Použitá literatura

1. NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION [NATO]. *NATO Force Model*. Online. [cca 2023], Last updated: 02 Apr. 2025 16:17. Dostupné z: https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_234075.htm. [cit. 2025-10-04].
2. NATO – Defence Investment Portal. CNAD-Structure-2025-V5.pdf. In: *diweb.hq.nato.int* [online]. Dostupné z: <https://diweb.hq.nato.int/Pages/committees.aspx>. [cit. 2025-09-22].
3. *NATO's CHEMICAL, BIOLOGICAL, RADIOLOGICAL AND NUCLEAR (CBRN) DEFENCE CONCEPT*. Intranet. MC 0603/2. P&C - PC-NCAB, 2025.
4. NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION [NATO]. *NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Policy*. Online. 2022, Last updated: 05 Jul. 2022 15:56. Dostupné z: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_197768.htm. [cit. 2025-10-04].
5. VÝBOR PRO BEZPEČNOST. *Vnitřní bezpečnost a odolnost státu IV. (8. září 2025)*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.psp.cz/sqw/hp.sqw?k=4906&td=19&cu=18>. [cit. 2025-10-04].

Pozn. Uvedená stat' byla prezentována na jednání konference. Autor neposkytl souhlas se zveřejněním jejího plného znění ve Sborníku statí MVK CBRN PROTECT 2025. Tato skutečnost byla vědeckým a organizačním výborem konference respektována.

VÝPOČETNÍ NÁSTROJ PRO STANOVENÍ ÚČINNOSTNÍ KALIBRACE DETEKTORU: EFFTRACE

COMPUTATIONAL TOOL FOR DETECTOR EFFICIENCY CALIBRATION: EFFTRACE

Róbert Brachna^{a*}, Tomáš Grísa^a, Jakub Česka^a

^a NUVIA, a.s. Modřínová 1094, 674 01 Třebíč, Česká republika

* Korespondující autor; e-mail: robert.brachna@nuvia.com, tel. +420 731 430 306

Abstrakt

Společnost NUVIA a.s. se dlouhodobě zabývá gama spektrometrií a s ní související účinnostní kalibrací detektorů, která je nezbytná pro správné kvantitativní vyhodnocení měřených dat. V rámci interního vývoje vzniká výpočetní nástroj EffTrace, určený k rychlému a dostatečně přesnému odhadu účinnostní křivky použitého detektoru pro měřené geometrie. EffTrace umožňuje snadné vytvoření modelu detektoru a okolní geometrie, která ovlivňuje výslednou účinnost – včetně samostínícího efektu zdroje, překážek mezi zdrojem a detektorem, a také kolimátoru, jenž je součástí definice detektoru. Teoretická přesnost výpočtů je validována pomocí komplexního simulačního kódu MCNP, přičemž cílem je dosáhnout průměrné odchylky pod 5 %. Součástí EffTrace je uživatelsky přívětivé grafické rozhraní, podpora dávkového výpočtu i možnost citlivostní analýzy parametrů modelu.

Klíčová slova: gama spektrometrie, účinnostní kalibrace, EffTrace, MCNP validace

Abstract

NUVIA a.s. has long been engaged in gamma spectrometry and the related efficiency calibration of detectors, which is essential for the accurate quantitative evaluation of measured data. As part of its internal development, the EffTrace computational tool is being created to enable fast and sufficiently accurate estimation of the efficiency curve of a given detector for measured geometries. EffTrace allows for easy modeling of the detector and surrounding geometry that affects the resulting efficiency – including the self-attenuation effect of the source, obstacles between the source and the detector, and also the collimator, which is part of the detector definition. The theoretical accuracy of the calculations is validated against the complex MCNP simulation code, with the goal of achieving an average deviation of less than 5 %. EffTrace features a user-friendly graphical interface, support for batch calculations, and the ability to perform sensitivity analyses of model parameters.

Key words: gamma spectrometry, efficiency calibration, EffTrace, MCNP validation

ÚVOD

Ve společnosti Nuvia a.s. jsou výpočty účinnosti běžnou součástí interních procesů i zákaznických projektů. Pro tyto účely byl tradičně využíván simulační kód MCNP (MCNP6.2 [1]), jehož ovládnutí vyžaduje rozsáhlé znalosti a dlouhodobé školení. Tento přístup je nevhodný pro netrénované uživatele a navíc časově náročný, zejména při výpočtu peakové účinnosti, který vyžaduje samostatné simulace pro každou energii. Výpočetní náročnost se výrazně zvyšuje při hustých materiálech, nízkých energiích pod 50 keV a větších vzdálenostech.

Z těchto důvodů byl vyvinut dedikovaný software pro účinnostní kalibrace, který je plně pod kontrolou společnosti a navržen s důrazem na uživatelskou přívětivost. Výsledkem je program EffTrace, jehož cílem je dosáhnout odchylky menší než 5 % oproti simulacím MCNP, a to i v náročných podmínkách, jako jsou extrémně blízké geometrie nebo použití silně kolimujících kolimátorů.

1 TEORIE VÝPOČTU

Výpočet účinnosti v programu EffTrace zohledňuje pouze fotony emitované ze zdroje, které jsou plně absorbovány v objemu detektoru. Základním principem algoritmu je definice účinnosti bodového zdroje, která je vyjádřena jako součin geometrické účinnosti a vnitřní účinnosti detektoru:

$$\xi = \xi_G \cdot \xi_D. \quad (1.1)$$

Vnitřní účinnost detektoru není počítána přímo, protože by to vyžadovalo komplexní simulaci interakcí částic. Místo toho jsou součástí definice detektoru kalibrační účinnosti, tj. skutečně naměřené hodnoty pro reálný detektor pomocí bodových zdrojů v různých vzdálenostech a úhlech vůči ose krystalu.

Geometrická účinnost zahrnuje dvě složky:

- interakce s překážkami na přímé dráze fotonu směrem do středu krystalu,
- prostorový úhel, tedy pravděpodobnost, že foton emitovaný náhodným směrem dopadne na krystal.

Celková účinnost bodového zdroje je tedy dána vztahem:

$$\xi = \omega \cdot \xi_{path} \cdot \xi_D, \quad (1.2)$$

kde ω představuje prostorový úhel a člen ξ_{path} vyjadřuje pravděpodobnost, že foton projde všemi překážkami bez interakce a zachová si plnou energii. Tento člen je popsán exponenciálním zákonem útlumu [2]:

$$\xi_{path} = \exp\left(\sum_j -\mu_j \rho_j L_j\right), \quad (1.3)$$

kde L_j je délka dráhy v j -tém médiu (překážce), ρ_j hustota materiálu média a μ_j je tabulková materiálová hodnota celkového zeslabení záření bez koherentního rozptylu.

Při výpočtu pro homogenní objemovou nebo povrchovou kontaminaci je nutné integrovat přes celý objem zdroje. Tento integrál je aproximován pomocí výpočetní sítě, kdy je geometrie rozdělena na konečný počet elementárních objemů a účinnost je určena jako vážený průměr účinností bodových zdrojů umístěných ve středech těchto objemů:

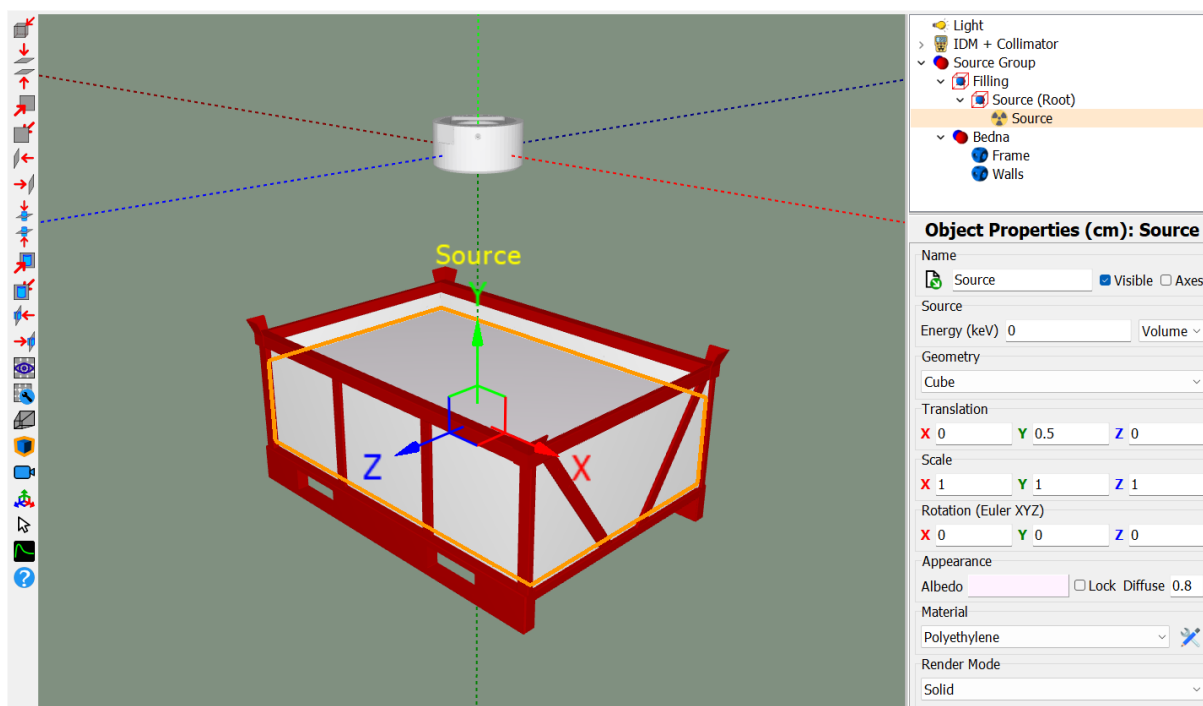
$$\xi = \frac{\sum_i V_i \xi_i}{V}, \quad (1.4)$$

kde V_i je objem elementu a V celkový objem zdroje. Tento postup zajišťuje správné zohlednění homogenní distribuce aktivity.

2 EFFTRACE MODEL

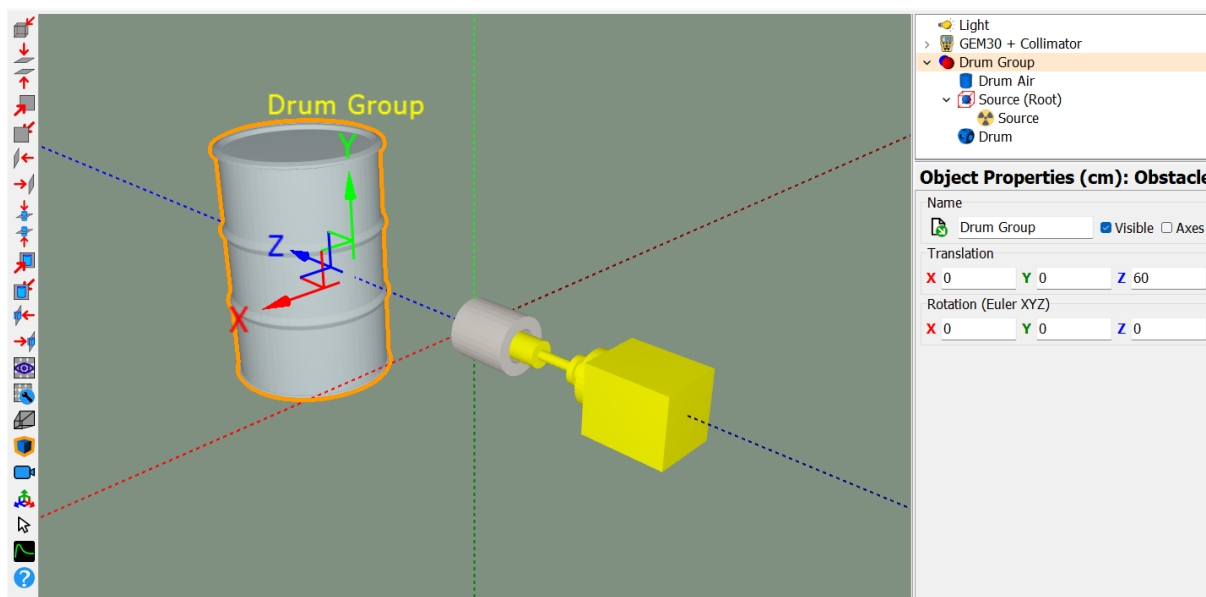
Modelování v programu EffTrace je organizováno do projektů, které zahrnují definici geometrie, materiálů a parametrů výpočtu. Součástí editoru je 3D grafické rozhraní vybavené vizualizačními nástroji, jako jsou různé typy projekce, rozměrová mřížka a přímé editace transformací pomocí interaktivních ovládacích prvků (tzv. gizmo).

Geometrie lze definovat pomocí analytických útvarů, například krychlí, sfér nebo válců. Pro složitější modely je k dispozici podpora CSG (*Constructive Solid Geometry*), která umožňuje vytvářet objekty na základě triangulace povrchu a aplikovat booleovské operace (průnik, sjednocení, rozdíl). Tímto způsobem lze sestavit komplexní model z jednoduchých základních tvarů. Program rovněž podporuje import souborů ve formátu .stl, který je široce využíván v CAD a 3D modelovacích aplikacích, což umožňuje přímou integraci konstrukčních modelů (Obrázek 1 a Obrázek 2).



Obrázek 1 Model měření bedny s kontaminovaným materiálem

Kromě standardních objektů lze vytvářet i abstraktní struktury, například seskupování geometrií nebo změnu referenčních bodů objektů. Tento přístup umožňuje modelovat specifické scénáře, jako je například procentuální úroveň zaplnění kontejneru.



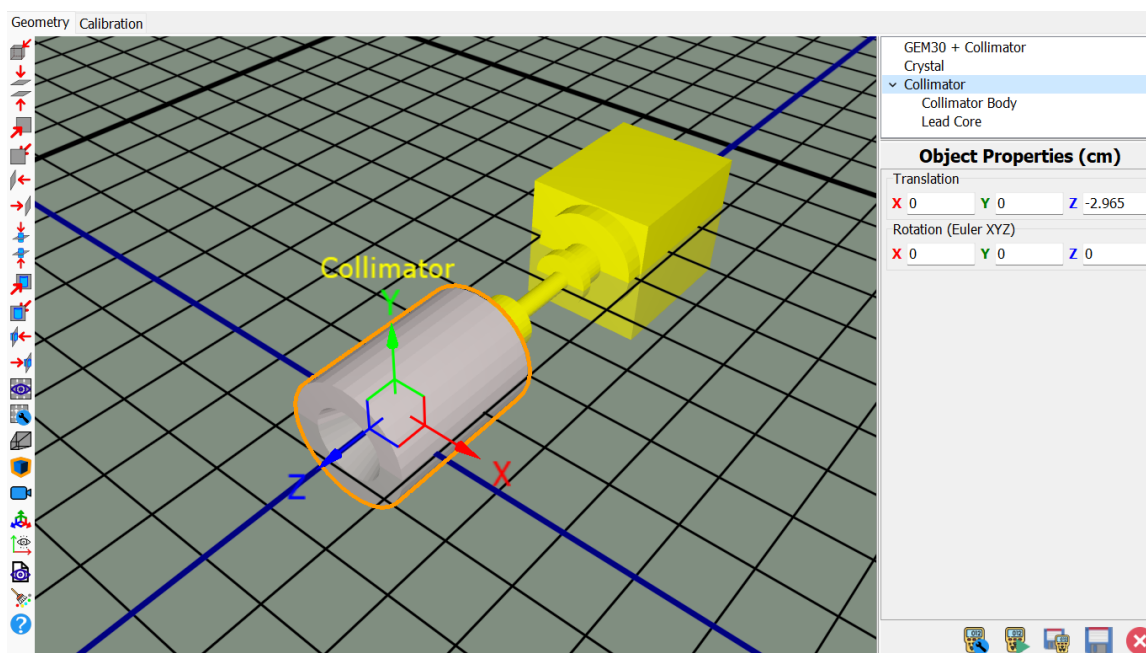
Obrázek 2 Model měření sudu s kontaminovaným materiálem

3 DEFINICE DETEKTORU

Detektory jsou v EffTrace modelovány nezávisle na projektech prostřednictvím samostatného editoru. Do projektů se následně importují z katalogu detektorů, přičemž uživatel má možnost definovat vlastní konfigurace. Definice detektoru zahrnuje dvě hlavní části: geometrii (Obrázek 3) a kalibraci (Obrázek 4).

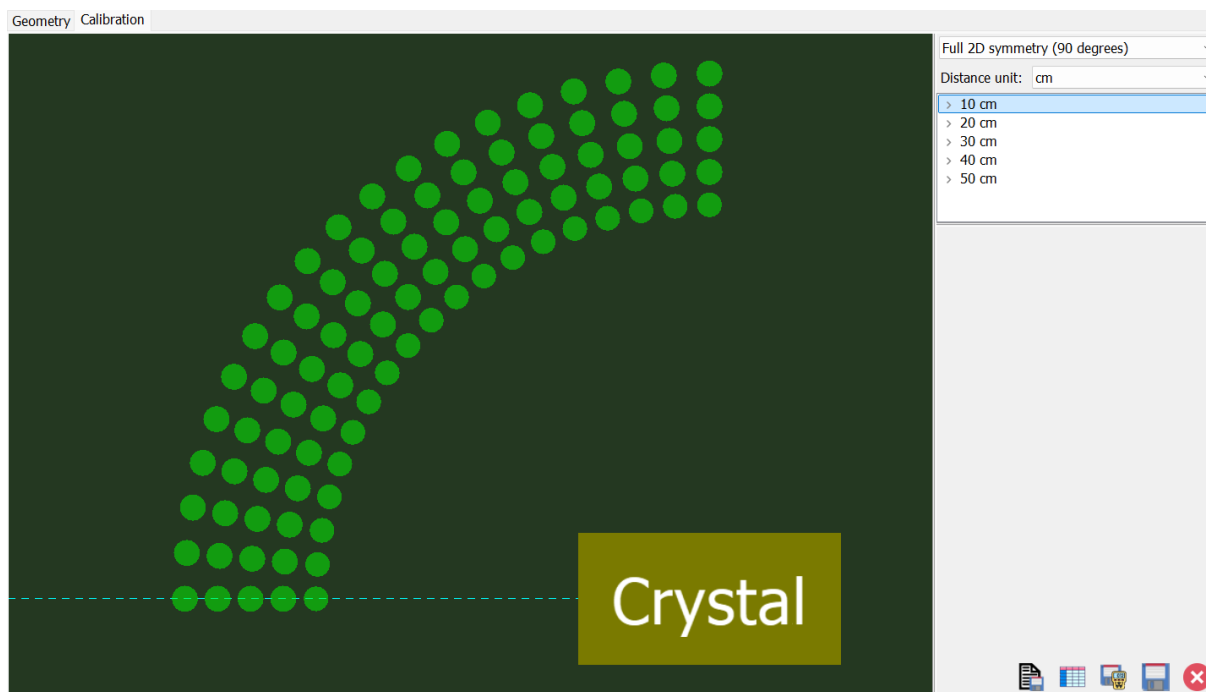
Geometrie je rozdělena na tři komponenty:

- Krystal, který představuje aktivní objem detektoru,
- Referenční geometrii, sloužící pro přesné umístění zdrojů vůči reálné konstrukci (nevstupuje do výpočtu účinnosti),
- Kolimátor, který může a nemusí být součástí definice.



Obrázek 3 Definice geometrie detektoru

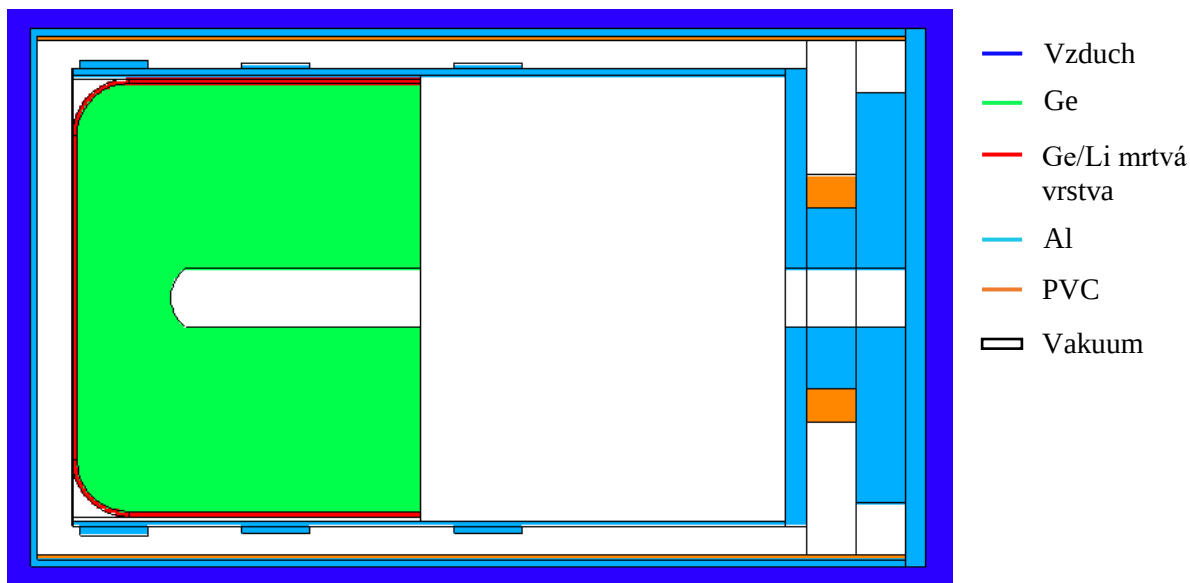
Efekt kolimátoru na celkovou účinnost je předpočítáván v rámci editoru společně s prostorovým úhlem. Tyto veličiny jsou určovány pomocí jednoduché Monte Carlo simulace ostřelování krystalu. Výhodou tohoto přístupu je, že vliv kolimátoru je spočítán pouze jednou, čímž se výrazně snižuje výpočetní náročnost při následném určování účinnosti konkrétní geometrie scény.



Obrázek 4 Zadání kalibrace detektoru

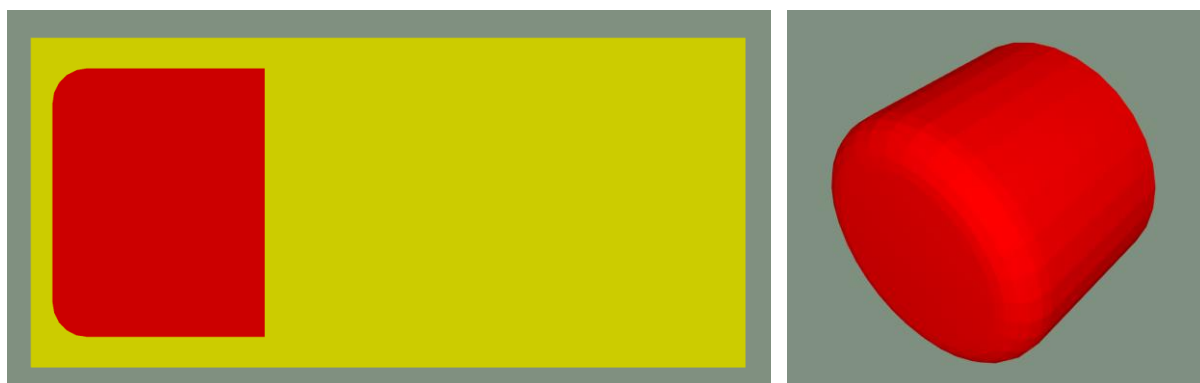
4 POROVNÁNÍ S MCNP

Validace výpočtové metody EffTrace byla provedena porovnáním s kódem MCNP. V prostředí MCNP byl vytvořen teoretický model 30 % koaxiálního HPGe detektoru (Obrázek 5), na jehož základě byly vypočteny kalibrační účinnosti se STOP kritériem relativní chyby 0.5 %.



Obrázek 5 MCNP model detektoru

Kalibrace byla realizována pro vzdálenosti [10, 20, 30, 40, 50] cm od středu krystalu a úhly natočení [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90]° vůči ose krystalu. Pro energie bylo zvoleno široké rozmezí od 30 keV do 10 MeV. V nástroji EffTrace byl vytvořen odpovídající model detektoru se simulovanou kalibrací (Obrázek 6).



Obrázek 6 Geometrie EffTrace detektoru. Červená barva – krystal, žlutá barva – zbytek detektoru pro referenci ve scéně. Vlevo – 2D pohled na vnitřní geometrii detektoru, vpravo – 3D pohled na geometrii krystalu

Následně byly definovány různé geometrické scénáře, ve kterých byly účinnosti vypočteny jak v EffTrace, tak v MCNP, a výsledky byly přímo porovnány. Díky použití kalibračních účinností přímo z MCNP modelu bylo dosaženo přímého srovnání teoretické přesnosti algoritmu EffTrace vůči MCNP.

4.1. Bodový zdroj bez překážek

Prvním krokem validace je ověření chování EffTrace při jednoduchém bodovém zdroji umístěném ve vzduchu. Tato konfigurace slouží k prověření základních principů, jako je interpolace mezi kalibračními body, extrapolace do větších vzdáleností, a naopak extrapolace do extrémní blízkosti detektoru. Bodový zdroj je umístěn ve vzdálenostech [22, 200, 500] cm od čela detektoru a jsou uvažovány úhly natočení [0, 15, 45, 75]°. Pro všechny výpočty je použito energetické spektrum [40, 60, 200, 400, 661, 1173, 2000, 5000, 10000] keV. Tabulka 1 uvádí pro každou vzdálenost průměr absolutní odchylky EffTrace vůči MCNP, vypočtený přes všechny čtyři úhlové konfigurace. Výjimkou je případ, kdy je zdroj umístěn přímo na čelo detektoru (0 cm), kde není úhlová variabilita.

Tabulka 1 Průměrná absolutní odchylka EffTrace vůči MCNP bodového zdroje ve vzdálenostech od čela detektoru přes různé úhly natočení. Výjimkou je vzdálenost 0 cm, kde jsou odchylky uvedeny přímo bez absolutní hodnoty.

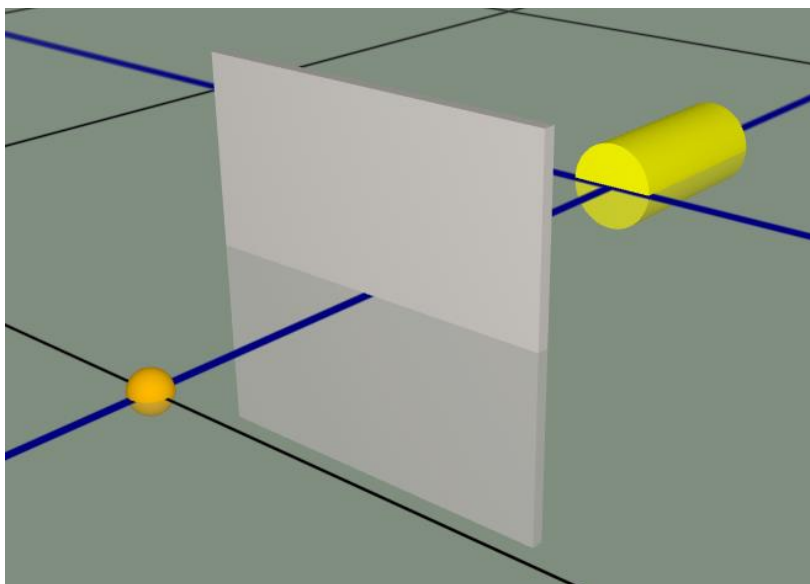
Energie (keV)	22 cm	200 cm	500 cm	0 cm
40	14.23 %	13.56 %	12.52 %	150.78 %
60	0.73 %	1.93 %	2.41 %	46.23 %
200	0.31 %	0.69 %	0.98 %	0.39 %
400	0.68 %	1.24 %	0.85 %	-0.63 %
661	0.32 %	0.52 %	0.48 %	-1.39 %
1173	0.38 %	0.66 %	0.59 %	-1.02 %
2000	0.27 %	0.84 %	0.61 %	-3.74 %
5000	0.37 %	0.76 %	0.96 %	0.34 %
10000	0.44 %	0.72 %	1.05 %	-2.53 %

Pro standardní vzdálenosti se odchylky drží pod stanoveným limitem 5 %, s výjimkou energie 40 keV. Tato odchylka byla detailně analyzována a bylo zjištěno, že její příčinou je interpolace

mezi kalibračními energiemi v oblasti, kde účinnostní křivka prochází inflexním bodem. Tento problém lze eliminovat zahuštěním kalibračních energií v daném rozsahu. V případě umístění zdroje přímo na čelo detektoru se EffTrace potýká s vyššími odchylkami u nízkých energií. Extrémně blízká geometrie je obecně považována za citlivou, a proto jsou plánovány úpravy algoritmu pro dosažení vyšší přesnosti. U vyšších energií je však i v této konfiguraci dosaženo přesnosti lepší než 5 %.

4.2. Bodový zdroj s překážkou

Další úrovní validace je přidání překážky mezi zdroj a detektor. Její geometrie byla zvolena ve tvaru krychle, která reprezentuje obecnou překážku (například plech). Byly použity dva materiály (dvě chemické kompozice): ocel a polystyren. Pro ocel byla uvažována hustota $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a tloušťka 1 cm, u polystyrénu pak proměnná hustota $[0.5, 1, 2] \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ při tloušťce 10 cm. Obrázek 7 ukazuje umístění bodového zdroje ve vzdálenosti 50 cm od detektoru spolu s překážkou umístěnou uprostřed. V Tabulce 2 jsou uvedeny odchylky EffTrace vůči MCNP pro všechny konfigurace.



Obrázek 7 Bodový zdroj s překážkou

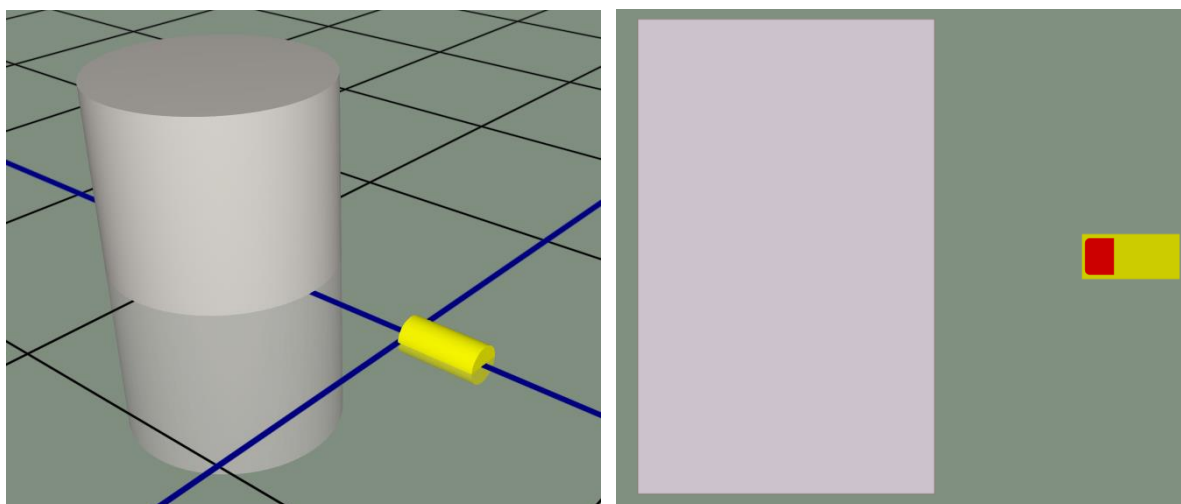
Tabulka 2 Odchylky pro geometrii bodového zdroje s překážkou

Energie (keV)	ocel		polystyrén	
	$1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
40	11.47 %	8.11 %	7.70 %	9.51 %
60	-1.49 %	-2.09 %	-1.82 %	-3.04 %
200	-0.06 %	-0.78 %	-1.31 %	-2.08 %
400	-0.50 %	-1.12 %	-1.55 %	-0.93 %
661	-0.51 %	-1.12 %	-1.14 %	-1.03 %
1173	-0.10 %	-0.27 %	-0.02 %	0.08 %
2000	-1.18 %	-0.67 %	-0.39 %	-0.82 %
5000	-1.83 %	-1.42 %	-1.13 %	-1.44 %
10000	-0.56 %	-0.42 %	-0.33 %	-0.85 %

U tenké oceli i tlustšího polystyrenu pozorujeme stejné chování jako u jednoduchých bodových zdrojů ve vzduchu – při energii 40 keV dochází k nárůstu odchylky v důsledku interpolační chyby. Pro vyšší energie zůstávají odchylky pod požadovaným kritériem 5 %.

4.3. Objemový zdroj sud

Po ověření bodových zdrojů byla validace rozšířena na homogenní objemovou kontaminaci. Jako reprezentativní případ byl zvolen kontaminovaný sud (Obrázek 8). Střed sudu byl umístěn ve vzdálenosti 50 cm od detektoru. Jeho definice je tvořena dvěma válcovými geometriemi. Výplň sudu má průměr 50 cm a výšku 80 cm, přičemž jako materiál byl zvolen polyetylén s hustotou $0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Plášť sudu je tvořen ocelí o tloušťce 2 mm a hustotě $7.85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tabulka 3 uvádí odchylky EffTrace v porovnání s MCNP pro tuto geometrii.



Obrázek 8 Geometrie sudu. Vlevo – 3D pohled, vpravo – 2D pohled

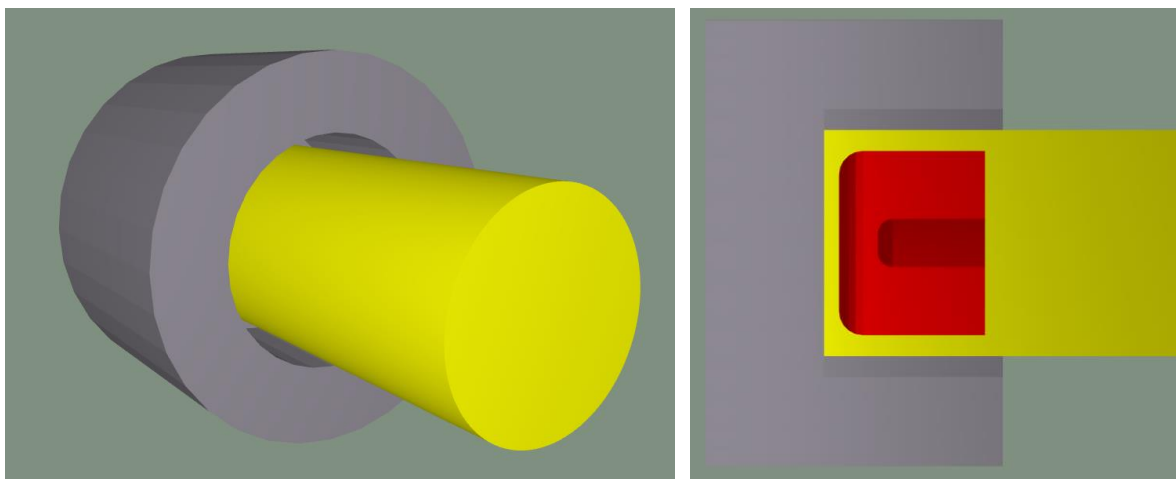
Tabulka 3 Odchylky pro geometrii sudu

Energie (keV)	odchylka
40	13.07 %
60	-2.29 %
200	-0.38 %
400	1.14 %
661	0.01 %
1173	0.99 %
2000	0.27 %
5000	-0.32 %
10000	-0.30 %

Výsledné odchylky zůstávají pod hranicí 5 %, s výjimkou energie 40 keV, kde se objevuje interpolační chyba. Tu lze odstranit rozšířením kalibrační sady energií v příslušné oblasti.

4.4. Objemový zdroj Marinelliho nádoba

Marinelliho nádoba představuje typický příklad objemového zdroje v těsné blízkosti detektoru (Obrázek 9). Jako materiál byl zvolen silikonový kaučuk s proměnnou hustotou $[0.5, 1, 2] \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Tabulka 4 obsahuje odchylky pro tyto hustoty.



Obrázek 9 Geometrie Marinelliho nádoby. Vlevo – 3D pohled, vpravo – 2D pohled

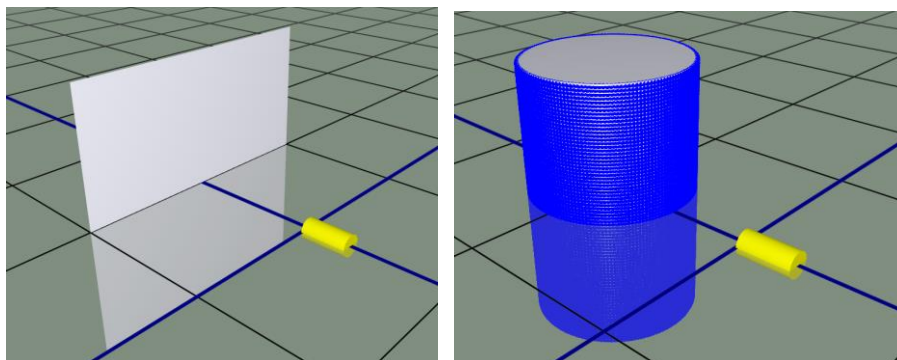
Tabulka 4 Odchylky pro geometrii Marinelliho nádoby

Energie (keV)	$0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
40	7.94 %	2.83 %	-4.13 %
60	-3.14 %	-5.04 %	-8.46 %
200	-1.50 %	-2.10 %	-3.54 %
400	0.78 %	0.07 %	-1.16 %
661	-0.31 %	-1.01 %	-1.57 %
1173	-0.09 %	-0.51 %	-1.24 %
2000	0.39 %	0.21 %	-0.10 %
5000	0.76 %	0.49 %	-0.22 %
10000	0.66 %	0.49 %	0.15 %

Protože se jedná o rozšíření kontaktního bodového zdroje na objemový zdroj, pozorujeme obdobné chování odchylek jako v případě kontaktního bodového zdroje. U vyšších energií zůstávají odchylky pod hranicí 5 %. Naopak u nízkých energií dochází k jejich nárůstu. Tento nárůst však není tak výrazný, protože se odchylky zprůměrují přes celou geometrii.

4.5. Povrchová kontaminace

Pro ověření výpočtu povrchové kontaminace byly zvoleny dvě referenční geometrie: čtverec o ploše 1 m^2 jako reprezentant rovinného povrchu a válec jako příklad zakřivené plochy (Obrázek 10). U válce nebyly uvažovány jeho horní a dolní podstavy. Střed obou geometrií byly umístěny ve vzdálenosti 50 cm od detektoru.



Obrázek 10 Povrchová kontaminace. Vlevo – rovinná plocha, vpravo – zakřivená plocha

Tabulka 5 Odchylky pro povrchovou kontaminaci

Energie (keV)	čtverec	válec
40	15.42 %	14.13 %
60	-2.13 %	-1.44 %
200	-0.58 %	-1.64 %
400	-0.10 %	-0.18 %
661	-0.12 %	-1.26 %
1173	1.12 %	0.30 %
2000	-0.82 %	-0.90 %
5000	-0.73 %	0.62 %
10000	0.09 %	0.40 %

Odchylky v Tabulce 5 jsou konzistentní s předchozími výsledky a zůstávají pod hranici 5 %. Výjimku opět představuje energie 40 keV, kde se projevuje interpolační chyba. Tento problém lze odstranit doplněním kalibračních energií v dané oblasti.

5 AKTUÁLNÍ STAV VÝVOJE

Současná produkční verze EffTrace (1.1.0) umožňuje výpočet účinností pro standardní geometrie s dostatečnou přesností. Mezi rozšířené funkce patří možnost dávkového výpočtu, kdy lze pomocí jednoduchých parametrů nadefinovat více nezávislých úloh a spustit je jedním příkazem. Další nadstavbovou funkcí je citlivostní analýza, která umožňuje považovat vybrané vstupní parametry modelu (např. hustotu materiálu) za náhodné veličiny a hodnotit tak vliv jejich nejistoty na výsledné účinnosti.

Další kroky vývoje zahrnují zejména:

- zvýšení přesnosti pro extrémně blízké geometrie,
- implementaci korekcí na pravé sumace.

Výpočetní jádro EffTrace je navíc dostupné jako externí knihovna, což umožňuje jeho integraci do softwarových řešení na míru, například pro in situ laboratorní měření.

ZÁVĚR

Tento příspěvek byl zaměřen na představení nově vyvinutého softwaru EffTrace určeného pro výpočet účinnostních kalibrací v gama spektrometrii. Hlavním cílem řešení je spojení jednoduchosti modelování s vysokou rychlostí výpočtu prostřednictvím analytických metod. Přesnost výpočetního algoritmu byla validována porovnáním s výsledky získanými pomocí komplexního simulačního kódu MCNP.

EffTrace je určen pro kalibraci spektrometrických přístrojů, zejména pro měření in situ a pro specializované systémy určené k měření radioaktivního odpadu před jeho uvolněním do životního prostředí. V těchto aplikacích se dosud běžně využívají metody založené na Monte Carlo výpočtech [3, 4]. Navržený přístup představuje efektivní alternativu, která umožňuje výrazně zkrátit výpočetní čas při zachování požadované přesnosti, čímž zvyšuje praktickou použitelnost v provozních podmínkách.

Použitá literatura

1. WERNER, C. J. et al. *MCNP6.2 Release Notes*. Los Alamos National Laboratory, report LA-UR-18-20808 (2018).

2. GILMORE, G. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2. vydání. New York: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-86196-7.
3. SULAN, J. et al. Metrology for decommissioning nuclear facilities: Partial outcomes of joint research project within the European Metrology Research Program. *Applied Radiation and Isotopes*. 2018, č. 134, s. 351-357. DOI: doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.08.032
4. PEVRES, V. et al. Validation of a free release measurement facility on a decommissioning site. *Applied Radiation and Isotopes*. 2021, č. 178. DOI: doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109968

ODOLNOST PRODYŠNÝCH OCHRANNÝCH TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ PROTI PLAMENI

FLAME RESISTANCE OF BREATHABLE PROTECTIVE TEXTILE MATERIALS

Pavel Častulík ^{a*}, Jiří Chrástek^b, Jakub Vaněk^c

^a DEKONTA, a.s., Volutová 2523, 158 00 Praha 5, Česká republika

^b DEKONTA CBRN, s.r.o., Vídeňská 134/102, 619 00 Brno, Česká republika

^c Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., Kamenná 71, 262 31 Milín, ČR

*Korespondující autor; e-mail: pavel.castulik@dekonta.cz., tel.: +420 702 241 684

Abstrakt

V ozbrojených konfliktech opět dochází k používání termo-barických výbušných prostředků a zápalných látek, jako jsou termitové směsi, ztužené hořlaviny typu napalm nebo bílý fosfor. Vojáci podobně jako hasiči a další záchranáři IZS jsou ohroženi rovněž zplodinami hoření při požárech v bojových pozicích a zasažení civilních objektů a kritické infrastruktury.

V rámci řešení projektu na ochranu hasičů proti zplodinám hoření (FIREPRO) jsou navrženy pro ochranné prvky povrchu těla kombinace kompozitních vrstev se sférickým aktivním uhlím a adsorpčních uhlíkových textilií pro zachyt těkavých toxických a karcinogenních zplodin a aerosolů jako jejich nosičů na nanovlákněných filtračních vrstvách. Funkční adsorpční a filtrační vrstvy jsou oboustranně chráněny textilními materiály s odolností proti plamenům (FR- fire resistance).

Ve sdělení jsou uvedeny příklady testů odolnosti plamenem prodyšných ochranných materiálů používaných v osobních ochranných prostředcích hasičů a armády. Vrstvy adsorpčních uhlíkových textilií výrazně zvyšují odolnosti prodyšných bariérových textilních materiálů proti plamenu.

Klíčová slova: Zápalné látky, FOP, FR, sférické aktivní uhlí, adsorpční uhlíkové textilie, odolnost proti plamenu.

Abstract

In armed conflicts, thermobaric explosives and incendiary substances such as thermite mixtures, napalm-type thickened flammable fuels or white phosphorus are again used. Soldiers, like firefighters, are also at a risk from combustion products during fires in combat positions and when civilian objects and critical infrastructure are hit.

As part of the project to protect firefighters against combustion products, combinations of layers with spherical activated carbon and adsorbent carbon textiles for adsorption of volatile toxic and carcinogenic products, including nanofiber layers for capturing aerosols isolated from the outside and inside with flame-resistant textile materials (FR-fire resistance), are designed for protective items of the body surface.

The presentation provides examples of flame resistance tests of breathable protective materials used in personal protective equipment for firefighters and the military. Layers of adsorbent carbon fabrics significantly increase the flame resistance of breathable barrier textile materials.

Key words: Flammable substances, FOP, FR- fire resistance, spherical activated carbon, adsorptive carbon fabrics, flame resistance.

ÚVOD

Ozbrojené konflikty jsou vždy doprovázeny výskytem požárů v důsledku sekundárních účinků výbušné munice při vedení bojových operací v urbanistických nebo přírodních prostředích. Vedle toho jako součást ofenzivních a obranných činností jsou cíleně používány rovněž zápalné prostředky proti živé síle, vojenského vybavení, včetně kritické vojenské a civilní infrastruktury. Ve výzbroji armád je nadále munice plněná bílým fosforem, primárně určeným pro maskování aerosolem oxidu fosforečného při spontánním hoření výbuchem rozptýleného bílého fosforu. Sekundárními účinky hoření částic fosforu dochází k šíření požárů na technice, terénu a ke vzniku popálenin na těle osob. Aerosol oxidu fosforečného je rovněž toxický při vdechnutí s důsledky poleptání tkáně plic vytvořenou kyselinou fosforečnou při reakci oxidu fosforečného s vlhkostí v plicích.

Dalším významným rizikem jako zápalným prostředkem je používání termo-barických výbušných prostředků, včetně praktických případů opětného použití zápalných směsí termitů a ztužených hořlavin typu napalm. Zvýšení rizika používání zápalných prostředků klade opět důraz na osobní ochranné prostředky s kombinovanými vlastnostmi ochrany osob i proti zápalným látkám. V minulém období „studená válka“ existovaly osobní ochranné prostředky s kombinovaným účinkem jak proti chemickým zbraním, tak i proti zápalným látkám.

Příkladem kombinované ochrany bylo zavedení jednorázové pláštěnky JP75, kdy hořící skvrna napalmu se odtavila s bariérovým materiálem pláštěnky a tím byl omezen přímý kontakt s uniformou nebo jinak nechráněnými částmi těla.

Většina oděvních textilních materiálů se při dostatečně vysoké teplotě vznítí a přenáší tepelnou energii hoření k pod nimi ležícím vrstvám a k pokožce. Zavedené vševojskové filtračních (prodyšných) ochranné oděvy (FOP) však postrádaly vlastní účinnější nehořlavou úpravu proti napalmu. Rizikovým faktorem při zasažení povrchu uniforem nebo FOP hořícím napalmem, který ulpí na struktuře textilní vrstvy je nebezpečí vzniku popálenin 2. a 3. stupně na těle [1], až po následné prohoření textilních vrstev. Proto zejména nejrozšířenější kategorie vševojskových FOP byla podrobena testům odolnosti proti plamenu zhotovených z různých bariérových materiálů obsahující vrstvy s naneseným práškovým a sférickým aktivním uhlím na nosné textilií nebo pěnové vrstvě a s adsorpční uhlíkovou textilií.

1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Účelem testů plamenem bylo ověření hořlavosti jednotlivých vzorků s cílem zejména posoudit propálení jednotlivých ochranných vrstev.

1.1. Testované materiály

Složení ochranných vrstev testovaných vzorků je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 Popis a složení vzorků

Vzorek číslo	Popis vzorku	Obrázek
1	Adsorpční uhlíková textilie (Ilonka) pro FOP první generace (VÚ070) Netkaná polyesterová textilie s nánosem částicového aktivního uhlí s akrylátovým pojídkem	
2	FOP-90 BOIS Vnitřní vrstva sférického AU (Blücher GmbH)	
3	FOP - BOIS - Vnější vrstva se sníženou hořlavostí. - Vnitřní vrstva sférického aktivního uhlí (Blücher GmbH)	
4	FOP (Belgie) - Vnější vrstva FR - Vnitřní vrstva – sférické AU	
5	SARATOGA (214-90750-101) - Vnější vrstva FR - Vnitřní vrstva – skleněná textilie - Vnitřní vrstva – sférické AU - Podšívka FR	

6 **CPP Garments (Švédsko-Blücher)**

Filtrační vrstva na aerosoly (polétavých částic chemických látek) a sférické AU.

- Vnější vrstva: 88% bavlna a 12% elastan
- Prostřední funkční vrstva 1: 100% polyuretan
- Prostřední funkční vrstva 2: 100% sférické AU (Blücher GmbH)
- Vnitřní vrstva-podšívka: 100% bavlna



7 **Paul-Boye**

- Vnější vrstva FR
- Vnitřní vrstva – PU pěna s AU laminovaná



8 **FOP - experimentální**

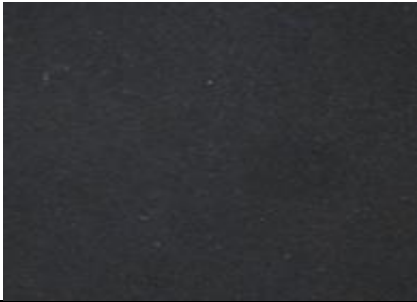
- Vnější vrstva nehořlavá – FR
- Vnitřní vrstva sférické AU a netkaná textilie jako aerosolový filtr



9 **FOP - experimentální**

- Vnější vrstva nehořlavá – FR
- Vnitřní vrstva adsorpční uhlíková textilie
- Podšívka tepelně izolační



10	Adsorpční uhlíková tkanina (Chemviron UK) • FLEXZORB FM10	
11	Adsorpční uhlíková laminovaná pletenina (Chemviron UK) • FLEXZORB FM K30 – D151 oboustranně laminovaná s polyesterovou tkaninou	
12	Adsorpční uhlíková pletenina • Jednostranně laminovaná AU pletenina polyesterovou tkaninou	
13	FIREPRO-experimentální prošev s ACF • FR- JC393 SINTEX (60% Modacryl, 37% BA, 3% Antistat) • ACF: TDS-9381- Nonwoven • FR - JC393 SINTEX	

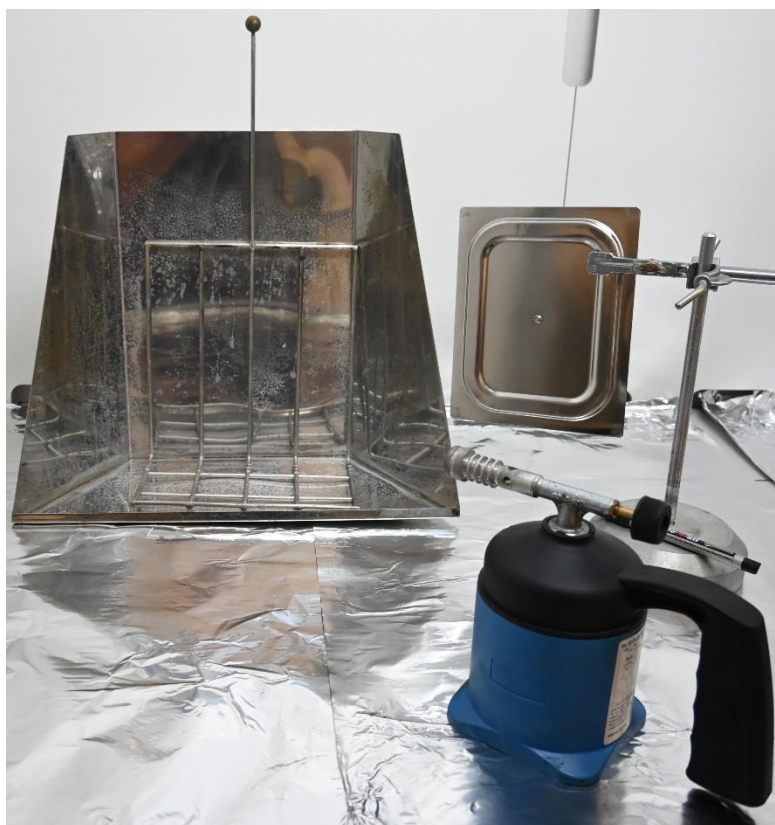
1.2. Test plamenem

Test pro šíření plamene byl proveden podle metody zkoušení [2] na vzorcích upevněných vertikálně na panelu v digestoři (viz. obr. 1).

Hořák propan-butanového plamene byl umístěn pod úhlem 30° k vertikální ose. Vzdálenost mezi okrajem ústí hořáku a testovaným vzorkem byl 20 mm. Plamen byl aplikován po dobu 10 sekund a byly zaznamenány následující informace:

- a) Zda plamen dosáhl horní hranice vzorku nebo jakékoli hranice
- b) Doba po vypálení
- c) Doba po žhavení
- d) Pokud se po žhavení rozšíří na rozpálenou oblast
- e) Odlupování /odtavování zbytků textilie
- f) **Zda vzniká díra/propal a v jaké vrstvě**

Ochranné oděvy typu FOP mají v současné době splňovat podmínky testu plamenem podle [2], kdy doba dohoření po odstranění zdroje plamene nesmí překročit 2 sekundy [3].



***Obrázek 1** Sestava na testy odolnosti vzorků plamenem*

2 VÝSLEDKY

Výsledky testů vzorků plamenem jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tabulka 2 Výsledky testů vzorků plamenem

Vzorek číslo	Popis výsledku	Obrázek
1	Vrstva je samozhášivá. Propal plamenem velmi rychlý.	
2	Vrstvy nejsou samozhášivé a velmi rychle zahoří a rozpadají se. Propal plamenem je velmi rychlý.	
3	Svrchní tkanina je samozhášivá. Vnitřní vrstva se sférickým AU tepelně degraduje společně s vrstvou podšívky.	
4	Snadné šíření plamene. Všechny vrstvy prohořely včetně nosné vrstvy se sférickým AU. Propal plamenem je velmi rychlý.	

- 5 Svrchní vrstva je samozhášivá.

Další vrstvou je tkanina se skelných vláken částečně omezující propal plamenem.

Další vrstva se sférickým AU je chráněna vrstvou se skelných vláken, která omezuje její degradaci s AU.

Při delším působení plamene 20 sekund dochází rovněž k roztavení sklených vláken.



- 6 Vrstvy nejsou samozhášivé. Nosná vrstva se sférickým AU rychle prohoří. Propal plamenem je velmi rychlý.

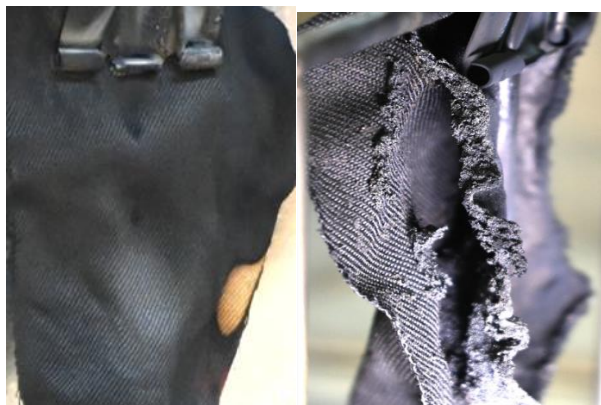
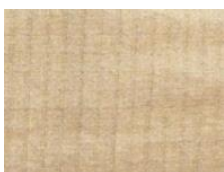


- 7 Vrstvy nejsou samozhášivé a vrstva polyuretanové pěny s částicemi AU plně vyhoří. Propal plamenem je velmi rychlý.



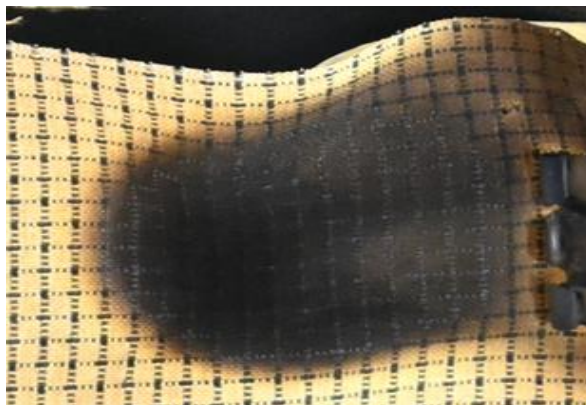
- 8 Vnější vrstva je nehořlavá a zuhelnatí.

Vnitřní vrstva se sférickým AU a podšívka hoří a roztápá se.

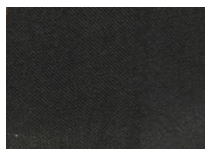


- 9 Horní vrstva je nehořlavá.
Vnitřní vrstva z adsorpční
uhlíkové pleteniny je
nehořlavá.
Tepelná a vrstva a podšívka

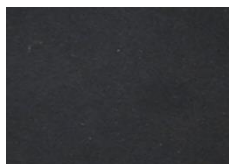
Plamen nezpůsobí propal
vrstvami.



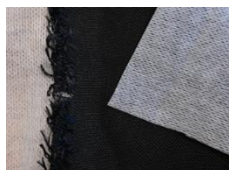
- 10 Adsorpční uhlíková tkanina
nebo pletenina je nehořlavá.
Při působení plamene se pouze
rozžhaví bez další degradace.
Plamen nezpůsobí propal.



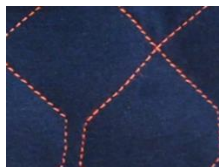
- 11 Laminační polyesterová vrstva
je samozhášivá, avšak se odtaví.
Adsorpční uhlíková pletenina je
nehořlavá.
Plamen nezpůsobí propal.



- 12 Laminační vrstva uhlíkové
pletenině snadno shoří.
Adsorpční uhlíková pletenina
nehoří.
Plamen nezpůsobí propal.



- 13 Svrchní tkaniny FR je samozhášivá, pouze zuhelnatí. Vnitřní adsorpční uhlíková pletenina není narušená. Nitě nešíří plamen. Plamen nezpůsobí propal.



3 DISKUSE

První generace filtračních ochranných převleků měli omezené vlastnosti proti hoření. Samozhášivé úpravy byly později zaměřeny převážně na vnější textilní vrstvu. Adsorpční uhlíkové kompozity ve formě netkané textile opatřené směsí částic aktivního uhlí s pojidlem, polyuretanové pěny s imobilizovanými částicemi aktivního uhlí, včetně nosných textilií se sférickým aktivním uhlím mají značně omezenou resistenci proti hoření zejména z důvodů nosných vrstev, které postrádají účinné FR úpravy proti hoření (viz. vzorky č. 1,2,3,4,6,7 a 8).

Výjimku tvoří vzorek č. 5 tvořený textilními vrstvami s úpravami proti hoření (FR) a zavedením druhé vnitřní vrstvy tkaniny se skelných vláken. Tato kombinace napomáhá k celkové odolnosti proti zápalným látkám a chrání vnitřní adsorpční vrstvu se sférickým AU. Nicméně při delší zátěži plamenem dochází k tavení skelných vláken a k vytváření propalu v této a dalších vrstvách.

Jedinou funkční odolnost proti intenzivní zátěži plamenem prokazují pouze vrstvy adsorpčních uhlíkových vláken ve formě tkané nebo pletené textilie (viz. vzorky č. 9, 10,11, 12 a 13). Adsorpční uhlíkové textilie vytváří jedinečnou funkční ochrannou bariéru proti průniku plamene a jeho šíření i ve srovnání s FR textiliemi na bázi aramidových/kevlarových vláken s vysokým bodem tavení. Adsorpční uhlíkové textilie i po intenzivní expozici plamenem si zachovávají své mechanické a adsorpční vlastnosti.

Vzorek č. 13 svým složením představuje nové řešení pro kombinovanou ochranu proti plamenům, sálavému teplu a toxickým/karcinogenním zplodinám v případě požárů nebo CBR kontaminace a zápalných prostředků.

4 ZÁVĚR

Z hlediska vynikajících vlastností adsorpčních uhlíkových textilií v kombinaci s jejich vysokou kinetikou sorpce toxických plynů a par, vysokou prodyšností a výjimečnou odolností proti plameni představují adsorpční uhlíkové textilie rozhodující komponentu pro konstrukci nové generaci FOP se zvýšenými ochrannými vlastnosti proti zápalným látkám typů termitů a ztužených hořlavín/napalmu, včetně ochrany uživatelů proti produktům hoření.

Další zaměření testování vlastností prodyšných ochranných materiálů by mělo být orientováno na jejich odolnosti proti přenosu tepla v případě expozice hořícím napalmem a návrhů na zlepšení kombinovaných ochranných vlastností pro osobní ochranné prostředky vojsk a IZS.

Použitá literatura

1. RAJIC, D. S., et al. *Thermal resistance testing of standard and protective filtering military garment on the burning napalm mixture*. Hem. Ind. 67 (6) 941–950 (2013).
2. ČSN EN ISO 15025:2022. *Ochranné oděvy-Ochrana proti teple a ohni-Metoda zkoušení pro omezené šíření plamene (část A)*.
3. CBRN FLIGHT SUITS For the Austrian Armed Forces. *NATO Support and Procurement Agency, LB General & Cooperative, Services Programme Version 1.4* 29 03.2022 6.3.9. *CBRN suits shall be tested for resistance to flame exposure according to ISO 15025:2016 (Procedure A)*.

Poděkování - podpora

Stat' byla součástí vývojových výstupů v rámci Programu bezpečnostního výzkumu MV ČR, SECTECH, projektu VB02000034.

OXIDICKÉ NANOČÁSTICE PRO ZPRACOVÁNÍ POUŽITÝCH DEKONTAMINAČNÍCH ROZTOKŮ NA BÁZI KYSELINY CITRONOVÉ

OXIDIC NANOPARTICLES FOR THE TREATMENT OF SPENT DECONTAMINATION SOLUTIONS BASED ON CITRIC ACID

Ota Fišera^{a*}, Jaroslav Kareš^a, Lenka Prouzová Procházková^b, Václav Čuba^b, Martin Vlk^b, Ján Kozempel^b, Kateřina Fialová^b, Martin Palušák^b, Kseniya Popovich^b, Jan Bárta^b

^a Vojenský výzkumný ústav, s. p., Veslařská 230, 637 00 Brno, Česká republika

^b Katedra jaderné chemie, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: fisera@vvu.cz, tel.: +420 543 562 168

Abstrakt

Pro zpracování použitých dekontaminačních roztoků na bázi kyseliny citronové byly testovány nanočástice oxidů kovů s vysokým měrným povrchem (NiO, NiO-TiO₂ a ZrO₂-TiO₂). Aktivní oxidické materiály byly připraveny fotoindukovanou syntézou (NiO, NiO-TiO₂) nebo hydrolytickou metodou (ZrO₂-TiO₂). Byl testován vliv koncentrace citronových aniontů, pH i povrchově aktivních látek na separaci vybraných radionuklidů (²⁴¹Am, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs a ⁹⁰Sr). Vysoké sorpční kapacity až do 9 mmol.g⁻¹ pro ¹³⁷Cs byly zjištěny pomocí sorpčních izotermních experimentů. Dynamické experimenty byly provedeny se simulovanými použitými dekontaminačními roztoky obsahujícími kyselinu citronovou. Eluce >85 % radionuklidového odpadu minerálními kyselinami nebo komplexotvornými činidly probíhala v 5–6krát menším objemu ve srovnání s použitým roztokem.

Klíčová slova: nanočástice, NiO-TiO₂, ZrO₂-TiO₂, radioaktivní odpad, kyselina citronová, dekontaminační roztok

Abstract

Nanoparticles of metal oxides with high specific surface area (NiO, NiO-TiO₂ a ZrO₂-TiO₂) were tested for the treatment of spent decontamination solutions based on citric acid. Active oxidic materials were prepared by photoinduced synthesis (NiO, NiO-TiO₂) or hydrolytic method (ZrO₂-TiO₂). The influence of concentration of citric anions, pH, and surfactants on the separation of selected radionuclides (²⁴¹Am, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr) was investigated. High sorption capacities up to 9 mmol.g⁻¹ for ¹³⁷Cs were found for composite sorbents based on the nanoparticles embedded in polyakrylonitrile. Elution of >85% radionuclide waste with mineral acids or complexing agents in 5-6times lower volume compared to treated spent solution was achieved.

Key words: Nanoparticles, NiO-TiO₂, ZrO₂-TiO₂, radioactive waste, citric acid, decontamination solution

ÚVOD

Použité dekontaminační (dezaktivací) roztoky představují velké objemy nebezpečného radioaktivního kapalného odpadu. Hlavními aktivními složkami dekontaminačních roztoků jsou obvykle komplexotvorná nebo chelatační činidla (kyselina citronová, kyselina šťavelová,

EDTA, NTA atd.) a povrchově aktivní látky. Tato práce se zaměřuje na dekontaminační roztoky na bázi kyseliny citronové. Koncentrace kyseliny citronové se liší v závislosti na účelu (dekontaminace těla nebo zařízení atd.) od 0,003 do 0,13 mol.l⁻¹ [1]. Dalšími testovanými aktivními složkami byly povrchově aktivní látky a chelatační činidla (EDTA).

Tato práce popisuje praktickou studii o zpracování použitých dezaktivizačních roztoků pomocí sorpce vybraných radionuklidů (²⁴¹Am, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs a ⁹⁰Sr) na povrchu kovových oxidických nanočástic. Testované radionuklidy jsou zástupci štěpných produktů, aktinoidů, alfa a beta zářičů a představují nejhojnější radionuklidy, které by se mohly objevit při radiačních událostech.

Perspektivní sorpční materiály by měly být dostatečně chemicky a radiačně stabilní. Mezi slibné sorpční materiály patří nanočástice oxidů kovů s vysokým specifickým povrchem. Vyznačují se vysokou adsorpční kapacitou nejen vůči studovaným radionuklidům, ale také vůči těžkým kovům a dalším znečišťujícím látkám [2–5]. V tomto ohledu je nejvíce studovaným oxidem TiO₂. NiO je dalším perspektivním nanosorbentem, ačkoli není tak tepelně ani chemicky stabilní a je mírně rozpustný při kyselém pH [5–7]. Vícesložkové nanooxidy mohou být také novými a velmi slibnými sorbenty [8]. Synergický efekt na adsorpci Cs nebo Sr byl pozorován u kompozitního materiálu NiO/TiO₂ [2]. V této práci byly testovány sorpční vlastnosti nanokrystalického NiO, NiO-TiO₂ a ZrO₂-TiO₂. Z vybraných aktivních materiálů byly připraveny kompozitní sorbenty obsahující 70 % aktivní složky v inertní polymerní matici polyakrylonitrilu jako příklad praktického využití.

Výsledky výzkumu by měly být užitečné pro vývoj metody pro in situ zpracování použitých dekontaminačních roztoků a snížení objemu odpadu přímo v terénu. Promývací kapaliny se shromažďují na místě havárie a musí být nějakým způsobem zpracovány, buď přímo na místě nebo přepraveny jako radioaktivní odpad do příslušného zařízení pro zpracování. Použité sorbenty jsou určeny k opakovanému použití po jejich regeneraci desorpcí radionuklidů.

1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Syntéza nanočástic binárního oxidu ZrO₂-TiO₂ byla provedena hydrolytickou metodou dle [9]. Nanokrystalické materiály na bázi niklu, NiO, NiO-TiO₂, byly připraveny fotoindukovanou metodou [8]. Aktivní složky byly připraveny v suché, práškové formě. Každý kompozitní sorbent sestával ze 70 % suché, práškové aktivní složky zabudované do polyakrylonitrilové matrice (PAN), připravené dle [10]. Připravené sférické částice byly prosety a byla použita frakce o velikosti 0,1–0,3 mm.

Simulované použité dekontaminační roztoky obsahovaly 0,01 mol.l⁻¹ kyseliny citronové. Do simulovaných dekontaminačních roztoků byly přidány alikvotní podíly 1 mol.l⁻¹ roztoku NaOH s 0,01 mol.l⁻¹ dihydrogencitrátu sodného (NaH₂C₆O₇) pro úpravu pH na hodnoty 2, 4, 6, 9 nebo 12. Připravený pufrovací roztok byl poté značen radionuklidy na objemovou aktivitu cca 1 kBq.l⁻¹ a koncentraci nosiče cca 1×10⁻⁸ mol.l⁻¹. Všechny použité chemikálie byly analytické kvality.

Zásobní roztoky radionuklidů byly dodány společností Eurostandard, s. r. o. (Česká republika). Zásobní roztoky byly upraveny na objem 50 ml pomocí 0,1 mol.l⁻¹ HNO₃ nebo HCl. Zásobní roztok ²⁴¹Am obsahoval 0,22 MBq.ml⁻¹ a 2,4×10⁻⁶ mol.l⁻¹ Sm(NO₃)₃. Ostatní zásobní roztoky obsahovaly 1 MBq.ml⁻¹ a cca. 5×10⁻⁶ mol.l⁻¹ nosiče (CsCl, CoCl₂, Sr(NO₃)₂ a Y(NO₃)₃).

Vyhodnocení specifického povrchu práškových vzorků nanosorbentů metodou jednobodového BET bylo provedeno na přístroji Monosorb MS-22 (Quantachrome Instruments) za použití směsi obsahující 30 % N₂ a 70 % He jako nosný plyn.

Pro studium sorpčních vlastností sorbentů byl použit následující postup. Množství vlhkého kompozitního sorbentu odpovídající 40 mg suchého sorbentu bylo uvedeno do kontaktu s 10 ml simulovaného dekontaminačního roztoku ($V/m = 250 \text{ ml.g}^{-1}$) v 50ml polyethylenové lahvi po dobu 2 hodin. Směs byla třepána na lineární laboratorní třepačce IKA 260 HS (IKA, USA) při 150 ot.min^{-1} . Alikvotní podíly o objemu 7 ml byly přefiltrovány přes filtrační špičku se skleněným mikrovláknem do zkumavky. Následně byl odebrán 4ml alikvotní podíl přefiltrovaného roztoku k měření. Pro měření rovnovážného pH přímo ve zbytku roztoku byl použit digitální pH metr GPRT 1400 AN (Greisinger electronic, Německo). Jako referenční vzorek byly použity 4ml vzorky vodné fáze před kontaktem fází. Měření aktivity referenčního vzorku (A_0) a vzorků (A) byla provedena pomocí HPGe detektoru a multikanálového analyzátoru Inspector 2000 (Canberra, USA) pro ^{241}Am , ^{60}Co a ^{137}Cs . Aktivita $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ byla měřena pomocí Čerenkovova záření na kapalinovém scintilačním počítači Triathler (Hidex, FIN). Některé vedlejší experimenty byly provedeny s čistým nanosorbentem ve formě prášku při stejném poměru aktivní složky a vodné fázi. K separaci fází byla použita centrifuga CompactStar CS4 (VWR, USA) po dobu 5 minut při 3400 RCF (6000 ot.min^{-1}).

Hmotnostní rozdělovací koeficient (D_g) byl vypočten jako:

$$D_g = \frac{A_0 - A}{A} \times \frac{V}{m}$$

Minimální detekovatelná hodnota koeficientu ($D_{g,\min}$) byla odhadnuta jako:

$$D_{g,\min} = 3 \times \sqrt{2/A_0} \times \frac{V}{m}$$

Sorpční kapacita kompozitních sorbentů byla stanovena metodou sorpčních izoterm. Bylo použito experimentální uspořádání pro studium sorpčních vlastností sorbentů a koncentrace nosiče od $5 \times 10^{-8} \text{ mol.l}^{-1}$ do $5 \times 10^{-1} \text{ mol.l}^{-1}$. Kapacita sorbentu q (pro danou koncentraci nosiče) a rovnovážná koncentrace nosiče v roztoku c_{eq} byly odhadnuty jako:

$$q = c_0 \cdot \frac{V}{m} \cdot \left[1 - \frac{A}{A_0} \right]$$

$$c_{eq} = c_0 \cdot \frac{A}{A_0},$$

kde c_0 je počáteční koncentrace nosiče, ostatní veličiny definované výše. Maximální dosažená hodnota kapacity sorbentu byla označena jako hmotnostní sorpční kapacita.

Dynamické experimenty byly provedeny s kolonkou (Supelco, USA) o objemu 1 ml. Do prázdné SPE zkumavky byla vložena spodní frit, vodná suspenze sorbentu a horní frit. Sorbent byl částečně stlačen umístěním víčka. Objem aktivní vrstvy BV byl přibližně 0,6 ml. Kapalná fáze byla čerpána protiproudým způsobem peristaltickým čerpadlem PCD 1082 (Kouřil, s. r. o., ČR) s nastavitelným průtokem. Připravená sorpční kolona byla kondicionována 0,01 M citrátovým pufovacím roztokem. Eluát byl v pravidelných časových intervalech sbírán do předem zvážených lahvíček. Hmotnost (objem) frakce byla stanovena zvážením lahvíčky. Následně byl odebrán 1 ml alikvotní podíl pro měření (A_i). Ze vstupního roztoku byl odebrán a změřen 1ml alikvotní podíl jako referenční vzorek (A_0).

Sorpční a eluční vlastnosti sorbentu v koloně byly charakterizovány veličinami Průnik (%) a Eluce (%) podle vztahů:

$$Průnik = \frac{A_i}{A_0} \cdot 100$$

$$Eluce = \frac{A_i \cdot V_e}{A_{sum}}$$

$$A_{sum} = \sum_{i=1}^n [A_0 \cdot V_i \cdot (100 - Průnik)/100],$$

kde V_e je objem eluční frakce, V_i je objem sorpční frakce a A_{sum} je celková sorbovaná aktivita. Ostatní veličiny jsou definovány výše.

Eluce byla testována minerálními kyselinami (HCl, HNO₃) nebo komplexotvornými činidly – nitrilotriacetátem sodným (Na₃NTA) a kyselinou citronovou.

Čistý nanosorbent ve formě prášku byl použit pro stanovení kinetiky sorpce a účinků povrchově aktivních látek a dalších aktivních složek dezaktivizačních roztoků. K vyhodnocení kinetiky sorpce byla použita veličina retence R (%) vypočtená jako:

$$R = 100 \times \frac{A_0 - A}{A_0}$$

Kinetika sorpce byla studována pouze pro ²⁴¹Am při pH = 8,3 (příprava vzorku popsána výše), ale s proměnnou dobou kontaktu. Dále byl studován vliv dekontaminační směsi Neodekont (MPD plus, s. r. o., Česká republika) obsahující oxid křemičitý, bentonit, trifosfát pentasodný, TEA-dodecylbenzensulfonát, kokamidopropylbetain, kokamid MEA, kokamid DEA, kyselinu citronovou, pentanát pentasodný, kokoát sacharózy, benzylalkohol, methylišothiazolinon, methylchlorisothiazolinon a Cl 42090. Druhým testovaným dekontaminačním roztokem byla směs 15 ml značeného citrátového pufovacího roztoku, 0,6 g detergentu AES 253 (26% roztok aniontové povrchově aktivní látky parethsulfátu sodného C12–15, ENASPOL, a. s., Česká republika) a 0,45 g Na₂EDTA, tj. 1% hm./hm. roztok detergentu a 3% roztok Na₂EDTA. Vliv koncentrace citrátových aniontů v roztoku byl také studován pro ⁹⁰Sr a pro koncentrace citrátových aniontů 0,06 a 0,14 mol.l⁻¹ (k 15 ml značených pufovacích roztoků s počáteční koncentrací citrátu 0,01 mol.l⁻¹ bylo přidáno 0,147 g a 0,382 g Na₃H₅C₆O₇).

2 VÝSLEDKY A DISKUZE

2.1. Charakterizace aktivních složek

Studované oxidy kovů byly přednostně vybrány pro svou amorfnní povahu, u které se dá očekávat velký specifický povrch a tím i velká afinita pro sorpci radionuklidů. V případě připravených oxidů kovů ve formě nanočástic je specifický povrch uveden v tabulce 1. Nejvyšší hodnota specifického povrchu byla zjištěna pro ZrO₂-TiO₂, která je také vyšší, než je obecně uváděno v literatuře [11].

Tabulka 1 Specifický povrch aktivních složek ve volné, práškové formě

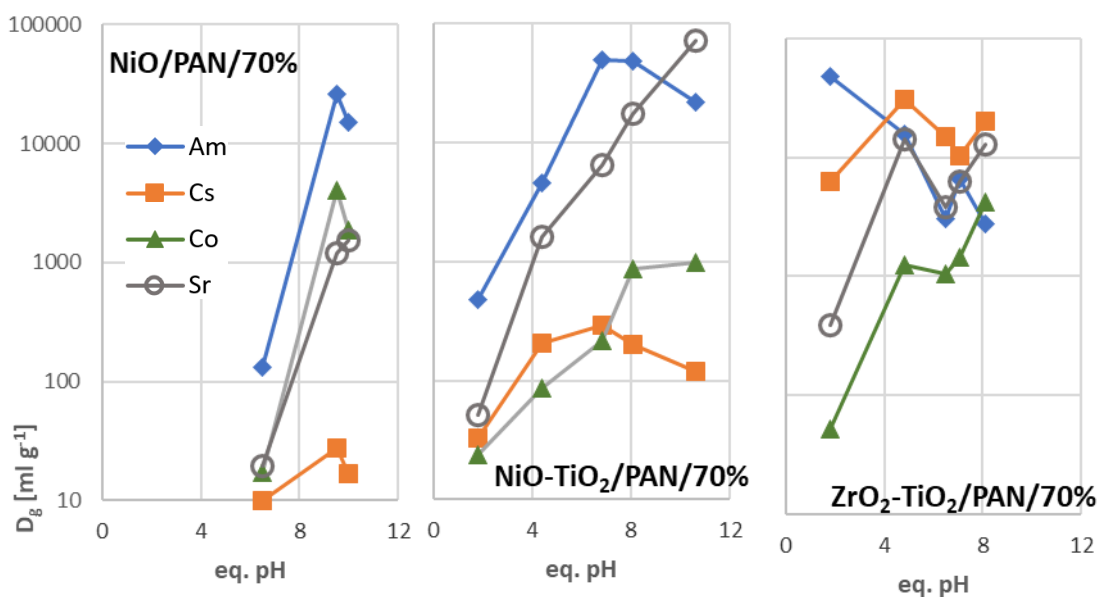
Aktivní složka	Specifický povrch [m ² .g ⁻¹]
ZrO ₂ -TiO ₂	497
NiO	172
NiO-TiO ₂	85

2.2. Statické sorpční vlastnosti

Hlavní sorpční charakteristika, závislost D_g na pH, pro kompozitní sorbenty je znázorněna na obr. 1. Sorbent $ZrO_2-TiO_2/PAN/70\%$ dosáhl nejvyšších hodnot D_g pro většinu testovaných radionuklidů. Pouze pro ^{90}Sr při $pH > 10$ dosáhl $NiO-TiO_2/PAN/70\%$ vyšších hodnot D_g . Hodnoty D_g pro $NiO/PAN/70\%$ jsou obecně nižší, pouze pro ^{241}Am a ^{60}Co při $pH \approx 9$ jsou srovnatelné. $NiO/PAN/70\%$ byl testován pouze v rozsahu pH 6–12 kvůli své rozpustnosti při nižších hodnotách pH [7].

Obecně platí, že hodnoty D_g se zvyšují s pH až do $pH \approx 8$, což je v souladu se závislostí povrchového náboje nanočástic na pH . Povrchový náboj částic se obvykle mění se zvyšujícím se pH z kladného na záporné, což zvyšuje afinitu radionuklidů. Závislosti podobného tvaru jsou obvyklé pro sorpci kovových látek na nanočásticích [12–13].

V souvislosti s pH byla také pozorována změna rovnovážných hodnot pH vzhledem k počátečnímu pH . Nejvýraznější je to u sorbentu $ZrO_2-TiO_2/PAN/70\%$. Jak je vidět na Obr. 1, nejvyšší rovnovážné pH v závislostech pro ZrO_2-TiO_2 je přibližně 8, ačkoli počáteční pH pufovacího roztoku bylo pro všechny sorbenty stejné ($pH = 11,5$). Tento jev je obvyklý pro suspenze oxidů kovů [7] a souvisí s bodem nulového náboje (PZC, point of zero charge). Hrubý odhad PZC pro ZrO_2-TiO_2 přibližně 7 byl proveden podle závislostí D_g . Tato hodnota je v rozmezí uváděného PZC pro ZrO_2 a TiO_2 [14–15]. Hodnota PZC závisí také na velikosti částic a způsobu přípravy. Na druhou stranu některé hodnoty D_g klesají při vyšším pH u jiných sorbentů, a to i přes očekávaný negativní náboj částic. To naznačuje, že sorpce je složitější jev a velký vliv na sorpci má také speciace radionuklidů.



Obrázek 1 Závislost sorpce ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs a ^{90}Sr na pH pro kompozitní sorbenty $NiO/PAN/70\%$, $NiO-TiO_2/PAN/70\%$ a $ZrO_2-TiO_2/PAN/70\%$;

vodná fáze: 0,01 M citrátový pufr, nosná konc. cca 1×10^{-8} M, $V/m = 250$ ml.g⁻¹, $D_{g,min} = 10$ ml.g⁻¹

Brynych a kol. [2] také prokázali nejvyšší sorpci (přes 95 %) pro Cs, Eu a Sr u nanomateriálu NiO/TiO_2 . Pro srovnání, sorpce Eu zůstává na ~99 %, ale pro Sr a Cs bylo dosaženo pouze ~40 % se sorbentem TiO_2 . Nižší sorpce Cs ve srovnání se Sr, Co a Eu na biopolymerech modifikovaných TiO_2 byla také prezentována Pospěchovou a kol. [12]. Podobných výsledků, ve srovnání se sorpčními vlastnostmi NiO , bylo dosaženo u biopolymerů modifikovaných NiO , vysoká sorpce pouze pro Eu a při vysokých hodnotách pH i pro Co.

Byl orientačně testován vliv sušení kompozitních sorbentů (40 °C). Sušení sorbentu způsobuje významný desetinásobný pokles hodnot D_g . Sorpce radionuklidů je pravděpodobně snížena obtížnou dosažitelností aktivní složky v objemu částice sorbentu.

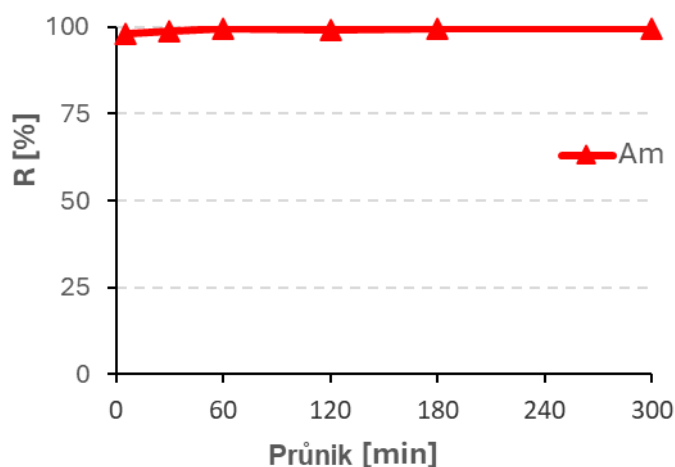
Sorpční kapacity byly většinou stanoveny pro ^{137}Cs . Pouze pro NiO/PAN/70% byla sorpční kapacita stanovena pro ^{60}Co , ale pro soubor koncentrací s maximem při $5 \times 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}$, nejvyšší koncentraci bez srážení nosiče, proto by očekávaná maximální kapacita mohla být vyšší.

Hmotnostní sorpční kapacity testovaných kompozitních sorbentů jsou uvedeny v tabulce 2. Stanovené sorpční kapacity pro sorbenty NiO-TiO₂/PAN/70% a ZrO₂-TiO₂/PAN/70% jsou vyšší než pro konvenční kationtoměniče, jako jsou DOWEX 88 nebo Amberjet 1000 [16–17]. Ty mají kapacitu přibližně $2,5 \text{ meq.g}^{-1}$, což odpovídá kapacitě ^{137}Cs v mmol.g^{-1} . Stanovená kapacita je také vyšší nebo srovnatelná s širokou škálou anorganických kationtoměničů [18–19].

Tabulka 2 Hmotnostní sorpční kapacity kompozitních sorbentů NiO/PAN/70%, NiO-TiO₂/PAN/70% a ZrO₂-TiO₂/PAN/70% (frakce kuliček 0,1–0,3 mm)

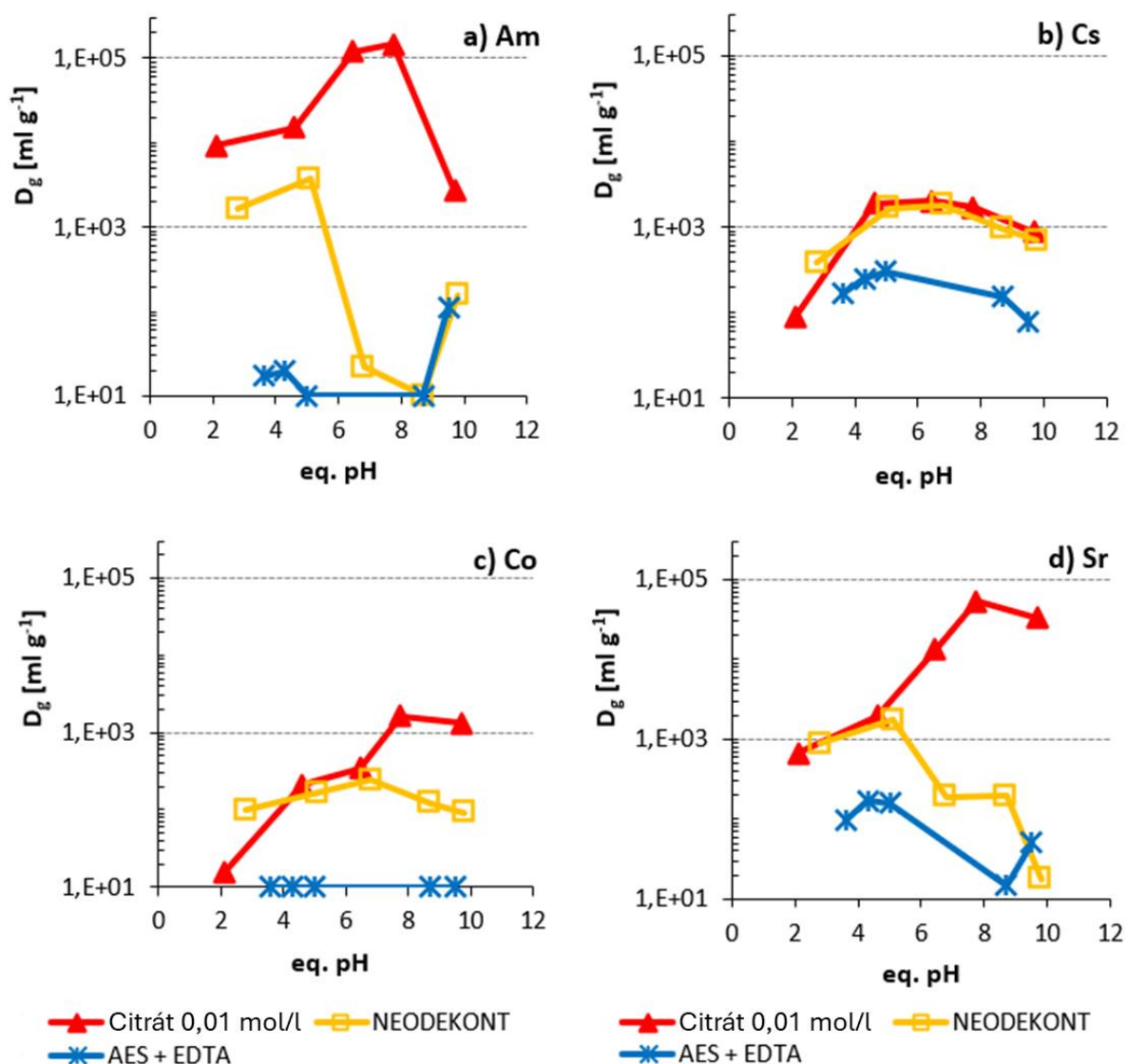
Sorbent	Hmotnostní sorpční kapacita [$\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$]	Poznámky
NiO/PAN/70%	>1	^{60}Co , pH = 7
NiO-TiO ₂ /PAN/70%	8,7	^{137}Cs , pH = 4
ZrO ₂ -TiO ₂ /PAN/70%	6,8	^{137}Cs , pH = 4

Další sorpční vlastnosti byly zkoumány pouze pro sorbent NiO/TiO₂ ve formě prášku. Kinetika absorpce byla studována při pH = 8,3, kdy bylo dosaženo nejvyšší hodnoty D_g pro ^{241}Am . Naměřená závislost retence na době kontaktu fází je znázorněna na Obr. 2. Retence byla velmi rychlá, protože po 5 minutách kontaktování fází byla retence více než 98 %; rovnováhy (99,4 %) bylo dosaženo za 1 hodinu. Retence byla konstantní (v rámci experimentální nejistoty) až po dobu 5 hodin kontaktu. Lze předpokládat, že pozorovaná rychlá kinetika je způsobena sorpční formou nanočástic s vysokým specifickým povrchem. Podobně byla rychlá kinetika zkoumána pro sorpci Am na TiO₂ [20]. Ve studii byl prezentován silný negativní vliv vysoké koncentrace Am (vysoké povrchové nasycení) na rychlost sorpce.



Obrázek 2 Kinetika retence ^{241}Am v závislosti na době kontaktu fází; vodná fáze: 0,01 mol.l⁻¹ citrátový pufr, nosná konc. cca $1 \times 10^{-8} \text{ mol.l}^{-1}$, V/m = 250 ml.g⁻¹

Dekontaminační roztoky nemusí obsahovat pouze kyselinu citronovou, proto byla testována dekontaminační směs Neodekont a roztok povrchově aktivní látky s příměsí chelatačního činidla Na_2EDTA , jejichž vliv na hodnoty D_g je znázorněn na Obr. 3. Zejména druhý uvedený roztok s EDTA vykazuje silný negativní vliv na sorpci všech testovaných radionuklidů. Dekontaminační směs Neodekont v roztoku vykazuje malý pokles a jeho vliv je minimální zejména při nižším pH. To by mohlo být způsobeno tím, že 1% roztok Neodekontu obsahuje nižší koncentrace povrchově aktivních látek a chelatačních činidel. Ve srovnání s tím se 3% roztok EDTA rovná koncentraci cca $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$. To je desetkrát vyšší než koncentrace citrátů v použitém pufru.



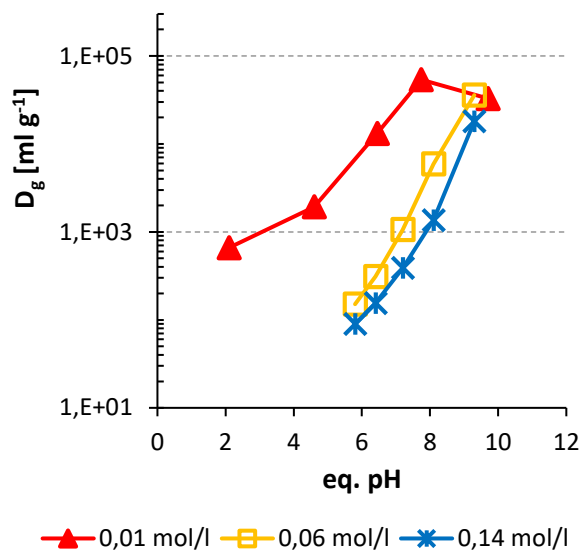
Obrázek 3 Vliv povrchově aktivních látek a chelatačních činidel na sorpci

a) ^{241}Am , b) ^{137}Cs , c) ^{60}Co a d) ^{90}Sr pro NiO/TiO_2 ;

vodná fáze: $0,01 \text{ mol.l}^{-1}$ citrátový pufr, konc. nosiče cca $1 \times 10^{-8} \text{ mol.l}^{-1}$, $V/m = 250 \text{ ml.g}^{-1}$, $D_{g,\min} = 10 \text{ ml.g}^{-1}$

Vysoká koncentrace EDTA byla jedním z důvodů pro studium vlivu koncentrace citrátu na hodnoty D_g . Dalším důvodem byl rozsah koncentrací kyseliny citronové používané v dekontaminačních roztocích podle účelu [1]. Jak je vidět na Obr. 4, hodnoty D_g ^{90}Sr klesají se zvyšující se koncentrací citrátů, pouze při $\text{pH} > 9$ je vliv citrátů minimální. Závislosti D_g na

pH silně rostou při vyšších koncentracích citrátů. Jak se očekávalo, závislost D_g na koncentraci citrátu v logaritmickém grafu by měla být klesající přímkou v důsledku rostoucího podílu citrátových komplexů. Dříve byla publikována nezávislost sorpce Eu a Sr na iontové síle (roztok NaClO_4) [2], ale naše výsledky ukazují pokles sorpce Sr z ~99 % na 60 % v citrátovém roztoku při $\text{pH} = 7,2$. Sorpce je pravděpodobně více ovlivněna speciací citrátových komplexů než iontovou silou roztoku. Ve srovnání se závislostí pro ^{90}Sr na Obr. 3 by se dalo předpokládat, že hlavní příčinou klesajícího D_g je přítomná povrchově aktivní látka namísto chelatačního činidla. Je zajímavé, že při vyšších koncentracích citrátu byly hodnoty pH v rovnováze silně posunuty od počátečního pH. Toto chování nebylo pozorováno pro NiO/TiO_2 při nižší koncentraci citrátu (viz Obr. 1).

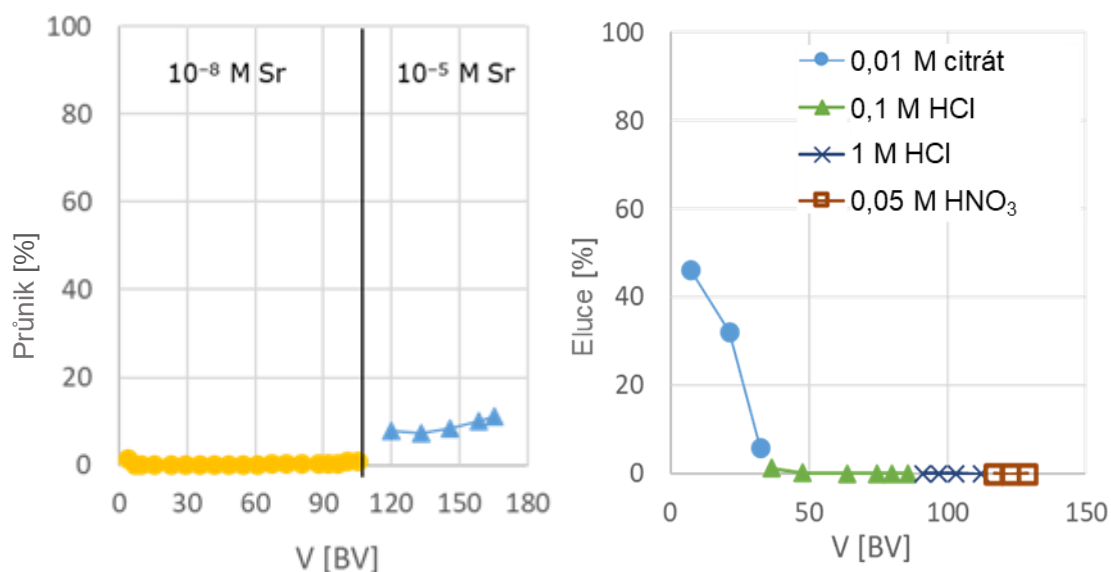


Obrázek 4 Vliv koncentrace citrátu na sorpci ^{90}Sr pro NiO/TiO_2 ; vodná fáze: citrátový pufr 0,01 mol.l⁻¹, nosná konc. cca 1×10^{-8} mol.l⁻¹, $V/m = 250 \text{ ml.g}^{-1}$, $D_{g,\text{min}} = 10 \text{ ml.g}^{-1}$

2.3. Dynamické experimenty

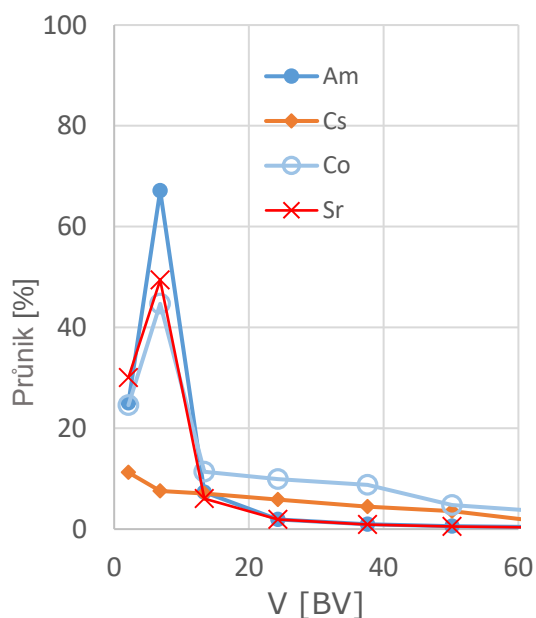
Jak je patrné z obr. 1, optimální hodnota pH pro sorpci většiny testovaných radionuklidů je v alkalické oblasti a vzhledem k zamýšlenému použití $\text{NiO/PAN/70\%}$ v kombinovaném systému byly testovány vyšší hodnoty v rozmezí pH 8–10.

Při nízké koncentraci nosiče byla pozorována velmi vysoká sorpce s nízkým průnikem (většinou $\leq 0,5 \%$) (viz obr. 5). Při o 3 řády vyšší koncentraci dosáhl průnik 7 %. Po sorpci byla testována eluce „neagresivním“ roztokem, citrátovým pufrům o koncentraci 0,01 mol.l⁻¹ ($\text{pH} = 2$). Bylo dosaženo celkové eluce 84 %. Žádný jiný „agresivní“ eluční roztok (0,1M a 1M HCl , 0,05M HNO_3) nebyl schopen eluovat zbytek absorbovaného radionuklidu.



Obrázek 5 Sorpce (vlevo) a eluce (vpravo) ^{90}Sr na kompozitním sorbentu $\text{NiO-TiO}_2/\text{PAN}/70\%$; vodná fáze: 0,01 M citrátový pufr, $\text{pH} \approx 8-10$; $\text{BV} = 0,6 \text{ ml}$; $v = 6$ a 12 BV.h^{-1}

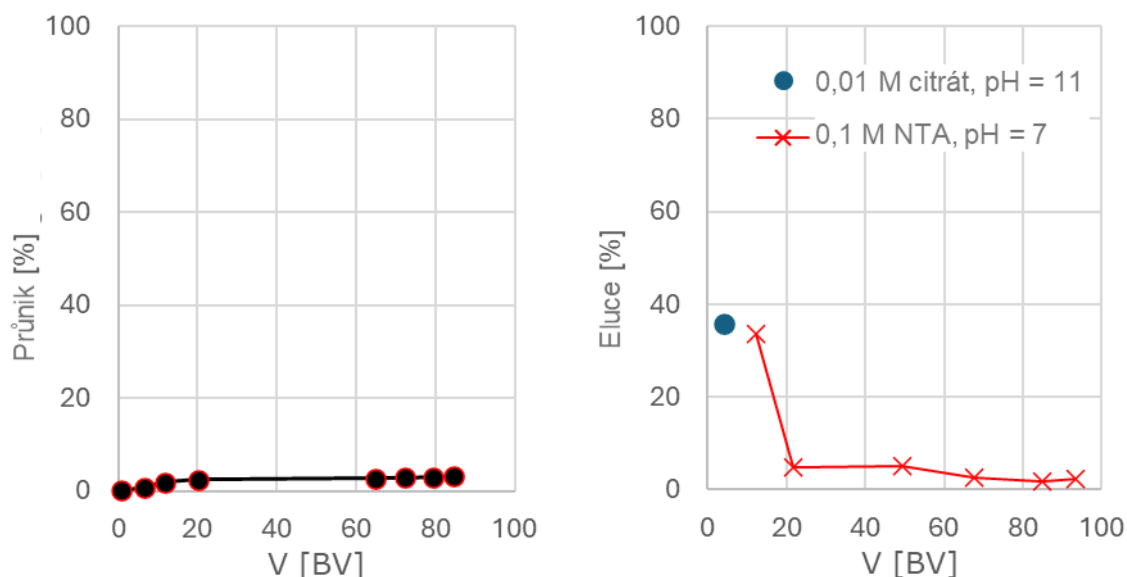
Vzhledem k rozpustnosti NiO při nižších hodnotách pH je nutná i možnost eluce alkalickými roztoky. Za tímto účelem byla testována eluce pomocí komplexotvorného činidla. Chelatační činidla mají vysokou afinitu ke kovovým iontům a umožňují přípravu alkalického roztoku. Byla testována eluce pomocí Na_3NTA z kolony se sorbentem $\text{NiO}/\text{PAN}/70\%$ po sorpci směsi radionuklidů (viz obr. 6). Při velmi vysokém průtoku bylo eluováno 90 % ^{90}Sr a přibližně 100 % ^{241}Am a ^{60}Co , pouze ^{137}Cs dosáhl eluce 40 %, pravděpodobně kvůli nízkým komplexotvorným vlastnostem cesia.



Obrázek 6 Eluce radionuklidů ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs a ^{90}Sr z kompozitního sorbentu $\text{NiO}/\text{PAN}/70\%$; eluce: 0,05 M Na_3NTA , $\text{pH} \approx 11$; $v = 25 \text{ BV.h}^{-1}$

Na závěr byl testován kombinovaný systém všech tří sorbentů v kolonách zapojených do série (dle [21]) (viz Obr. 7). Jako matrice pro simulaci reálných roztoků byla použita voda

z vodovodního řadu. Dobré sorpce (průlom $\approx 3\%$) bylo dosaženo za podmínek s nižší koncentrací citrátu ($0,003\text{ mol.l}^{-1}$) a $\text{pH} = 10$. V tomto případě fungovala jako eluční roztok vyšší koncentrace citrátu. Eluce 90 % byla dosažena v kombinaci s Na_3NTA .



Obrázek 7 Sorpce a eluce ^{60}Co z vody z vodovodního řadu na kompozitním modulu $\text{NiO/PAN/70\%}$ + $\text{NiO-TiO}_2/\text{PAN/70\%}$ + $\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2/\text{PAN/70\%}$; vodná fáze: $0,003\text{ M}$ citrátový pufr, $\text{pH} \approx 10$; $\text{BV} = 0,6\text{ ml}$; $v = 6\text{--}12\text{ BV.h}^{-1}$

ZÁVĚR

Kompozitní sorbenty obsahující oxidické nanoprášky NiO , NiO-TiO_2 a $\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2$ v polakrylonitrilové matrici byly studovány na absorpci ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs a ^{90}Sr ze simulovaných použitých dekontaminačních roztoků obsahujících kyselinu citronovou. Nejvyšších hodnot D_g ($10^5\text{--}10^6\text{ ml.g}^{-1}$) pro testované radionuklidy bylo většinou dosaženo se sorbentem $\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2/\text{PAN/70\%}$ v přítomnosti citrátu o koncentraci $0,01\text{ mol.l}^{-1}$. Obecně platí, že nejlepší sorpční podmínky jsou v alkalickém rozsahu pH . Naměřené hmotnostní sorpční kapacity pro kompozitní sorbenty ($7\text{--}9\text{ mmol.g}^{-1}$) jsou vyšší nebo srovnatelné s širokou škálou anorganických nebo konvenčních kationtoměničů. Sorpci radionuklidů silně ovlivňuje zejména přítomnost povrchově aktivních látek a také vyšší koncentrace komplexotvorných činidel. Kinetika absorpce byla, jak se očekávalo, vzhledem k aktivní složce ve formě nanočástic, velmi rychlá. Sorpce radionuklidů během dynamických experimentů byla vysoká ($90\text{--}99\%$). Eluce absorbovaných radionuklidů je možná roztoky kyselin nebo alkalickými roztoky komplexotvorných činidel (kyselina citronová, Na_3NTA). Bylo dosaženo eluce $80\text{--}100\%$, nicméně u cesia byla pozorována nekvantitativní eluce (40%).

Stabilita aktivních složek a testování účinku povrchově aktivní látky jako složky dekontaminačních roztoků mohou být cílem dalšího studia v této oblasti.

Použitá literatura

1. *Dekontaminace radioaktivních látek, Bojový řád jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu*. [online] [cit. 17. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.hzscr.cz/soubor/l9-dekontaminace-ral-pdf.aspx>.

2. BRYNYCH, V., POSPĚCHOVÁ, J., PROCHÁZKOVÁ, L., ČUBA, V., SZATMÁRY, L. *Sorption of Cs(I), Sr(II) and Eu(III) on Modified Nickel Oxide*. Nanocon 2014 conference proceedings. [online] [cit. 17. 3. 2017]. Dostupné z: <http://nanocon2014.tanger.cz/files/proceedings/20/reports/3335.pdf>.
3. AI, L., ZENG, Y. *Hierarchical porous NiO architectures as highly recyclable adsorbents for effective removal of organic dye from aqueous solution*. Chem Eng J. 215–216, s. 269–278. 2012.
4. ENGATES, K. E., SHIPLEY, H. J. *Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion*. Environ Sci Pollut Res Int. 18, s. 386–395. 2011.
5. MAHMOOD, T., SADDIQUE, M., NAEEM, A. *Cation exchange removal of Cd from aqueous solution by NiO*. J Hazard Mater. 185, s. 824–828. 2011.
6. HERNÁNDEZ, N., MORENO, R., SÁNCHEZ-HERENCIA, A. J., FIERRO, J. L. G. *Surface Behavior of Nickel Powders in Aqueous Suspensions*. J Phys Chem, B 109, s. 4470–4474. 2005.
7. MAHMOOD, T., SADDIQUE, M. T., NAEEM, A., WESTERHOFF, P., MUSTAFA, S., ALUM, A. *Comparison of Different Methods for the Point of Zero Charge Determination of NiO*. Ind Eng Chem Res. 50, s.10017–10023. 2011.
8. ČUBA, V., PROCHÁZKOVÁ, L., BÁRTA, J., VONDRÁŠKOVÁ, A., PAVELKOVÁ, T., MIHÓKOVÁ, E., JARÝ, V., NIKL, M. *UV radiation: a promising tool in the synthesis of multicomponent nano-oxides*. J Nanopart Res, 2014. DOI 10.1007/s11051-014-2686-6.
9. NEPPOLIAN, B., WANG, Q., YAMASHITA, H., CHOI, H. *Synthesis and Characterization of TiO₂-ZrO₂ Binary Oxide Semiconductor Nanoparticles: Application and Interparticle Electron Transfer Process*. Appl Catal A. 333, s. 264–271. 2007.
10. ŠEBESTA, F. *Composite sorbents of inorganic ion-exchangers and polyacrylonitrile binding matrix. I. Methods of modification of properties of inorganic ion-exchangers for application in column packed beds*. J Radioanal Nucl Chem. 220, s.77–88. 1997.
11. KUBIAK, A., SIWIŃSKA-CIESIELCZYK, K., JESIONOWSKI, T. *Titania-Based Hybrid Materials with ZnO, ZrO₂ and MoS₂: A Review*. Materials (Basel) 11, s. 2295. 2018. DOI 10.3390/ma11112295.
12. POSPĚCHOVÁ, J., BRYNYCH, V., ŠTENGL, V., TOLASZ, J., LANGECKER, J. H., BUBENÍKOVÁ, M., SZATMÁRY, L. *Polysaccharide biopolymers modified with titanium or nickel nanoparticles for removal of radionuclides from aqueous solutions*. J Radioanal Nucl Chem. 2015. DOI 10.1007/s10967-015-4414-9.
13. REN, X., YANG, S., TAN, X., CHEN, C. H., WANG, X. *Investigation of radionuclide ⁶⁰Co(II) binding to TiO₂ by batch technique, surface complexation model and DFT calculations*. Sci China Chem. 2012. DOI 10.1007/s11426-012-4694-7.
14. KOSMULSKI, M. *The significance of the difference in the point of zero charge between rutile and anatase*. Adv Colloid Interfac. 99(3), s. 255–264. 2002. DOI 10.1016/S0001-8686(02)00080-5.

15. KOSMULSKI, M. *The Significance of the Points of Zero Charge of Zirconium (Hydr)Oxide Reported in the Literature*. J Disper Sci Technol. 23(4), s. 529–538. 2002. DOI 10.1081/DIS-120014021.
16. DOWEX 88 MB. Product information. Dow Chemical Company. [online] [cit. 25. 5. 2022]. Dostupné z: [https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dowex%2088%20MB%20\(H\).pdf](https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dowex%2088%20MB%20(H).pdf).
17. AMBERJET 1000 H. Product data sheet. Rohm and Haas Company. [online] [cit. 25. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Amberjet-1000-H-L.pdf>.
18. WOŁOWICZ, A., WAWRZKIEWICZ, M., HUBICKI, Z., SIWIŃSKA-CIESIELCZYK, K., KUBIAK, A., JESIONOWSKI, T. *Enhanced removal of vanadium(V) from acidic streams using binary oxide systems of TiO₂-ZrO₂ and TiO₂-ZnO type*. Sep Purif Technol. 280. 2022. DOI 10.1016/j.seppur.2021.119916.
19. NAUSHAD, M. *Inorganic and Composite Ion Exchange Materials and their Applications*. Ion Exchange Letters. 2, s. 1–14. 2009. [online] [cit. 25. 5. 2022]. Dostupné z: <http://iel.vscht.cz/articles/1803-4039-02-0001.pdf>.
20. GRACHEVA, N. N., ROMANCHUK, A. Y., SMIRNOV, E. A., MELEDINA, M. A., GARSHEV, A. V., SHIRSHIN, E. A., FADEEV, V. V., KALMYKOV, S. N. *Am(III) sorption onto TiO₂ samples with different crystallinity and varying pore size distributions*. Applied Geochemistry. 2014. DOI 10.1016/j.apgeochem.2014.01.006.
21. FIŠERA, O., KAREŠ, J., PROCHÁZKOVÁ, L., ČUBA, V., VLK, M., KOZEMPEL, J., FIALOVÁ, K., PALUŠÁK, M. *Zařízení a způsob pro separaci radionuklidů z oplachových roztoků*. Patent č. 308654. Úřad průmyslového vlastnictví. 2020. [online] [cit. 17. 3. 2022]. Dostupné z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/308/308654.pdf>.

Poděkování - podpora

Tento projekt byl podpořen Ministerstvem vnitra České republiky v rámci smlouvy č. VI20172020106.

ZOBRAZOVÁNÍ (NEJEN ANALYTICKÝCH) VÝSLEDKŮ

DISPLAYNG (NOT ONLY ANALYTICAL) RESULTS

Václav Helán *

2 THETA ASE, s.r.o., Jasná 307, 735 62 Český Těšín, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: vaclav.helan@2theta.cz, tel.: +420 602 720 748

Abstrakt

Různé způsoby zobrazování výsledků poskytují rychlý přehled o zjištěných skutečnostech a jejich vztazích. Pro zobrazení dvou proměnných je nejrozšířenější kalibrační křivka, pro tři proměnné „prostorový“ graf.

Závislost tří nebo čtyř proměnných se dá také vyjádřit kroužky umístěnými v ploše. Tento graf byl použit např. pro zobrazení obsahu kyslíku (průměr kroužku) a chlorofylu (intenzita barvy kroužku) ve vzorcích vody odebraných v různých dnech v různých hloubkách.

Lékaři používají korelogramy k zobrazení vzájemného vztahu řady biochemických parametrů nebo vzájemného působení různých léků. Tyto grafy se dají použít obecně pro vztahy různých skutečností: vzájemné působení otravných a škodlivých látek, působení těchto látek za různým meteorologických podmínek (teplota, tlak a vlhkost vzduchu, déšť, sníh...)

Klíčová slova: závislost proměnných, korelogramy, biochemické parametry, léčiva, otravné látky

Abstract

Various ways of displaying results provide a quick overview of the facts found and their relationships. For displaying two variables the calibration curve is used, for three variables spatial graph is used.

Circles in a surface can show the dependence of three or four variables. This graph was used, for example, to display the oxygen (the diameter of the ring) and chlorophyll (the intensity of the color) content on different days and at different depths.

Correlograms show the interrelationships of a number of biochemical parameters or the interaction of drugs in medicine. These graphs can be used in general for relationships between different facts: interaction of poisonous and harmful substances, the effect of these substances under various meteorological conditions (temperature, air pressure and humidity, rain, snow,...).

Key words: dependency of variables, correlograms, biochemical parameters, medicines, poisonous substances

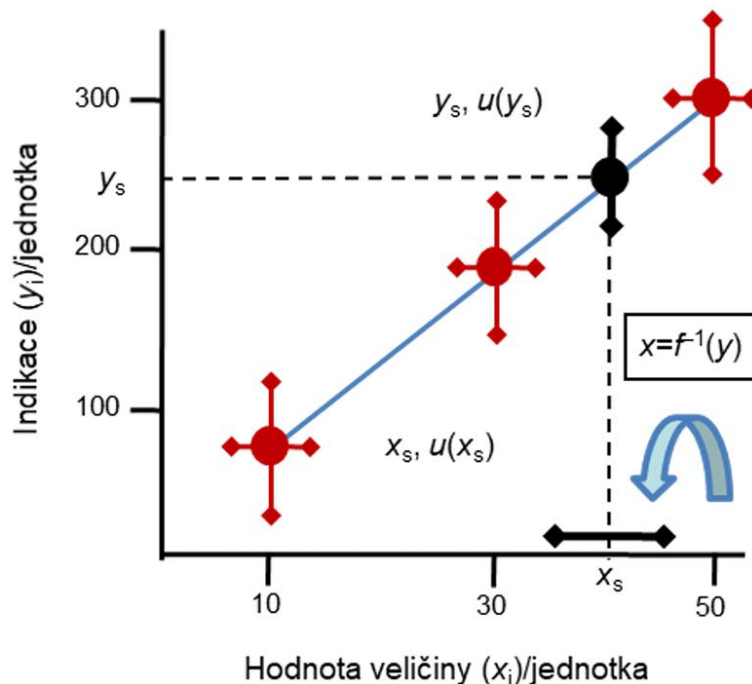
ÚVOD

Príspevek predstavuje zobrazovanie niekoľika promenných a jejich vzájemných vztahů v analytické chemii, kontrole životního prostředí a lékařství. Tyto způsoby se dají použít i v řadě dalších oblastí.

1 ZOBRAZOVÁNÍ VÝSLEDKŮ V ANALYTICKÉ CHEMII A KONTROLE ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

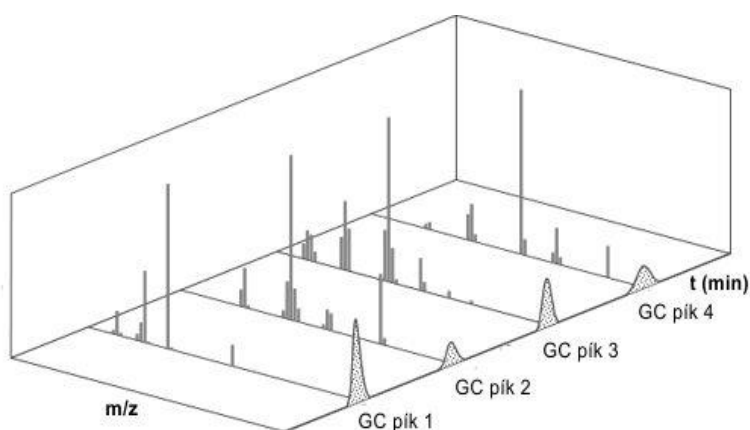
1.1. Zobrazování 2 až 3 parametrů v analytické chemii

Pro závislost naměřeného signálu na koncentraci analytu ve standardech se používá kalibrační křivka – přímka, parabola, výjimečně i křivka vyššího řádu. Musíme si ale uvědomit, že měřený signál má určitou nejistotu. A také hodnoty certifikovaného referenčního materiálu byly stanoveny s určitou nejistotou. Proto je vhodné tyto nejistoty v kalibrační křivce znázornit.



Obrázek 1 Kalibrační křivka s vyznačenými nejistotami

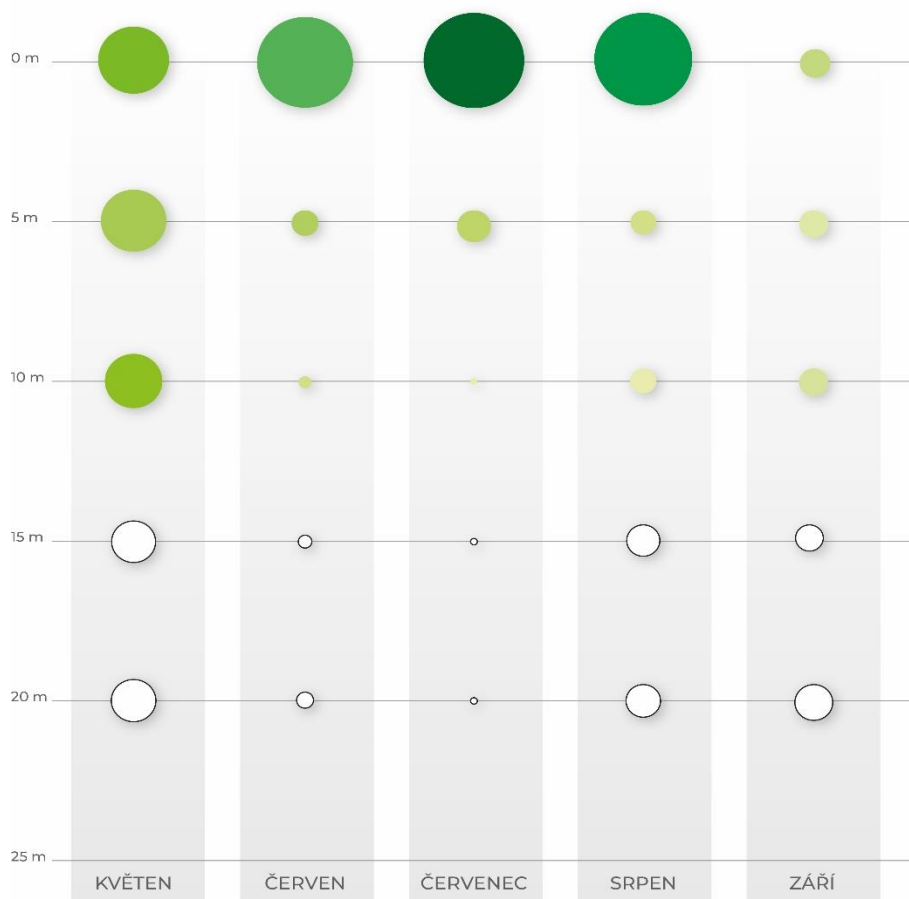
Vztah tří parametrů se znázorňuje „prostorovým“ grafem.



Obrázek 2 Data z GC/MS

1.2. Zobrazení více parametrů při kontrole životního prostředí

Pro zobrazení výsledků analýz přírodních vod z různých hloubek v různých měsících byl použit graf na Obrázku 3. Velikost kroužku znázorňuje obsah kyslíku a intenzita barvy obsah chlorofylu.



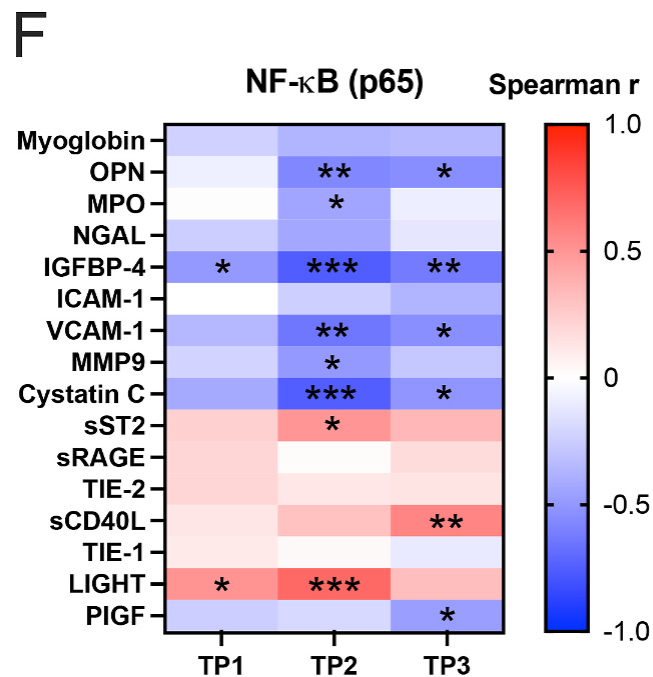
Obrázek 3 Obsah kyslíku a chlorofylu ve vodách z nádrží

2 POUŽITÍ KORELOGRAMŮ V LÉKAŘSTVÍ

Komplexní pohled na pacienta nepracuje pouze se stanovenými výsledky biochemických parametrů, ale sleduje také, jak se tyto parametry vzájemně ovlivňují.

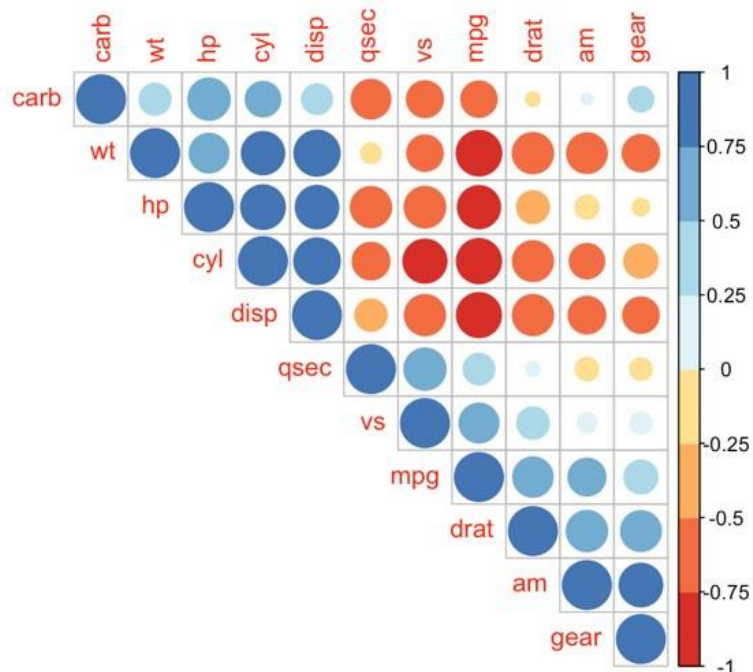
2.1 Zobrazování vzájemných vztahů biochemických parametrů

Na Obrázku 4 je znázorněno ovlivnění biochemických parametrů 3 pacientů. Červená barva znázorňuje kladné ovlivnění, modrá záporné ovlivnění. Počet hvězdiček pravděpodobnost.



Obrázek 4 Ovlivnění biochemických parametrů 3 pacientů

Obrázek 5 znázorňuje vzájemné ovlivnění řady parametrů. Modrá barva znázorňuje kladné ovlivnění, červená záporné ovlivnění. Odstín barvy míru ovlivnění, velikost kroužku pravděpodobnost.



Obrázek 5 Ovlivnění řady biochemických parametrů

2.2 Vzájemné působení léků

Jedním z řady příkladů je vliv vitamínu D na ukládání vápníku v kostech.

2.3 Toxikologie a hodnocení potravin

Toxicita těžkých kovů je značně ovlivněna tím, v jaké sloučenině jsou vázány. Arzén v organické matici je výrazně méně toxický než arzén iontový. U rtuti je tomu naopak: dimetylrť je výrazně jedovatější než rť anorganická.

3 DALŠÍ MOŽNOSTI POUŽITÍ KORELOGRAMŮ

Vliv na vlastnosti oceli nebo skla a dalších materiálů má vzájemné působení obsahů obsažených prvků.

Vliv kombinace různých škodlivin uniklých při průmyslových haváriích může být doplněn o povětrnostní podmínky.

Totéž platí pro působení bojových otravných látek.

ZÁVĚR

Různé způsoby zobrazování určených skutečností umožní posuzovat jejich vzájemné vztahy. Najdou použití v analytické chemii, kontrole životního prostředí, v lékařství a toxikologii, ale také v technologii výroby různých materiálů a hodnocení účinků úniku škodlivin a použití bojových otravných látek.

Použitá literatura

1. MILDE, D., KLOKOČNÍKOVÁ, E. *Kvalimetrie* 25. Eurachem, ISBN 978-80-86322-18-6
2. ŠEVČÍK, J. *Měření a výsledky v analytické chemii*, Ing. Václav Helán – 2 THETA, ISBN 978-80-88279-24-2
3. ANDREJČINOVÁ, I. a kol. *Persisting IL-18 levels after COVID-19 correlate with markers of cardiovascular inflammation reflecting potential risk of CVDs development*, Heliyon 10 (2024) e25938

SPEKTROMETRICKÝ SYSTÉM PRO NEUTRONY A ZÁŘENÍ GAMA

SPECTROMETRIC SYSTEM FOR NEUTRONS AND GAMMA RAYS

Aleš Horna^{a*}, Matyáš Hlavinka^a, Oldřich Pecák^a, Zdeněk Matěj^a

^a Fakulta informatiky, Masarykova univerzita, Botanická 68a, 602 00 Brno, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: ales.horna@mail.muni.cz

Abstrakt

Vyvíjené zařízení pro spektrometrii neutronů a záření gama NGA-01 se zakládá na využití organických scintilátorů pevných (např. stilben) i kapalných. V současnosti dosahovaný energetický rozsah činí 0,8 až 20 MeV pro neutrony a 0,05 až 10 MeV pro gama. K oddělování odezev na jednotlivá záření se využívá tvarová diskriminace (PSD). Skutečná spektra záření se získávají dekonvolucí diskriminovaných přístrojových spekter. Vedle zlepšování diskriminace pomocí strojového učení a zavádění měřicí metody Time-of-Flight (ToF) se věnujeme také rozšiřování rozsahu neutronové spektrometrie směrem k nižším energiím za využití vodíkových proporcionálních detektorů.

Klíčová slova: neutronová spektrometrie, scintilátor, tvarová diskriminace

Abstract

The neutron and gamma-ray spectrometry device NGA-01 under development, is based on the use of both solid (e.g., stilbene) and liquid organic scintillators. The currently achievable energy range spans from 0.8 to 20 MeV for neutrons and from 0.05 to 10 MeV for gamma rays. To distinguish between the responses to different types of radiation, pulse-shape discrimination (PSD) is employed. The actual radiation spectra are obtained by deconvolution of the apparatus spectra after discrimination. In addition to improvement of discrimination with the help of machine learning and implementing the Time-of-Flight (ToF) method, we also work on extending the neutron spectrometry range toward lower energies, relying on hydrogen-filled proportional counters.

Key words: neutron spectrometry, scintillator, pulse-shape discrimination

ÚVOD

Spektrometrický systém NGA-01 pro gama záření a neutrony využívá digitální zpracování signálu. Jeho jádrem je programovatelné hradlové pole (FPGA), což zaručuje vysokou rychlost sběru a zpracování dat. Zařízení pracuje ve spojení se scintilačními sondami citlivými na záření gama a neutrony, přičemž díky zavedené diskriminaci se pro detekci gama i neutronů současně využívá jediný scintilátor. Zařízení komunikuje s připojeným PC a výsledky měření jsou vykreslovány v reálném čase. Současný vývoj zařízení směřuje k rozšíření energetického rozsahu, automatizace oddělování signálů majících různý původ (diskriminace neutrony/gama) a doplnění o nové měřicí metody (ToF).

1 ZAŘÍZENÍ NGA-01

1.1. Popis koncepce

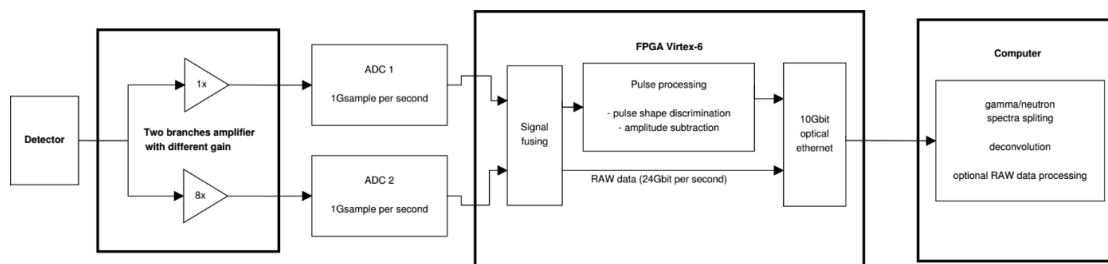
Gama-neutronový analyzátor NGA-01 je modulární systém, takže může pracovat s různými scintilačními detektory. Fotografie zařízení je na obrázku 1. Jako scintilátory jsou využívány

zejména stilben, *p*-terfenyl a BC-501 A (NE-213), detekčním mechanismem neutronového záření je vznik odražených protonů. K detekci scintilací slouží vakuový fotonásobič. Z tohoto důvodu NGA-01 obsahuje také vysokonapěťový zdroj. Signál z předzesilovače s připojeným scintilačním detektorem je rozdělen do dvou větví, kdy signál je v každé z nich jinak zesílen a následně digitalizován AD převodníkem, přičemž každé větvi náleží vlastní převodník. Díky tomu dokáže analyzátor zpracovat širší rozsah energií částic bez nutnosti měnit vlastnosti trasy pro přenos signálu.



Obrázek 1 Zařízení NGA-01

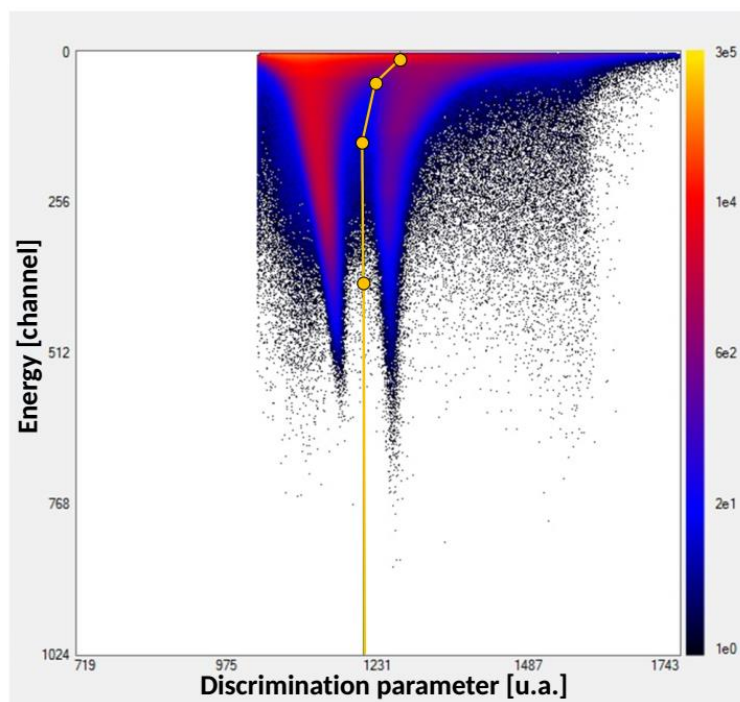
AD převodníky jsou 12bitové, se vzorkovacím kmitočtem 500 MHz. Data jsou dále zpracovávána v FPGA, které zvládá celkový datový tok až 12 Gbit/s. FPGA rozdělí zaznamenané odezvy podle toho, zda náleží neutronům či záření gama, provede tedy tvarovou diskriminaci (PSD). Blokové schéma je na obrázku 2. Prostřednictvím ethernetu je možné zařízení NGA-01 ovládat i vzdáleně, pro zabezpečení se využívá VPN.



Obrázek 2 Blokové schéma NGA-01

1.2. Zpracování dat

V současnosti využívaný postup provádění PSD se zakládá na měření rychlosti sestupu impulsu ze scintilátoru, konkrétně plochy pod zvolenou částí sestupné fáze. Každému zaznamenanému impulsu tak náleží vedle amplitudy také PSD parametr. Tento se společně s velikostí amplitudy mapuje do korelačního diagramu, kde je počet impulsů o parametrech daných souřadnicemi na osách vyznačen různou barvou. Stanovení přímky či křivky pro oddělení impulsů od různých záření provádí experimentátor ručně, její možný průběh je spolu s korelačním diagramem znázorněn na obrázku 3. U diskriminovaných přístrojových spekter je nutno provést ještě jejich rozklad (*unfolding*, dekonvoluce) k získání skutečných spekter neutronů a gama. Tento se provádí v obslužném programu na základě známé matice odezvy detektoru. Dosahovaný energetický rozsah spektrometrie činí 0,8 až 20 MeV pro neutrony a 0,05 až 10 MeV pro gama.



Obrázek 3 Vytvořený korelační diagram, levá oblast – odezvy na gama, pravá oblast – odezvy na neutrony

2 PROBÍHAJÍCÍ VÝVOJ

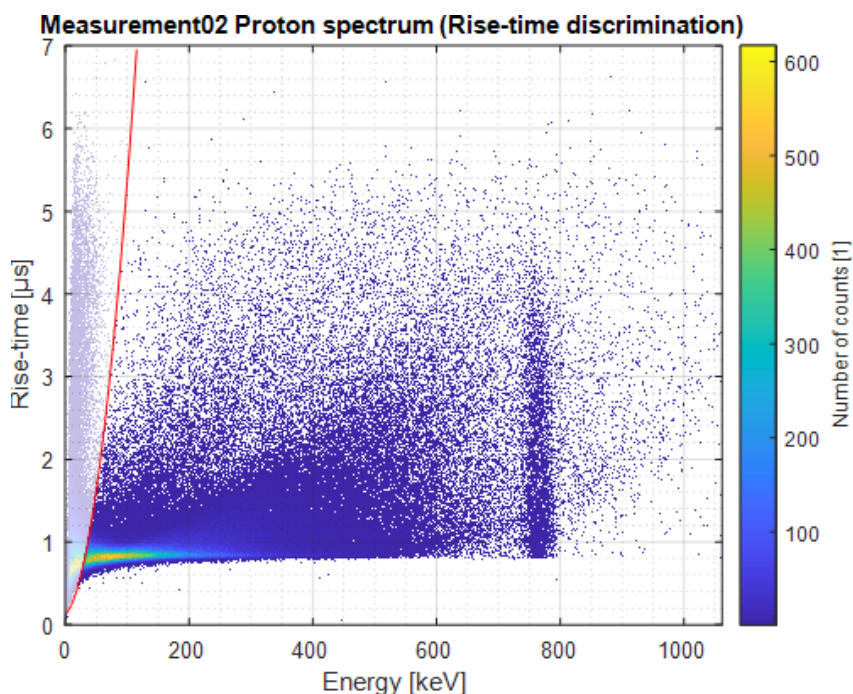
1.3. Proporcionální detektory*

Rozsah neutronové spektrometrie za použití scintilátorů je omezen, k jeho rozšíření směrem k nižším energiím je plánováno použití kulových proporcionálních detektorů s přímou drátovou anodou, plněných vodíkem, založených také na vzniku odražených protonů. Detektory v současnosti dostupné na FI MU obsahují příměs helia-3 pro energetickou kalibraci tepelnými neutrony, což umožňuje snadné testování měřicí aparatury, ale činí je méně vhodnými pro vlastní spektrometrii. Měření a testování probíhají nezávisle na provozu NGA-01, s využitím separátní vyhodnocovací jednotky pracující přímo se signálem z nábojově citlivého předzesilovače. Jednotka taktéž využívá FPGA, avšak zpracování signálů probíhá až po skončení sběru dat, v PC, v prostředí MATLAB. [1] Amplituda impulsu z předzesilovače odpovídá náboji, který v detektoru deponuje ionizující částice. Pomalejší charakter signálů znamená menší nároky na vzorkovací rychlost, která zde činí 125 MHz. Při zpracování se také využívá PSD, zde zaměřená na vzestupnou hranu impulsu (měří se doba náběhu impulsu), a která navíc řeší i oddělování případných parazitních jevů nemajících původ v ionizujícím záření. Kritéria pro vedení diskriminačních křivek stanovuje experimentátor ručně. Zatímco neutrony interagují hlavně s vodíkovou náplní, gama záření vyvolává emisi elektronů z kovových stěn detektoru. Větší ionizační schopnost a kratší doběh protonů vede k rychlejšímu impulsu o větších amplitudách, naproti tomu elektrony působí ionizaci s větším rozložením v objemu detektoru, což vede k delší době sběru nosičů náboje, a tedy pomalejšímu impulsu, který má díky malé ionizační schopnosti elektronů také menší amplitudu. [2] V současné době pozornost v oblasti proporcionálních detektorů zaměřujeme zejména na výrobu nových kusů, fotografická ukázka je na obrázku 4, a rozklad přístrojových spekter s využitím matice odezvy. Obrázek 5 představuje korelační diagram získaný ozářením vodíkového detektoru neutrony

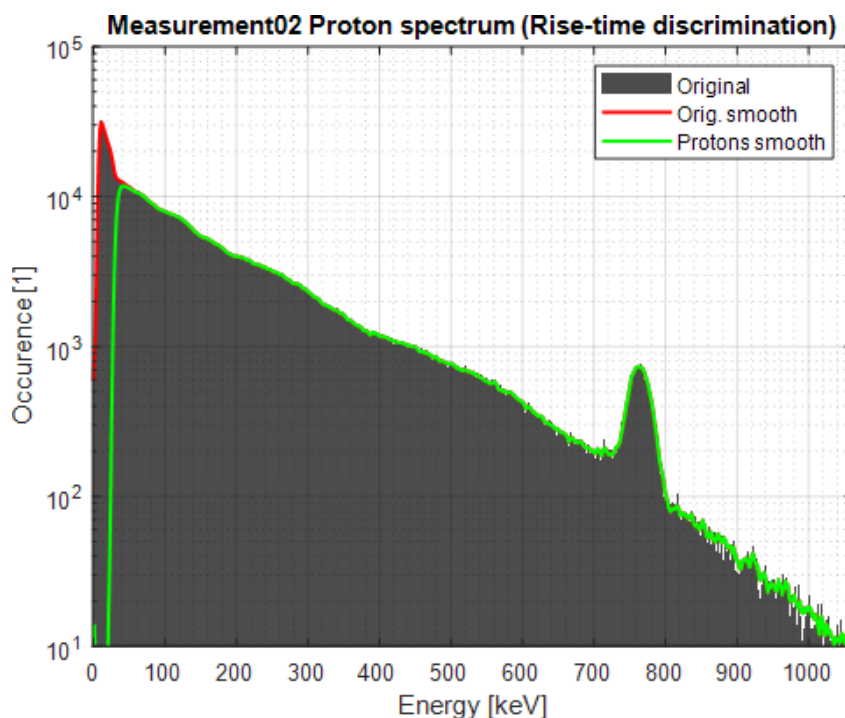
a gama zářením zdroje ^{252}Cf po filtraci železem. Křivka vyznačuje předěl mezi odezvami na neutrony (napravo od křivky, sytě) a gama (nalevo od křivky, světle). Současně se projevuje také (n,p) reakce na ^3He příměsí, umožňující provádět energetickou kalibraci. Její projev je nejvíce zřetelný jako vrchol v protonovém spektru (zeleně) na obrázku 6, kde jsou patrné také hrany umožňující přesnější energetickou kalibraci detektoru podle energií charakteristických pro interakci neutronů se železem. Protonové spektrum bylo vykresleno po odseparování odezev na gama záření podle korelačního diagramu.



Obrázek 4 Baňka proporcionálního detektoru s nataženým anodovým drátem, připravená k plnění vodíkem



Obrázek 5 Korelační diagram získaný s vodíkovým detektorem s ^3He příměsí ozářením ^{252}Cf s Fe filtrem, laboratoř LNG CVŘ (infrastruktura CICRR), energetická kalibrace je přibližná



Obrázek 6 Přístrojové a diskriminované protonové spektrum získané s vodíkovým detektorem s ^3He příměsí ozářením ^{252}Cf s Fe filtrem, laboratoř LNG CVŘ (infrastruktura CICRR), energetická kalibrace je přibližná

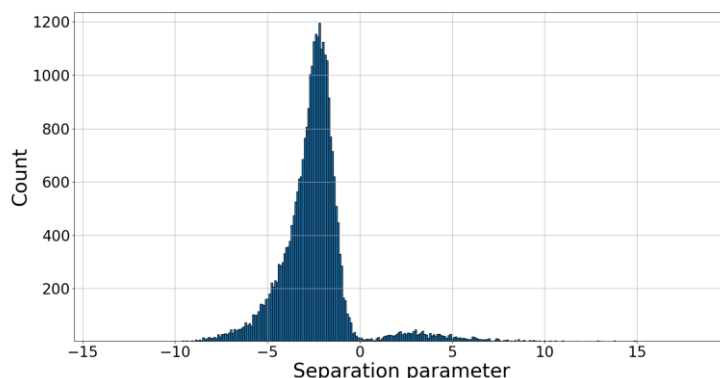
1.4. Využití metod strojového učení

Diskriminace mezi neutrony a gama zářením představuje ve své podstatě binární klasifikační problém, pro jehož řešení se použití strojového učení jeví vhodným a přirozeným přístupem. Také proto se další vývoj v oblasti automatizace diskriminace ubírá tímto směrem. Je však velice potřeba dbát na korektní filtraci trénovacích dat pro metody závisující na tzv. "učení s učitelem", kde je učitelem (experimentátorem) datům přiřazena třída.

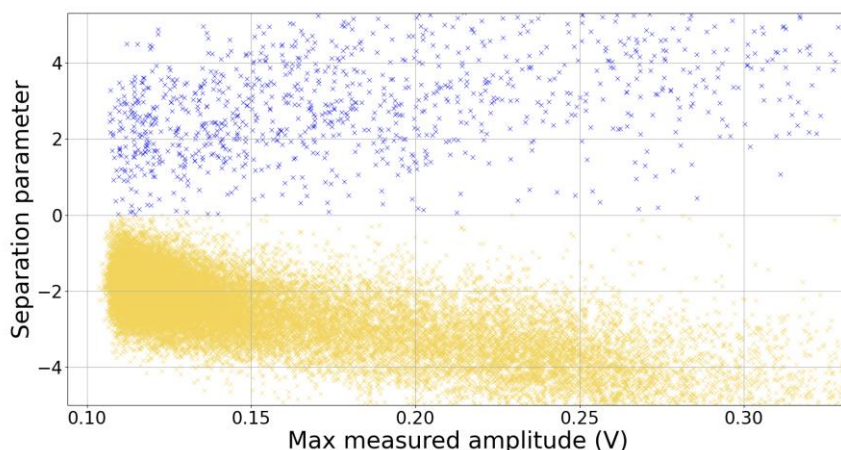
Signálový impuls lze reprezentovat jako vektor vzorků. Sofistikovanější metody, jako jsou neuronové sítě, dokážou pracovat s celým tímto vektorem přímo. To však může znamenat zbytečně velkou šířku vstupu, a tak bývá při offline zpracování vhodnější použít například metodu analýzy primárních komponent (PCA), která vybere jen nejdůležitější prvky. Na takto filtrovaných datech lze učit i jednodušší metody, jako je metoda podpůrných vektorů, nebo algoritmy na bázi stromů. Klasifikace je poté možná až na naměřeném přístrojovém spektru, podobně jako v případě tradičního PSD. Výsledek automatické diskriminace metodou podpůrných vektorů ukázal schopnost napodobit rozdělení, dle kterého byla metoda trénována. Metoda dokázala generalizovat rozhodnutí i na druhou sadu naměřených pulzů, tudíž nešlo jen o memorizaci tříd. Zároveň vytvořená hranice rozdělení korelačního diagramu nebyla striktní a umožňovala klasifikovat pulzy v této oblasti do obou skupin. Výsledky separace naměřených dat jsou viditelná na obrázcích 7 a 8. Vstupní data byly celé pulzy bez normalizace. Negativní separační parametr značí třídu gama.

Vývoj do budoucna představuje vhodnou implementaci sofistikovanějších klasifikátorů pro zpracování signálu v reálném čase, které se použijí současně s integrační metodou.

Implementace rozhodovací funkce metody podpůrných vektorů do programovatelné logiky byla úspěšně schopna emulovat softwarové výsledky, ale ty jsou silně závislé na trénovacích datech, a především absenci šumu.



Obrázek 7 Histogram separace metodou podpůrných vektorů



Obrázek 8 Zobrazení separačního parametru SVM při nízkých energiích

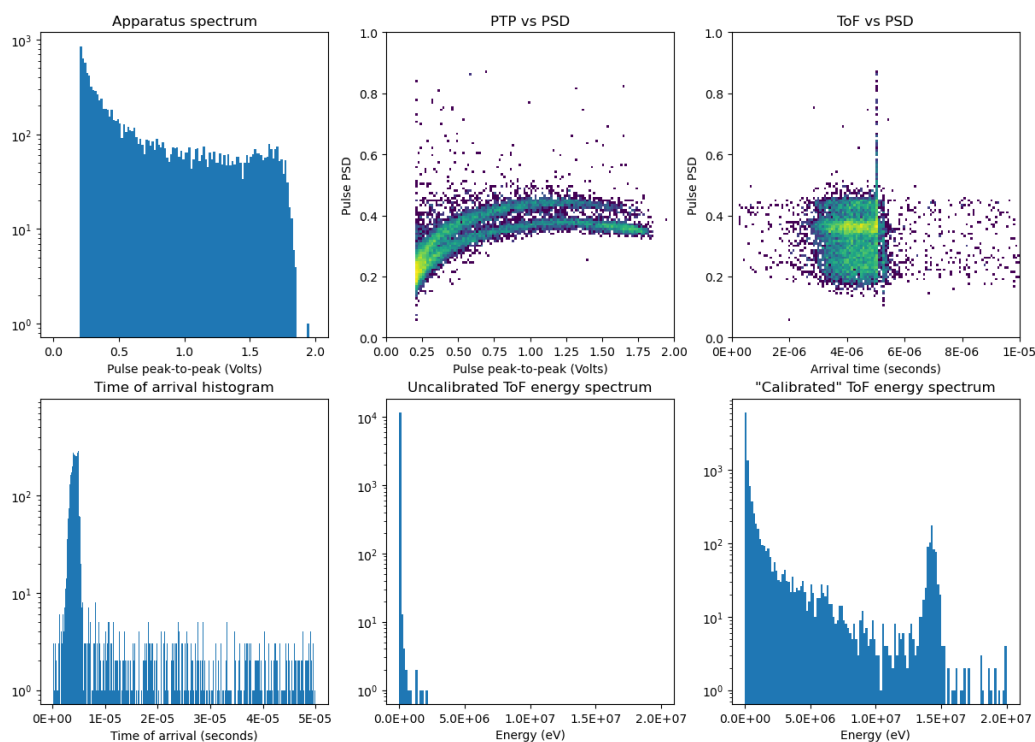
1.5. Zavádění metody Time-of-Flight

Time-of-Flight (dále jen ToF) je metoda měření energie neutronů založená na přesném měření doby letu neutronu mezi zdrojem a detektorem. Pro přesná stanovení je třeba brát v úvahu relativistické jevy. Výhodou je potenciálně vysoká přesnost měření energie, a to v širokém rozsahu (pro neutrony např. až jednotky MeV). Protože vstupními parametry jsou přesně známa dráha a čas, odpadá nutnost energetické kalibrace detektoru. Také potřeba tvarové diskriminace je zde umenšena, fotony gama se pohybují rychlostí světla, takže je lze oddělit podle času detekce.

Vedle zřejmých výhod je však zavádění ToF spojeno s určitými obtížemi. Zdroj neutronů musí být pulsní, přičemž pulsy by neměly být zbytečně dlouhé. Vydává-li zdroj neutrony setrvale (např. jaderný reaktor), je nutné použít pohyblivou clonu (tzv. *chopper*), která neutrony propustí jen v určitých časových intervalech, čímž se vytvoří požadované pulsy neutronového toku. Je nutno počítat rovněž s neutrony, které do detektoru nedorazí přímou cestou, ale po odrazech od prostředí (tzv. *room effect*), a které se tak falešně projeví jako neutrony nižší energie. S rostoucí velikostí detektoru se snižuje energetické rozlišení, protože k interakci může dojít v různém místě objemu detektoru, aniž by místo interakce byla přesně známo. Samozřejmostí je potřeba zajištění vysoké přesnosti měření času a vzdálenosti mezi zdrojem a detektorem.

Čas vzniku neutronu, resp. čas, kdy se objeví na počátku definované dráhy, je v případě částicových urychlovačů, neutronových generátorů a pohyblivých clon znám v souvislosti s řízením jejich činnosti (připojení napájecího napětí, poloha clony apod.). Je-li emise neutronů spojena s emisí záření gama, tento čas může být určen i na základě detekce gama fotonů, které do detektoru dorazí dříve. V tomto případě je však nevyhnutelné provádět diskriminaci mezi neutrony a gama.

Probíhající implementace metody ToF do zařízení NGA-01 umožní měřit časy přiletu s rozlišením v řádu nanosekund. Praktické zkoušky proběhly s využitím měřicí soustavy s osciloskopem Picoscope 6426E ve spojení se scintilačním detektorem s kapalným scintilátorem NE-213. Výsledky měření na D-T generátoru jsou na obrázku 9. Pro značnou délku pulsu generátoru je třeba za počáteční čas považovat konec pulsu. Tato skutečnost zapříčinila nefyzikální spektrum nad 14 MeV, viditelné na diagramu „calibrated“. Diagram „uncalibrated“ byl získán vyhodnocením nezohledňujícím relativistické jevy. Surová ToF data představuje diagram „time of arrival“. Měření se neomezovalo na pouhý záznam dob příchodů impulsů, současně bylo vyhodnoceno i přístrojové spektrum a spočteny PSD parametry pro každý impuls. Při testech se prokázala schopnost měření spekter rychlých neutronů nad 5 MeV i na krátké vzdálenosti (cca 5 m), a to s dostatečným rozlišením, srovnatelným s ostatními metodami.



Obrázek 9 Výsledky měření metodou ToF na D-T generátoru KJR FJFI ČVUT

ZÁVĚR

Spektrometrický systém NGA-01 umožňuje měření energetických spekter neutronů a gama záření v poměrně širokém rozsahu, za využití scintilačních detektorů. K obdržení vypovídajících dat je v současnosti nutné nastavovat parametry pro diskriminaci různých druhů záření. Vývoj směřuje k rozšíření měřitelných energií neutronů s využitím plynových detektorů. Vedle toho je snahou automatizovat stanovení diskriminačních kritérií s využitím

strojového učení. Nadto bude doplněna možnost provádění pro neutronové spektrometrie založené na měření doby letu.

Použitá literatura

1. KOLÁŘ, Ondřej; KUBÍČEK, Michal. Proportional counter measurement system. Online. In: NOVÁK, Vítězslav. *Proceedings I of the 28th Conference STUDENT EEICT 2022*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2022, s. 208-211. ISBN 978-80-214-6029-4. Dostupné z: https://www.eeict.cz/eeict_download/archiv/sborniky/EEICT_2022_sbornik_1_v2.pdf f. [cit. 2025-09-28].
2. BENNETT, E.F. Proportional Counter Proton-Recoil Spectrometer with Gamma Discrimination. Online. *Review of Scientific Instruments*. 1962, vol. 33, no. 11, s. 1153-1160. ISSN 0034-6748. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.1717719>. [cit. 2025-09-28].

Poděkování - podpora

Autoři by tímto chtěli vyjádřit poděkování CV Řež, KJR FJFI ČVUT a FVT UNOB za podporu při prováděných experimentech, obzvláště za možnosti měření s neutronovými zdroji a generátory.

*Prezentované výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LM2023041.

IONTY KOVŮ V REGULACI INHIBICE ACETYLCHOLINESTERÁZY NERVOVĚ PARALYTICKÝMI LÁTKAMI

METAL IONS IN THE REGULATION OF ACETYLCHOLINESTERASE INHIBITION BY NERVE AGENTS

Monika Hoskovcová*, Jiří Žeravík

Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, Univerzita obrany, Sídliště Váta Nejedlého, 68201 Vyškov, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: monika.hoskovcova@unob.cz, tel.: +420 973 452 316

Abstrakt

Interakce acetylcholinesterázy s nervově paralytickými látkami je v biologickém prostředí významně modifikována přítomností makrobiogenních iontů kovů, jako jsou Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ a K^+ . Naše studie ukazuje, že v nepřítomnosti NPL mohou samotné ionty Mg^{2+} a Ca^{2+} inhibovat AChE, což poukazuje na jejich přímý vliv na enzym. Při fyziologických koncentracích iontů Mg^{2+} a Ca^{2+} dochází k výraznému synergickému efektu, kde ionty zesilují inhibiční účinek NPL. Naopak, při vyšších koncentracích (přibližně 20 mM) se tento efekt mění na antagonistický, což vede k částečné regeneraci aktivity enzymu. Ionty Na^+ a K^+ na rozdíl od bivalentních iontů tento synergický nebo antagonistický efekt nevykazují.

Klíčová slova: *acetylcholinesteráza, bivalentní ionty, monovalentní ionty, nervově paralytické látky, aktivita enzymu, inhibice*

Abstract

The interaction of acetylcholinesterase with nerve agents is significantly modified in a biological environment by the presence of macrobiogenic metal ions, such as Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , and K^+ . Our study shows that in the absence of nerve agents, Mg^{2+} and Ca^{2+} ions alone can inhibit AChE, indicating their direct influence on the enzyme. At physiological concentrations of Mg^{2+} and Ca^{2+} ions, a notable synergistic effect occurs, where the ions enhance the inhibitory action of the nerve agents. Conversely, at higher concentrations (approximately 20 mM), this effect becomes antagonistic, leading to a partial regeneration of enzyme activity. In contrast to the bivalent ions, Na^+ and K^+ ions do not exhibit this synergistic or antagonistic effect.

Key words: *acetylcholinesterase, bivalent ions, monovalent ions, nerve agents, enzyme activity, inhibition*

ÚVOD

Acetylcholinesteráza (AChE) je enzym, který se podílí na ukončení nervového přenosu na cholinergních synapsích jak v centrální nervové soustavě, tak i na nervosvalovém spojení. (1) Její hlavní funkcí je rychlá hydrolýza neurotransmiteru acetylcholinu, čímž se zabraňuje nadměrné stimulaci nervového systému. Extrémně vysoká rychlost hydrolýzy AChE, která je limitovaná pouze rychlostí difúze acetylcholinu k molekule enzymu, spolu s vysokou citlivostí AChE na široké spektrum chemických látek umožňují využití tohoto enzymu v moderních bioanalytických metodách. (2-4) Tyto metody umožňují detekci např. iontů těžkých kovů, léčiv, přírodních toxinů, pesticidů a v neposlední řadě také chemických bojových látek. (5-11)

Aktivita AChE není stálá, ale je silně ovlivněna přítomností iontů (např. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^-), které v živých organismech hrají zásadní roli při regulaci mnoha biologických procesů. Interakce mono- a divalentních iontů s AChE mění celkové nábojové rozložení v enzymu, a to nejen v jeho aktivním místě, ale i v dalších oblastech. Tyto změny elektrostatického pole mohou vyvolat konformační změny, které ovlivňují katalytickou účinnost, což vede buď k aktivaci, nebo inhibici enzymu. (12-14) V tomto ohledu jsou dvoumocné ionty (jako Ca^{2+} a Mg^{2+}) často považovány za aktivátory, avšak existují i publikace s protichůdnými závěry. Například, Nachmansohn (14) ve svých pracích popisuje zvýšení aktivity enzymu v přítomnosti divalentních iontů, které byly účinnější než monovalentní ionty. Naopak, Hughes a Bennet (15) zjistili, že sodné ionty (Na^+) působí inhibičně a AChE inaktivují. Tento nesoulad podtrhuje i Pohankova studie (16), která specificky prokázala, že vápenaté ionty (Ca^{2+}) působí jako inhibitory na rekombinantní lidskou AChE, zatímco ostatní makrobiogenní prvky žádné inhibiční chování nevykazovaly. V rámci rozsáhlé studie působení iontů na aktivitu AChE hodnotí chování Mg^{2+} iontů vázaných do α - a β -vazebního místa enzymu při nízkých koncentracích substrátu, jako chování kompetitivního inhibitoru. Zatímco při vysokých koncentracích substrátu Mg^{2+} ionty obsazují pouze β -vazebné místo enzymu, což vede k jeho aktivaci. Tyto rozdílné výsledky naznačují, že vliv iontů na aktivitu AChE závisí na řadě faktorů, včetně typu enzymu, konkrétního iontu, jeho koncentrace a podmínek prostředí. (10, 12, 17)

Většina studií se v rámci výzkumu zaměřuje pouze na vliv iontu na reakci enzymu se substrátem, nikoli na jeho chování v přítomnosti silných kompetitivních inhibitorů. Jedna z mála prací, která tuto oblast zkoumá, využila biosenzor DETEHIT k měření vlivu iontů na aktivitu AChE inhibovanou látkami VX a R-33. (18) Výsledky ukázaly překvapivý a protichůdný trend, kdy, ačkoliv se očekávalo, že aktivační účinek dvoumocných iontů kovů alkalických zemin by mohl snížit inhibiční působení ireverzibilních inhibitorů, v experimentu bylo pozorováno zesílení inhibičního účinku Mg^{2+} a Ca^{2+} . Působení iontů bylo také studováno ve spojení s pesticidy. Studie (19) ukázala, že ionty Mg^{2+} zvyšují aktivitu plasmové a erytrocytální AChE a zároveň snižují účinek pesticidu chlorpyrifosu. Podle studie Shetab-Boushehri et al. (20) se ionty Mg^{2+} účastní reaktivace aktivního místa enzymu po inhibici pesticidem dichlorvos. V tomto případě byl inhibovaný enzym reaktivován pralidoximem v přítomnosti iontů Mg^{2+} a bez nich. Výsledkem byl návrh použití oximů spolu s Mg^{2+} ionty jako prostředek pro zvýšení antidotní terapie.

Tato zjištění naznačují, že ionty ovlivňují funkci enzymu nejen ve vztahu k jeho substrátu, ale také vůči typu inhibitoru. Mechanismy, kterými ionty modifikují aktivitu AChE v přítomnosti ireverzibilních inhibitorů, nejsou plně prostudovány a vyžadují další podrobný výzkum. Tyto jevy jsou připisovány iontové síle, konformačním změnám způsobeným obsazením periferních míst enzymu příslušným kationtem nebo přímo specifické vazbě na kationtu na anionické místo aktivního centra enzymu. Zastoupení jednotlivých příspěvků působících sil je různé, dané také valencí iontů a jejich chováním jako Lewisovy kyseliny. (13, 17, 18)

Cílem této publikace je vyplnit tuto mezeru ve výzkumu a hlouběji prozkoumat vliv mono a bivalentní iontů makrobiogenních prvků na aktivitu AChE v přítomnosti ireverzibilního inhibitoru, v našem případě nervově paralytické látky, což napomůže objasnit komplexní interakce mezi těmito prvky a enzymem. Využity byly látky typu G a A v heterogenním prostředí.

1 POPIS EXPERIMENTU

1.1 Materiál a metody

Nervově paralytické látky: sarin (GB) [isopropyl-methylfosfonofluoridát], soman (GD) [(3,3-dimethylbut-2-yl)-methylfosfonofluoridát], cyklosarin (GF) [cyklohexyl-methylfosfonofluoridát], látka VX [S-[2-(diisopropylamino)ethyl]-O-ethylmethylfosfonothioát], Látka R-33 (S-[(2-diethylamino)ethyl]-O-isobutyl-methylfosfonothioát) látka A-234 [O-ethyl-N-diethylaminoethylidenamido fluorofosfát], Čistota látek byla ověřena metodou GC-MS. Látky byly syntetizovány ve VVÚ, s. p. Brno, Česká republika. Zásobní roztoky byly připravovány v roztoku hexanu.

Ionty kovů: chlorid sodný (Lachema, n. p., Brno), chlorid draselný (Lach-Ner, s.r.o., Neratovice), chlorid vápenatý, bezvodý (PENTA s.r.o.), hexahydrát chloridu hořečnatého (Lach-Ner, s.r.o., Neratovice). Všechny vyrobeny v České republice.

Biochemická reakce: 5,5'-dithiobis-2-nitrobenzoová kyselina (DTNB) a acetylthiocholin jodid (ATCh) od Merck KGaA, Darmstadt, Německo, kyselina trihydrogenboritá, dodekahydrát tetraboritanu sodného od firmy PENTA s.r.o., Praha, Česká republika, lyofilizovaná AChE [EC 3.1.1.7] o firmy ORITEST s.r.o., Praha, Česká republika.

Britton-Robinsonův pufr: kyselina fosforečná (Sigma-Aldrich s.r.o.) o čistotě 85 %, kyselina boritá p.a., kyselina octová 99,9 % a hydroxid sodný p.a. (Lach-Ner, s.r.o., Neratovice).

Přístrojové vybavení a pomůcky: Multidetekční reader Synergy H1M s duálním reagenčním injektorem a příslušenstvím od firmy Biotek, Winoosky, Vermont, USA. Poloautomatické pipety od firmy BRAND GMBH + CO. KG, Wertheim, Německo. Třepačka IKA MS 3 basic, Model MS 3 B S000, USA. Ultrazvuková lázeň Bandelin electronic, Sonorex, Typ DT 103H, Německo. Stolní pH metr HI2221 od firmy Hanna Instruments Czech s.r.o.. Mikrotitrační desky, Greiner, 96 jamek, 1 x 8 strip, Merck KGaK, Darmstadt, Německo. Vialky šroubovací, širokohrdlé, objem 2 ml od společnosti Verkon s.r.o., Česká republika.

1.2 Pracovní postup

Pro zjištění aktivity AChE po expozici NPL byl použit klasický postup využívající Ellmanovu kolorimetrickou metodu. Míra aktivity enzymu je odvozena od koncentrace reakčních produktů hydrolýzy. Vliv inhibitoru a mono a bivalentních iontů na enzym byl zjišťován na multidetekčním readeru Synergy H1M.

Stanovení aktivity enzymu pomocí Synergy H1M

Funkčnost AChE byla ověřována před každou sadou experimentálních měření pomocí stanovení aktivity enzymu. Do mikrotitrační destičky byl dávkován enzym ze zásobního roztoku 1 mg / ml, v ředící řadě 25x, 50x, 100x a 200x. Následně byla pomocí injektoru do mikrotitrační destičky nadávkována reagenční směs obsahující DTNB a ATCh v borátovém pufru pH 8,5, přičemž po protřepání vzorku proběhlo měření aktivity enzymu v jednotlivých jamkách. Základem bylo měření změny absorbance v časovém intervalu 2 minut. Získaná data byla poté extrapolována pomocí lineární regrese, přičemž hodnota směrnice přímky odpovídala rychlosti enzymatické reakce ($\Delta A_{420} / \text{min}$). Pro následná měření bylo vždy vybráno takové ředění enzymu, kdy vypočtená hodnota rychlosti enzymové reakce spadala do intervalu 150 – 300 $\Delta A_{420} / \text{min}$.

Měření aktivity enzymu po inkubaci s inhibitorem a vybraným iontem

Měření aktivity enzymu bylo prováděno na dělených mikrotitračních destičkách, přičemž nejprve na mikrotitrační destičku byl nanesen inhibitor rozpuštěný v hexanu v rozsahu

koncentrací $1 \cdot 10^{-9}$, $1 \cdot 10^{-8}$, $1 \cdot 10^{-7}$, $1 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$ mg . mL⁻¹. Následně pomocí duálního reagenčního injektoru byl do jamek mikrotitrační destičky nadávkován roztok obsahující odpovídající množství AChE a vybranou koncentrací příslušného iontu kovu (0, 1, 5, 10, 20 mmol . L⁻¹). Poté proběhla 10 minutová inkubace, po které následovalo nadávkování odpovídajícího množství směsi reagentů DTNB a ATCh rozpuštěných v borátovém pufru pH 8,5. Aktivita enzymu byla měřena při vlnové délce 420 nm v časovém intervalu 2 minut. Výsledky byly zpracovány ovládacím softwarem Genesis 5.0 (BioTek, USA). Pro srovnávací měření posloužil vzorek obsahující hexan, roztok enzymu s odpovídající koncentrací vybraného iontu. Obsah hexanu ve vzorcích byl 10% obj. Všechna měření byla prováděna v tetraplikátech.

Vyhodnocení naměřených dat

Vedle již zmíněné lineární regrese, která byla použita pro stanovení aktivity enzymu v měřeném vzorku. Vzniklá kalibrační závislost rychlosti reakce vztažená k log₁₀ koncentrace inhibitoru byla extrapolována pomocí nelineární regrese podle rovnice:

$$y = \frac{A1-A2}{1+(\frac{x}{IC50})^p} + A2$$

kde hodnoty A1 a A2 odpovídají horní a dolní asymptotě, hodnota IC50 představuje koncentraci inhibitoru, při které dochází k 50% poklesu aktivity enzymu. Hodnota p představuje směrnici přímky v inflexním bodě (odpovídá hodnotě IC50).

Stanovení kinetických parametrů v_{max} a K_M bylo provedeno pomocí nelineární regrese mechanismem rovnice dle Michaelise-Mentenové:

$$v = \frac{V_{max} \cdot [S]}{K_M + [S]}$$

kde v je rychlost enzymové reakce, v_{max} je hodnota maximální rychlosti reakce při saturaci substrátem, K_M je Michaelisova konstanta, která odpovídá koncentraci substrátu při rychlosti enzymové reakce $V_{max}/2$ a S je koncentrace substrátu (acetylthiocholinu).

K určení typu inhibice byla použita linearizace rovnice Michaelise-Mentenové podle Lineweaver-Burka:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{V_{max}} + \frac{K_M}{V_{max}} \cdot \frac{1}{[S]}$$

Disociační konstanta pro enzym-inhibitorový komplex K_i byla zjištěna na základě Cheng a Prusoffovi rovnice (21):

$$K_i = \frac{IC50}{1 + \frac{[S]}{K_M}}$$

kde S je koncentrace substrátu, pro inhibiční měření byla používána 0,5 mmol . L⁻¹. Hodnota K_M je tzv. Michaelisova konstanta a odpovídá koncentraci substrátu při rychlosti enzymové reakce $V_{max}/2$.

2 VÝSLEDKY A DISKUZE

2.1 Vliv iontů alkalických kovů a kovů alkalických zemin na aktivitu enzymu

V prvním kroku byl studován vliv různých koncentrací iontů Na⁺, K⁺, Ca²⁺ a Mg²⁺ na aktivitu acetylcholinesterázy. Experiment spočíval v inkubaci enzymu s příslušnými ionty a následném stanovení aktivity pomocí modifikované Ellmanovy reakce. Získané kinetické parametry, V_{max} a K_M , byly vyhodnoceny nelineární regresí podle rovnice Michaelis-Mentenové (*Tabulka 1*) a typ inhibice byl potvrzen pomocí Lineweaver-Burkových grafů.

Tabulka 1 Hodnoty $V_{\max}$ a K_M , získané nelineární regresi kalibrační řady acetylthiocholinu v přítomnosti monovalentních a bivalentních iontů.

c(iont) [mmol . L ⁻¹]	Na ⁺		K ⁺	
	$V_{\max}$ [pkat]	K_M [mmol . L ⁻¹]	$V_{\max}$ [pkat]	K_M [mmol . L ⁻¹]
0	131,6 ± 7,7	0,131 ± 0,026	92,6 ± 5,2	0,130 ± 0,025
1	132,0 ± 7,3	0,136 ± 0,025	92,6 ± 5,2	0,135 ± 0,026
5	128,5 ± 7,7	0,149 ± 0,029	90,5 ± 4,9	0,145 ± 0,026
10	125,9 ± 7,1	0,153 ± 0,028	88,7 ± 4,8	0,153 ± 0,027
20	129,1 ± 5,3	0,166 ± 0,021	88,2 ± 4,	0,179 ± 030
c(iont) [mmol . L ⁻¹]	Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	$V_{\max}$ [pkat]	K_M [mmol . L ⁻¹]	$V_{\max}$ [pkat]	K_M [mmol . L ⁻¹]
0	134,8 ± 7,5	0,139 ± 0,026	157,9 ± 8,6	0,143 ± 0,026
1	175,6 ± 4,7	0,177 ± 0,015	205,8 ± 5,2	0,166 ± 0,013
5	187,7 ± 3,5	0,244 ± 0,012	215,5 ± 4,9	0,232 ± 0,015
10	186,4 ± 3,4	0,291 ± 0,014	214,5 ± 4,7	0,284 ± 0,016
20	155,3 ± 3,6	0,366 ± 0,020	211,4 ± 4,0	0,331 ± 0,015

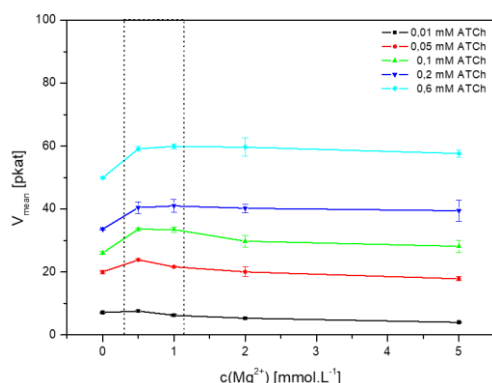
Určení kinetických parametrů $V_{\max}$ a K_M pro jednotlivé koncentrace iontů poskytuje informace o tom, jak daný iont ovlivňuje funkci enzymu. Hodnota $V_{\max}$ indikuje, jak se mění maximální rychlost enzymové reakce. Její pokles značí, že iont snižuje efektivitu enzymu, zatímco její nárůst znamená, že iont působí jako aktivátor. Hodnota K_M naopak vyjadřuje afinitu enzymu k substrátu. Nárůst K_M ukazuje na snížení afinity, což je typické pro kompetitivní a smíšenou inhibici. Pokles hodnoty K_M naopak značí zvýšení afinity enzymu k substrátu. Přehled jednotlivých typů inhibice vycházející z chování kinetických parametrů je popsán v *Tabulce 2*.

Tabulka 2 Určení typu inhibice z hodnot $V_{\max}$ a K_M .

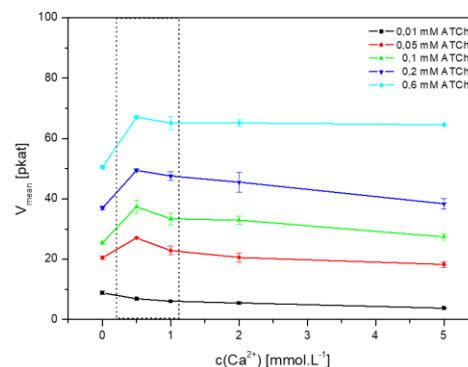
$V_{\max}$	K_M	Typ inhibice	Popis inhibice
konstantní	roste	<i>Kompetitivní</i>	Inhibitor soutěží se substrátem o aktivní místo.
klesá	konstantní	<i>Nekompetitivní</i>	Inhibitor se váže mimo aktivní místo (na alosterické místo).
klesá	roste	<i>Smíšená</i>	Inhibitor ovlivňuje jak aktivní, tak i alosterické místo.
roste	klesá nebo je konstantní	<i>Aktivace</i>	Aktivátor se váže mimo aktivní centrum, na alosterické místo.

Na základě získaných kinetických parametrů (*Tabulka 1*) lze odvodit, že monovalentní ionty působí jako smíšené inhibitory. Chování bivalentních iontů je složitější. V nízkých koncentracích se chovají jako aktivátory, zatímco ve vyšších koncentracích působí inhibičně (*Obrázek 1*). Pro určení typu inhibice v tomto koncentračním rozsahu byla využita linearizace Michaelis-Mentenové rovnice pomocí Lineweaver-Burkovy metody. Tato metoda hodnotí pozici průsečíků extrapolovaných úseček. Kompetitivní inhibice je charakterizována protnutím všech přímek v jednom bodě na ose y. Nekompetitivní inhibice je charakterizována průsečíkem v záporné části osy x. Pokud se přímky protínají mimo osy v různých bodech, jedná se o smíšenou inhibici.

A)



B)

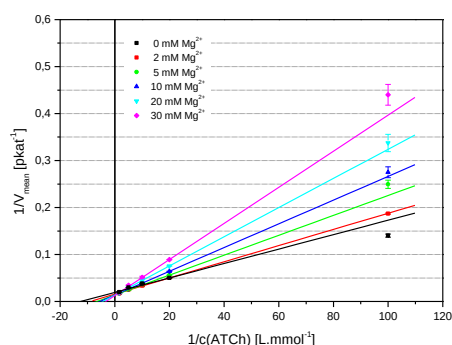


Obrázek 1 Vliv bivalentních iontů na rychlost enzymové reakce při různých koncentracích substrátu (0,01; 0,02; 0,1; 0,2; 0,6 mmol . L⁻¹). A) Rychlost odezvy substrátu na aktivitu enzymu v přítomnosti Mg²⁺ iontů. B) Rychlost odezvy substrátu na aktivitu enzymu v přítomnosti Ca²⁺ iontů.

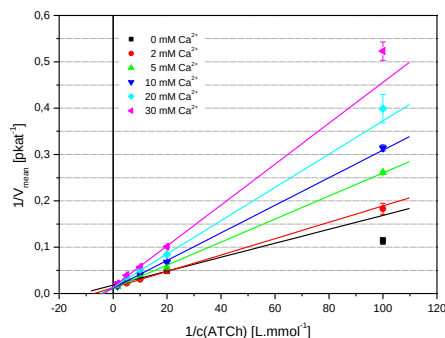
Jelikož se bivalentní ionty v nízkých koncentracích chovají jako aktivátory, bylo nezbytné určit počáteční koncentraci, která bude sloužit jako výchozí bod pro vyhodnocení inhibice. Zahrnutí aktivačních hodnot by zkreslilo analýzu Lineweaver-Burkovy metody. Jak ukazuje *Obrázek 1*, ionty Mg²⁺ i Ca²⁺ při koncentraci 0,5 mmol . L⁻¹ výrazně zvyšují aktivitu enzymu, zejména u vyšších koncentrací substrátu. Nicméně při 1 mmol . L⁻¹ se u Mg²⁺ objevuje stagnace aktivity a u Ca²⁺ je patrný pokles aktivity u všech koncentrací substrátu. Teprve při koncentraci nad 2 mmol . L⁻¹ bylo u obou iontů pozorováno snížení aktivity. Na základě těchto zjištění byla koncentrace 2 mmol . L⁻¹ zvolena jako minimální hodnota pro vyhodnocení inhibice. Z výsledků je také zřejmé, že oba ionty regulují aktivitu enzymu v rámci svých fyziologických koncentrací (Mg²⁺: 0,75–0,95 mmol . L⁻¹; Ca²⁺: 1,1–1,35 mmol . L⁻¹). Při koncentracích vyšších, než fyziologické rozmezí však již působí inhibičně.

Pro určení typu inhibice jsme analyzovali data získaná při různých koncentracích bivalentních iontů v rozsahu 2–30 mmol . L⁻¹. Průsečíky přímk, které charakterizují jednotlivé koncentrace iontů, byly v obou případech rozptýlené a ležely mimo osy. Tato vizuální charakteristika grafů jednoznačně odpovídá smíšené inhibici. Tento závěr platí pro oba zkoumané bivalentní ionty a je v souladu s typem inhibice zjištěným u monovalentních iontů (*Obrázek 2*). Výsledky naznačují, že při dostatečně vysokých koncentracích se tyto ionty mohou vázat jak do aktivního centra enzymu, tak i na jiné místo mimo něj, čímž ovlivňují jeho aktivitu.

A)



B)



Obrázek 2 Vyhodnocení inhibičního chování s využitím Lineweaver-Burkovy extrapolace. A) Vyhodnocení měření aktivity AChE při různých koncentracích Mg²⁺. B) Vyhodnocení měření aktivity AChE při různých koncentracích Ca²⁺.

Míra intenzity vazby je popsána extrapolovanými hodnotami disociační konstanty K_i pro smíšenou inhibici, které jsou uvedeny v *Tabulce 3*. Tyto hodnoty ukazují, že ze studovaných iontů mají nejvyšší afinitu k enzymu ionty Ca^{2+} , zatímco interakce s ionty Mg^{2+} je slabší. Ionty Na^+ a K^+ vykazují ve srovnání s bivalentními ionty nižší afinitu.

Tabulka 3 Přehled extrapolovaných hodnot K_i pro smíšenou inhibici pro jednotlivé monovalentní a bivalentní ionty.

Iont	K_i [mmol.l ⁻¹]
Na^+	$6,6 \pm 2,9$
K^+	$7,4 \pm 3,6$
Mg^{2+}	$4,4 \pm 1,7$
Ca^{2+}	$3,7 \pm 1,6$

Vyšší afinita iontů Ca^{2+} oproti Mg^{2+} může být způsobena tím, že iont Ca^{2+} je slabší Lewisovou kyselinou. V roztoku jsou ionty obklopeny molekulami vody, které vytvářejí takzvaný hydratační obal. Pro interakci s jakýmkoli jiným ligandem je tento obal nutné narušit. U iontů Ca^{2+} je toto narušení energeticky méně náročné než u iontů Mg^{2+} , což umožňuje snazší interakce s ligandy. Navíc jsou ionty Ca^{2+} větší než ionty Mg^{2+} , což jim poskytuje větší flexibilitu při interakci s různými ligandy.

2.2 Vliv iontů na inhibici enzymu nervově paralytickými látkami

V rámci naší studie byl zkoumán vliv iontů na inhibici enzymu AChE nervově paralytickými látkami (NPL). Na základě kalibračních křivek sarinu, somanu, cyklosarinu a A-234 byly jako primární parametry vyhodnoceny hodnoty IC_{50} . Pro hlubší pochopení a přesnější vyhodnocení vlivu iontů byla z hodnot IC_{50} vypočtena hodnota K_i , která bere v úvahu vliv experimentálních podmínek a je lépe porovnatelná mezi různými experimenty. V rámci výpočtu K_i bylo zohledněno i potenciální přímé působení iontů na samotný enzym.

Při studiu monovalentních iontů bylo zjištěno synergické působení těchto iontů a NPL. To znamená, že jejich kombinovaný účinek na inhibici enzymu AChE byl silnější než součet účinků obou složek. Při porovnání relativních hodnot IC_{50} a K_i nebyly pozorovány žádné výrazné rozdíly.

Situace se lišila u bivalentních iontů. V některých případech, při vyšších koncentracích, byl pozorován nárůst jak hodnoty IC_{50} , tak i K_i , což signalizuje snížení inhibičního účinku.

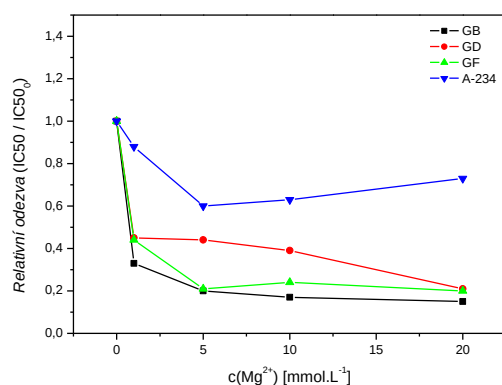
Pro usnadnění srovnání a lepší vizualizaci byly všechny hodnoty IC_{50} a K_i relativizovány (viz *Tabulky 4* a *5*). Grafické vyjádření těchto relativizovaných dat odhalilo výrazný rozdíl v profilech hodnot IC_{50} a K_i u kombinace hořčnatých iontů (Mg^{2+}) s látkou A-234 (*Obrázek 3*). Zde je zřejmé, že Mg^{2+} ionty snižují afinitu látky A-234 k enzymu, což znamená, že působí antagonisticky. Naopak v případě látek typu G (GB, GD, GF) byl pozorován synergický efekt (*Obrázek 4*).

Podobné, i když méně výrazné výsledky byly zaznamenány u působení Ca^{2+} iontů na látku A-234. I zde byl po úvodním výrazném poklesu obou hodnot (IC_{50} a K_i) pozorován nárůst IC_{50} a zejména K_i s rostoucí koncentrací iontů. Grafické vyjádření také ukázalo, že Ca^{2+} ionty mají antagonistický efekt na látku GF, zatímco zbývající látky G-typu, GB a GD, vykazují synergické působení s Ca^{2+} ionty na enzym.

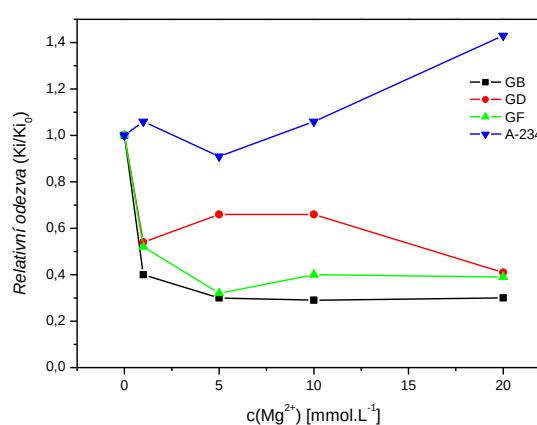
Tabulka 4 Souhrnný přehled hodnot IC_{50} a K_i pro kombinaci různých koncentrací Mg^{2+} iontů a studovaných nervově paralytických látek. Druhá část tabulky zahrnuje relativizované hodnoty IC_{50} a K_i pro grafické vynesení.

$c(Mg^{2+})$ [mmol.L ⁻¹]	GB		GD		GF		A-234	
	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]
0	15,80	3,44	53,40	11,6	4,61	1,00	4,18	0,91
1	5,22	1,37	23,90	6,25	2,01	0,53	3,68	0,96
5	3,17	1,04	23,30	7,65	0,99	0,32	2,52	0,83
10	2,73	1,01	20,90	7,68	1,10	0,40	2,62	0,96
20	2,41	1,02	11,30	4,76	0,93	0,39	3,07	1,30
relativní hodnoty								
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,33	0,40	0,45	0,54	0,44	0,52	0,88	1,06
5	0,20	0,30	0,44	0,66	0,21	0,32	0,74	0,91
10	0,17	0,29	0,39	0,66	0,24	0,40	0,55	0,96
20	0,15	0,30	0,21	0,41	0,20	0,39	0,57	1,43

A)



B)



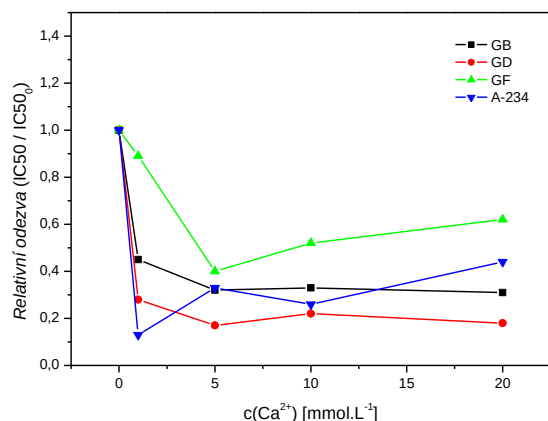
Obrázek 3 Srovnání vlivu různých koncentrací Mg^{2+} iontů na tvorbu enzym-inhibitorového komplexu;

A) Srovnání relativizovaných hodnot IC_{50} při různých koncentracích Mg^{2+} ; B) Srovnání relativizovaných hodnot K_i pro kombinaci Mg^{2+} s příslušnou nervově paralytickou látkou.

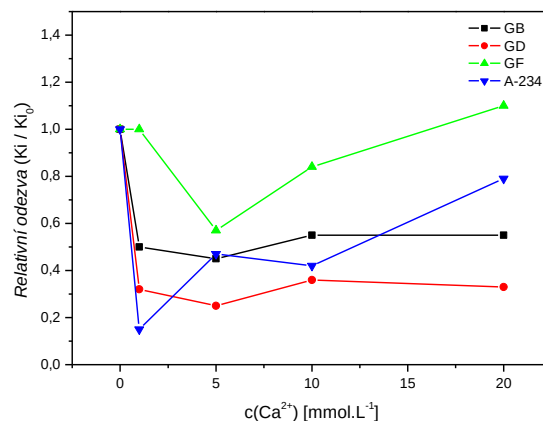
Tabulka 5 Souhrnný přehled hodnot IC_{50} a K_i pro kombinaci různých koncentrací Ca^{2+} iontů a studovaných nervově paralytických látek. Druhá část tabulky zahrnuje relativizované hodnoty IC_{50} a K_i pro grafické vynesení.

$c(Ca^{2+})$ [mmol.L ⁻¹]	GB		GD		GF		A-234	
	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$IC_{50} \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]	$K_i \cdot 10^{-6}$ [mmol.L ⁻¹]
0	12,70	2,82	330,91	73,60	1,24	0,28	4,42	0,98
1	5,66	1,41	94,20	23,50	1,10	0,27	0,60	0,15
5	4,04	1,28	57,10	18,10	0,50	0,16	1,45	0,46
10	4,24	1,54	73,03	26,50	0,64	0,23	1,14	0,42
20	3,88	1,55	60,40	24,1	0,76	0,30	1,94	0,77
relativní hodnoty								
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,45	0,50	0,28	0,32	0,89	1,00	0,13	0,15
5	0,32	0,45	0,17	0,25	0,40	0,57	0,33	0,47
10	0,33	0,55	0,22	0,36	0,52	0,84	0,26	0,42
20	0,31	0,55	0,18	0,33	0,62	1,10	0,44	0,79

A)



B)



Obrázek 4 Srovnání vlivu různých koncentrací Ca^{2+} iontů na tvorbu enzym-inhibitorového komplexu;
A) Srovnání relativizovaných hodnot IC_{50} při různých koncentracích Ca^{2+} ; B) Srovnání relativizovaných hodnot K_i pro kombinaci Ca^{2+} s příslušnou nervově paralytickou látkou.

ZÁVĚR

Vlivem monovalentních iontů (Na^+ a K^+) a bivalentních iontů (Mg^{2+} a Ca^{2+}) na interakci acetylcholinesterázy s nervově paralytickými látkami byl převážně pozorován synergický efekt, který prohlubuje působení inhibitoru. Výjimkou bylo několik případů u bivalentních iontů, kde se projevil antagonistický efekt. Nejsilnější ovlivnění vazby inhibitoru na enzym prokázaly hořečnaté ionty (Mg^{2+}), které, jak vyplývá z hodnot K_i , oslabují interakci látky A-234 s acetylcholinesterázou. U vápenatých iontů (Ca^{2+}) byl se zvýšenou koncentrací patrný nárůst antagonistického působení také u látky A-234, ale obzvláště zajímavé bylo jejich působení na enzym-inhibitorový komplex s látkou GF.

Použitá literatura

1. SILMAN, I. The multiple biological roles of the cholinesterases. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2021, 162, 41-56.
2. BAZELYANSKI, M., ROBEY, E. a KIRSCH, J. F. Fractional diffusion-limited component of reactions catalyzed by acetylcholinesterase. *Biochemistry*, 1986, 25, 125-130.
3. QUINN, D. M. Acetylcholinesterase: enzyme structure, reaction dynamics, and virtual transition states. *Chemical Review*, 1987, 87, 955-979.
4. ROSENBERY, T. L. Strategies to Resolve the Catalytic Mechanism of Acetylcholinesterase. *Journal of Molecular Neuroscience*, 2010, 40, 32-39.
5. FRASCO, M. F., FOURNIER, D., CARVALHO, F. a GUILHERMINO, L. Do metals inhibit acetylcholinesterase (AChE)? Implementation of assay conditions for the use of AChE activity as a biomarker of metal toxicity. *Biomarkers*, 2005, 10(5), 360-375.
6. POHANKA, M. Cholinesterases, a target of pharmacology and toxicology. *Biomedical Papers*, 2011, 155(3), 219-230.

7. KNAAK, J. B., TAN, C. a DARY, C. C. Pesticide Regulations: Exposure-Dose Modeling from FIFRA to FQPA. In: WALLACE, A. D. (ed.). *Toxicology and Human Environments*. San Diego: Academic Press, 2012. s. 117–162. ISBN 978-0-12-415813-9.
8. CASIDA, J. E. a DURKIN, K. A. Anticholinesterase insecticide retrospective. *Chemico-Biological Interactions*, 2013, 203, 221-225.
9. POHANKA, M. Cholinesterases in Biorecognition and Biosensors Construction: A Review. *Analytical Letters*, 2013, 46(12), 1849-1868.
10. LOPES, D. F. C., DE ASSIS, C. R. D., DE SANT'ANNA, M. C. S., DA SILVA, J. F., DE SOUZA BEZERRA R. a FRÉDOU, F. L. Brain acetylcholinesterase of three perciformes: From the characterization to the in vitro effect of metal ions and pesticides. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173, 494-503. ISSN 01476513. ISSN 01476513
11. ASSIS, C. R. D., LINHARES, A. G., OLIVEIRA, V. M., FRANCA, R. C. P., SANTOS, J. F., CARVALHO, E. V. M. M., BEZERRA, R. S. a CARVALHO, L.B. Effect of ions on the activity of brain acetylcholinesterase from tropical fish. *Journal of Coastal Life Marine*, 2015 3(7), 505-514.
12. ROBAIRE, B. a KATO, G. Effects of Mg^{2+} and Ca^{2+} on soluble and membrane-bound acetylcholinesterase from *Elecrophorus electricus*. *Biochemical Pharmacology*, 1974, 23, 2476-2480.
13. HOFER, P., FRINGELI, U. P. a HOPFF, W. H. Activation of acetylcholinesterase by monovalent (sodium and potassium) and divalent (calcium and magnesium) cations. *Biochemistry*. 1984, 23(12), 2730-2734. ISSN 0006-2960.
14. NACHMANSOHN, D. Action of ions on choline esterase. *Nature*, 1940, 145(3674), 513-514. ISSN 0028-0836.
15. HUGHES, R. J. a BENNET, J. Effects of metal ions on the activity of acetylcholinesterase (EC 3.1.1.7). *Biochemical Society Transactions*, 1985, 13(1), 219-220. ISSN 0300-5127.
16. POHANKA, M. Copper, aluminum, iron and calcium inhibit human acetylcholinesterase in vitro. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2014, 37(1), 455-459. ISSN 13826689.
17. TOMLINSON, G., MUTUS, B. a MCLENNAN, I. Activation and inactivation of acetylcholinesterase by metal ions. *Canadian Journal of Biochemistry*, 1981, 59, 728-735,
18. HOSKOVCOVÁ, M. Vliv iontů kovů na acetylcholinesterázu inhibovanou látkami série „V“. *HAZMAT PROTECT 2018*. Česká republika: SÚJCHBO, v.v.i, Kamenná, Česká republika, 2018, 3, 79-86. ISBN 978-80-270-4852-6.
19. AJILORE, B. S., ALLI, A. A. a OLUWADAIR, T. O. Effects of magnesium chloride on in vitro cholinesterase and ATPase poisoning by organophosphate (chlorpyrifos). *Pharmacology Research & Perspectives*, 2018, 6(3), e00401. DOI: 10.1002/prp2.401.
20. SHETAB-BOUSHEHRI, S. V., SHETAB-BOUSHEHRI, S. F. a ABDOLLAHI, M. Possible role of Mg^{2+} ion in the reaction of organophosphate (dichlorvos) with serine. *Journal of Medical Hypotheses and Ideas*, 2012, 6(1), 53-57. DOI: 10.1016/j.jmhi.2012.05.001. ISSN 2251-7294.

21. CHENG, Y. a PRUSOFF, W. H. Relationship between the inhibition constant (K_i) and the concentration of inhibitor which causes 50 per cent inhibition (I_{50}) of an enzymatic reaction. *Biochemical Pharmacology*, 1973, 22(23), 3099-3108.

Poděkování - podpora

Tato stat' byla finančně podpořena projektem Ministerstva obrany České republiky v rámci Dlouhodobého plánu rozvoje organizace - Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany "Výzkum metod a technologií ochrany před účinky zbraní hromadného ničení a průmyslových nebezpečných látek II" (DZRO-UOPZHN22-PROTECT II).

NANOPOROVÉ SEKVENOVÁNÍ V TERÉNU PRO ZLEPŠENÍ BIOLOGICKÉ OBRANY

FIELD-FORWARD NANOPORE SEQUENCING FOR ENHANCED BIODEFENSE CAPABILITIES

Martin Chmel^{a, b*}

^a Vojenský zdravotní ústav, Agentura vojenského zdravotnictví, U vojenské nemocnice 1200/1, 16200, Praha, Česká republika

^b Klinika infekčních nemocí, 1. LF UK a ÚVN, Ústřední vojenská nemocnice – Vojenská fakultní nemocnice Praha, U vojenské nemocnice 1200/1, 16200, Praha, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: martin.chmel1@mo.gov.cz, tel.: +420 725 027 307

^a Military Health Institute, Military Medical Agency, 16200 Prague, Czech Republic

^b Department of Infectious Diseases, First Faculty of Medicine, Charles University and Military University Hospital Prague, 12108 Prague, Czech Republic

*Corresponding author; e-mail: martin.chmel1@mo.gov.cz, tel.: +420 725 027 307

Abstrakt

Sekvenování nové generace (NGS) se ve vojenské biologické ochraně široce využívá k rychlé detekci patogenů, včetně vysoce rizikových biologických hrozeb. Přenosné nanoporové sekvenátory, jako je Oxford Nanopore MinION, byly validovány U.S. Naval Research Laboratory pro mobilní biosurveillance. Ampliconové sekvenování umožňuje rychlou, multiplexní detekci více bakteriálních patogenů s citlivostí srovnatelnou s real-time PCR a zároveň poskytují podrobné sekvenční informace o variantách a genech rezistence. Metagenomické sekvenování umožňuje nezkrácenou detekci v komplexních vzorcích, jako jsou odpadní vody či klinické materiály. Tato metoda umožňuje přístupem forenzní mikrobiologie analýzu genomů a plazmidů, včetně genů antibiotické rezistence. Po nasazení v polních laboratořích tyto systémy zkracují dobu potřebnou k reakci a zvyšují účinnost biologické obrany. Ozbrojené síly po celém světě postupně zavádějí nanoporové NGS technologie do systémů detekce a dohledu nad biologickými hrozbami.

Klíčová slova: sekvenování nové generace, biologická ochrana, detekce biologické hrozby

Abstract

Next-generation sequencing (NGS) is widely used in military biodefense for rapid detection of pathogens, including high-risk biothreats. Portable nanopore sequencers like Oxford Nanopore MinION have been validated by the U.S. Naval Research Laboratory for mobile biosurveillance. Amplicon-based nanopore assays enable rapid, multiplexed detection of multiple bacterial pathogens with sensitivity comparable to real-time PCR, while also providing detailed sequence information for variant and resistance analysis. Metagenomic sequencing enables unbiased detection in complex samples such as wastewater and clinical specimens. This method supports microbial forensics by reconstructing genomes and plasmids, including antibiotic resistance genes. Deployed in field labs, these systems shorten time-to-answer and improve biodefense responses. Armed forces globally are adopting nanopore-based NGS for biological threat detection and surveillance.

Keywords: Next generation sequencing, biodefense, biothreats detection

INTRODUCTION

The timely detection and mitigation of chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) threats is a central pillar of modern security and emergency preparedness¹. Within this multidisciplinary field, biological defense occupies a particularly critical role, as deliberate or accidental release of pathogenic microorganisms or toxins can have profound impacts on public health, military readiness, and national security². Effective CBRN biological defense integrates specialized sensing technologies, protective measures, medical countermeasures, and coordinated response strategies to prevent, detect, and control the spread of harmful biological agents³.

Field detection of CBRN hazards relies on a combination of advanced sensors, analytical tools, and networked monitoring systems capable of delivering real-time situational awareness across diverse operational environments⁴. These systems are deployed on naval and land-based platforms, integrated into vehicles and soldier-worn equipment, or implemented as rugged handheld devices for first responders. Chemical analyzers and spectrometers identify hazardous substances, while biological detection technologies range from rapid field kits targeting specific bacteria or toxins to sophisticated biodetection platforms capable of identifying a wide spectrum of pathogens⁵. Radiological threats are monitored with dosimeters, radiometers, and gamma spectrometers. Increasingly, these sensing capabilities are linked through cloud-based or software-as-a-service platforms that aggregate multi-sensor data, support predictive analytics, and enable rapid decision-making during emerging incidents.

In the biological domain, detection technologies are complemented by a suite of protective and medical countermeasures. Personal protective equipment (PPE)—including respirators, overpressure suits, and full-body protective garments—forms the first line of defense against exposure to infectious agents and toxins⁶. Medical countermeasures such as vaccines, antiviral drugs, and antibiotics provide targeted prophylaxis or treatment, while decontamination procedures and contamination avoidance strategies reduce the risk of secondary spread. Equally important is the specialized training of military and civilian emergency personnel, which ensures that detection data are correctly interpreted, response protocols are executed effectively, and expert guidance is available during high-risk operations⁷.

Operational applications of CBRN biological defense span military, civil protection, and critical infrastructure settings. Armed forces deploy integrated detection and protection systems aboard ships, vehicles, and soldier systems to maintain operational capability in contaminated environments. First responders and public health authorities rely on these technologies and procedures to manage outbreaks or biological attacks, while regional sensor networks can provide continuous surveillance around key facilities³.

Despite rapid technological progress, significant challenges remain. Accurate field interpretation is essential to avoid false positives and negatives, especially when natural biological backgrounds or complex environmental matrices complicate analyses⁵. The development of stand-off and remote detection methods—particularly for aerosolized pathogens—remains a key research priority^{8,9}. As an inherently interdisciplinary field, CBRN biological defense brings together expertise in microbiology, chemistry, physics, data science, medicine, and defense operations⁵. Advancing these technologies and strategies is essential for strengthening preparedness and resilience against evolving biological threats within the broader framework of CBRN security.

1 BRIEF BIO-DETECTION HISTORY IN CBRN CONTEXT

Detection technologies follow both microbiological advances and operational needs driven by outbreaks and the prospect of deliberate release. Classical methods (microscopy, culture) dominated early diagnostics; immunoassays and antigen tests accelerated mid-20th-century

practice; molecular methods and mass spectrometry later transformed speed, sensitivity and specificity. Recent work emphasises “field-forward” molecular workflows, portable sequencing and integrated air-monitoring systems suited to CBRN operations^{10–12}.

1.1. Early era: culture, microscopy and immunoassay

From Koch’s work on anthrax to routine diagnostic microbiology, culture and microscopy were the diagnostic backbone because they demonstrate viability and permit phenotypic characterisation. These methods, however, are intrinsically slow (hours–days to weeks) and require laboratory infrastructure and trained personnel. The mid-20th century saw immunological diagnostics (agglutination, immunofluorescence, ELISA) that reduced time-to-result and enabled antigen/antibody detection, but they rely on available reagents and may misclassify closely related agents or detect non-viable material¹³.

1.2. The molecular revolution: PCR, qPCR and multiplexing

The polymerase chain reaction (PCR) fundamentally changed detection by enabling exponential amplification of target nucleic acids from trace templates¹⁴. Early refinements (thermostable polymerases and primer design) established PCR and later real-time quantitative PCR (qPCR) as rapid, highly sensitive assays that became standard for targeted detection in clinical and biodefence settings^{14,15}. qPCR and multiplex PCR panels permit same-day identification of multiple agents, and commercial ruggedised qPCR systems were subsequently adapted for field use^{12,16}.

1.3. From targeted assays to untargeted genomics

While qPCR is fast and sensitive, it requires prior knowledge of target sequences. Unbiased metagenomic sequencing and portable nanopore platforms (e.g. MinION) permit detection and characterization of unknown or engineered agents, antimicrobial-resistance markers and strain-level typing in near-real time, albeit with higher requirements for sample prep and bioinformatics^{10,17}. Field deployments of sequencing workflows are now feasible and have been demonstrated in outbreak and surveillance settings.

1.4. Proteomics and activity-based toxin assays

Toxins (botulinum neurotoxins, anthrax lethal factor) are proteinaceous threats not always captured by nucleic-acid assays. Mass-spectrometry–based activity assays (Endopep-MS and related approaches) combine immunocapture with proteolytic substrate cleavage read by MS to deliver serotype-specific, activity-based detection that can outperform animal bioassays for speed and specificity^{18,19}. Multiplex Endopep-MS methods and LC–MS/MS quantitation have become important confirmations in clinical and forensic contexts²⁰.

1.5. Biosensors, microfluidics and point-of-need platforms

To enable rapid responses outside laboratories, a wide variety of biosensors (optical, electrochemical, acoustic) and microfluidic lab-on-chip devices have been developed. Reviews summarise electrochemical and array sensor approaches that offer low limits of detection, portability and low cost, while specific implementations (e.g. Love-wave immunosensors integrated with microfluidics) demonstrate minutes-scale detection of simulant agents in small samples—promising for field CBRN screening and triage^{21–23}.

1.6. Autonomous and integrated environmental surveillance

Operational CBRN monitoring favors integrated systems that combine air sampling, multiplex immunoassays and molecular confirmatory tests. The Autonomous Pathogen Detection System (APDS) is a canonical example of a continuously operating environmental monitor that couples aerosol collection, automated sample prep, antibody-based screening and confirmatory nucleic-acid assays to warn of airborne releases in public venues²⁴.

1.7. Field constraints, validation and limitations

Key operational constraints include sample complexity (environmental inhibitors), need to distinguish viable from non-viable agents (infectivity vs marker presence), reagent stability (cold chain), false positives/negatives in low-prevalence settings, and the need for validated standard operating procedures and interagency interoperability. The balance of speed, sensitivity and confirmatory power typically leads to layered detection strategies: rapid screen → confirm by molecular or proteomic gold-standard^{10,21,23}.

1.8. Future directions

Priority areas include further miniaturisation of sequencing and MS workflows, simplified sample-to-answer nucleic-acid and activity assays with lyophilised reagents, robust on-device bioinformatics and AI for rapid classification, and validated distributed networks of sensors and mobile labs for scalable CBRN response. Continued cross-validation against reference laboratories and harmonised standards will remain essential^{10,19}.

2 FIELD-READY NANOPORE SEQUENCING FOR PATHOGEN DETECTION: CAPABILITIES AND CONSTRAINTS

Portable nanopore sequencing (Oxford Nanopore Technologies' MinION and derivatives) has transformed the concept of "sequence-first" pathogen detection by moving long-read, real-time genomics out of centralized laboratories and into extreme field settings — from tropical rainforests and desert camps to aircraft and the International Space Station (ISS). Below I summarise the practical capabilities, operational workflows, demonstrated deployments, and key limitations for detecting pathogens in three archetypal austere environments: jungle, desert and space.

2.1. Technology and core advantages

Nanopore devices measure ionic current as single DNA/RNA strands traverse a protein pore, producing long reads with streaming basecalling that supports immediate analysis as data are generated. The platform's small size (palm-sized flowcells), USB-powered operation and flexible sample throughput enable low-infrastructure sequencing with turnaround times from sample to actionable sequence data in hours rather than days. The technology's capacity for long reads aids assembly and strain-level discrimination, and real-time basecalling enables on-the-fly species ID, variant calling and detection of antimicrobial-resistance markers^{17,25–27}.

2.2. Proven field deployments

Seminal field studies demonstrated practical pathogen surveillance: portable nanopore workflows were used for near-real-time genomic surveillance of Ebola in West Africa and for rapid Zika virus sequencing across Brazil, establishing that mobile genomics can inform outbreak tracking and transmission inference in resource-limited settings^{26,27}. Conservation and biodiversity teams further showed successful species identification and barcoding directly in a

rainforest using a backpack laboratory, proving feasibility in hot, humid, remote environments²⁸. These campaigns established operational templates (mini-PCR, simplified extraction, laptop-based analysis) now widely adopted in field genomics^{28,29}.

2.3. Extreme and confined environments: deserts and space

Desert deployments resemble jungle work in logistics (power, dust, temperature control) but differ in sample types (e.g., arthropod vectors, soil/sand) and thermal stress on reagents and electronics; several studies and workflows report successful MinION runs with insulation/active cooling and lyophilised reagents to mitigate heat and dust²⁹. In microgravity and spaceflight, nanopore sequencing has been validated: parabolic-flight tests and ISS experiments produced comparable read profiles to ground controls and enabled in-orbit microbial community surveys, demonstrating the instrument's resilience to altered gravity and vibration with appropriate procedural adaptations^{30,31}.

2.4. Operational workflow and data analysis

A field workflow typically comprises sample collection (swabs, blood, vector homogenates), rapid extraction (column- or magnetic bead-based kits, or simplified “direct” methods), optional targeted amplification (amplicon tiling for viruses or rRNA/marker loci for bacteria/eukaryotes), library preparation using rapid kits, and sequencing with real-time basecalling and lightweight bioinformatics (read classification, reference mapping, consensus generation). Low-compute classifiers and read-streaming tools permit near-real-time identification on modest laptops; more complex metagenomic analyses may require cloud resources or heavier local servers^{17,29}.

2.5. Detection sensitivity, specificity and limits

Nanopore sequencing can detect pathogens across a broad dynamic range, but raw read error rates remain higher than short-read platforms, so pathogen detection is usually achieved via read abundance, targeted amplicons, or consensus polishing rather than single-read calls^{32–34}. Targeted PCR-tiling (viral genomes) or enrichment markedly improves sensitivity and reduces host/background signal. Rapid species identification has been achieved with as few as tens to hundreds of reads for high-abundance targets; low-titer infections and complex environmental matrices still challenge limit-of-detection without prior enrichment^{35–37}.

2.6. Constraints and mitigation strategies

Key constraints in austere settings include sample inhibitors, low biomass, reagent cold-chain, contamination risk, and the need for validated interpretive thresholds for diagnostics. Mitigations include (i) targeted enrichment or amplification, (ii) lyophilised or ambient-stable reagents, (iii) portable clean-bench or UV decontamination, (iv) internal controls and standardized SOPs, and (v) local reference databases and lightweight classifiers for rapid on-device calls. In space, additional considerations are sterility, hardware qualification and radiation tolerance; validation studies indicate viability but recommend mission-specific qualification^{37–40}.

3 FORENSIC MICROBIOLOGY AND ANTIMICROBIAL RESISTANCE IN ARMED CONFLICTS

Armed conflicts create conditions - disrupted healthcare, population displacement, traumatic injuries and poor sanitation - that accelerate the emergence and spread of antimicrobial resistance (AMR)^{41,42}. Multidrug-resistant pathogens complicate treatment of war wounds and can persist in both military and civilian populations.

Forensic microbiology applies high-resolution genotyping, single-nucleotide polymorphism analysis and whole-genome sequencing (WGS) to attribute infectious outbreaks or deliberate releases to specific sources. Metagenomic approaches reveal resistance genes and mobile genetic elements (plasmids, transposons) even in uncultivable or mixed samples, supporting both epidemiological tracing and legal evidence⁴³. In conflict zones, the detection of distinct AMR signatures - such as unique plasmid profiles or rare resistance determinants - can link infections to particular hospitals, regions or potential bioterror events, strengthening attribution in investigations and international security contexts⁴⁴⁻⁴⁷.

Portable nanopore sequencers (e.g. Oxford Nanopore MinION) enable rapid, on-site sequencing of clinical and environmental samples, combining simplified DNA extraction, real-time analysis and pre-configured bioinformatic pipelines. These field-deployable systems allow simultaneous identification of pathogens and their resistance determinants, providing actionable data for both medical management and forensic inquiry^{44,45}.

But challenges remain: degraded samples, limited infrastructure and the need for validated local databases can affect data quality and the interpretation of resistance phenotypes. Nevertheless, integrating genomic AMR profiling with traditional epidemiology provides powerful evidence to trace transmission pathways, attribute sources of biological incidents and guide targeted interventions in war-affected settings⁴⁸.

CONCLUSIONS

In conclusion, field-forward nanopore sequencing provides a unique capability to strengthen biodefense by uniting rapid, on-site pathogen identification with real-time characterization of antimicrobial-resistance markers. Its portability and minimal infrastructure requirements allow deployment in conflict zones, disaster areas, or other austere settings where conventional laboratories are unavailable. Forensic microbiology benefits directly from these features: whole-genome and metagenomic analyses generated in the field can help attribute outbreaks or deliberate releases to specific sources, while simultaneously guiding clinical management of multidrug-resistant infections. Although challenges such as variable sample quality, limited local reference databases, and the need for standardized analytical protocols remain, integrating nanopore sequencing into biodefense operations enhances both early warning and legal attribution capabilities, providing actionable intelligence for public health and security decision-makers.

References

1. NATO. NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Policy. *NATO - Official text: NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Policy*, 14-Jun.-2022
https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_197768.htm (2022).
2. Joint Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Defence Centre of Excellence. CBRN Defence Response. *CBRN Defence Response*
https://www.jcbrncoe.org/app/uploads/2024/09/CBRN_1_2023_web.pdf (2023).
3. NATO STANDARD AJP-3.23 ALLIED JOINT DOCTRINE FOR COUNTERING WEAPONS OF MASS DESTRUCTION IN MILITARY OPERATIONS Edition A, version 1. *Allied Joint Publication-3.23 Allied Joint Doctrine for Countering Weapons of Mass Destruction in Military Operations*
https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6513e7b43d371800146d0c32/AJP_3_23_NATO_Countering_WMD_EdAV1.pdf (2023).

4. CBRN Detection and Identification. *NATO Factsheet CBRN Detection and Identification* https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2021/10/pdf/2110-factsheet-cbrn-detection_and_identi.pdf (2022).
5. Walper, S. A. *et al.* Detecting Biothreat Agents: From Current Diagnostics to Developing Sensor Technologies. *ACS Sens.* 3, 1894–2024 (2018).
6. Landon, P., Pearl, M., Weaver, P. & Fitch, J. P. Implementation of an Occupational Health and Medical Surveillance Program at National Biodefense Analysis and Countermeasures Center. *Appl. Biosaf.* 19, 4–10 (2014).
7. Long, C. M. & Marzi, A. Biodefence research two decades on: worth the investment? *Lancet Infect. Dis.* 21, e222–e233 (2021).
8. Coluccelli, N. *et al.* Standoff detection of bacterial spores by field deployable coherent Raman spectroscopy. *Sci. Rep.* 13, 2634 (2023).
9. Farsund, Ø., Rustad, G. & Skogan, G. Standoff detection of biological agents using laser induced fluorescence—a comparison of 294 nm and 355 nm excitation wavelengths. *Biomed. Opt. Express* 3, 2964 (2012).
10. Yeh, K. B. *et al.* Molecular Detection of Biological Agents in the Field: Then and Now. *mSphere* 4, e00695-19 (2019).
11. Barras, V. & Greub, G. History of biological warfare and bioterrorism. *Clin. Microbiol. Infect.* 20, 497–502 (2014).
12. Saikaly, P. E., Barlaz, M. A. & De Los Reyes, F. L. Development of Quantitative Real-Time PCR Assays for Detection and Quantification of Surrogate Biological Warfare Agents in Building Debris and Leachate. *Appl. Environ. Microbiol.* 73, 6557–6565 (2007).
13. Opal, S. M. A Brief History of Microbiology and Immunology. in *Vaccines: A Biography* (ed. Artenstein, A. W.) 31–56 (Springer New York, New York, NY, 2010). doi:10.1007/978-1-4419-1108-7_3.
14. Mullis, K. B. & Faloona, F. A. [21] Specific synthesis of DNA in vitro via a polymerase-catalyzed chain reaction. in *Methods in Enzymology* vol. 155 335–350 (Elsevier, 1987).
15. Saiki, R. K. *et al.* Primer-Directed Enzymatic Amplification of DNA with a Thermostable DNA Polymerase. *Science* 239, 487–491 (1988).
16. Schmitz, J. E., Stratton, C. W., Persing, D. H. & Tang, Y.-W. Forty Years of Molecular Diagnostics for Infectious Diseases. *J. Clin. Microbiol.* 60, e02446-21 (2022).
17. Jain, M., Olsen, H. E., Paten, B. & Akeson, M. The Oxford Nanopore MinION: delivery of nanopore sequencing to the genomics community. *Genome Biol.* 17, 239 (2016).
18. Rosen, O. *et al.* Development of a multiplex Endopep-MS assay for simultaneous detection of botulinum toxins A, B and E. *Sci. Rep.* 7, 14859 (2017).
19. Kalb, S., Boyer, A. & Barr, J. Mass Spectrometric Detection of Bacterial Protein Toxins and Their Enzymatic Activity. *Toxins* 7, 3497–3511 (2015).
20. Hancock, J. R. & D’Agostino, P. A. Mass spectrometric identification of toxins of biological origin. *Anal. Chim. Acta* 457, 71–82 (2002).

21. O'Brien, C., Varty, K. & Ignaszak, A. The electrochemical detection of bioterrorism agents: a review of the detection, diagnostics, and implementation of sensors in biosafety programs for Class A bioweapons. *Microsyst. Nanoeng.* 7, 16 (2021).
22. Matatagui, D. *et al.* Love-Wave Sensors Combined with Microfluidics for Fast Detection of Biological Warfare Agents. *Sensors* 14, 12658–12669 (2014).
23. Walper, S. A. *et al.* Detecting Biothreat Agents: From Current Diagnostics to Developing Sensor Technologies. *ACS Sens.* 3, 1894–2024 (2018).
24. Hindson, B. J. *et al.* APDS: the autonomous pathogen detection system. *Biosens. Bioelectron.* 20, 1925–1931 (2005).
25. Laver, T. *et al.* Assessing the performance of the Oxford Nanopore Technologies MinION. *Biomol. Detect. Quantif.* 3, 1–8 (2015).
26. Quick, J. *et al.* Real-time, portable genome sequencing for Ebola surveillance. *Nature* 530, 228–232 (2016).
27. Faria, N. R. *et al.* Mobile real-time surveillance of Zika virus in Brazil. *Genome Med.* 8, 97 (2016).
28. Pomerantz, A. *et al.* Real-time DNA barcoding in a rainforest using nanopore sequencing: opportunities for rapid biodiversity assessments and local capacity building. *GigaScience* 7, giy033 (2018).
29. Maestri, S. *et al.* A Rapid and Accurate MinION-Based Workflow for Tracking Species Biodiversity in the Field. *Genes* 10, 468 (2019).
30. Castro-Wallace, S. L. *et al.* Nanopore DNA Sequencing and Genome Assembly on the International Space Station. *Sci. Rep.* 7, 18022 (2017).
31. McIntyre, A. B. R. *et al.* Nanopore sequencing in microgravity. *Npj Microgravity* 2, 16035 (2016).
32. Linde, J. *et al.* Comparison of Illumina and Oxford Nanopore Technology for genome analysis of *Francisella tularensis*, *Bacillus anthracis*, and *Brucella suis*. *BMC Genomics* 24, 258 (2023).
33. Stefan, C. P., Hall, A. T., Graham, A. S. & Minogue, T. D. Comparison of Illumina and Oxford Nanopore Sequencing Technologies for Pathogen Detection from Clinical Matrices Using Molecular Inversion Probes. *J. Mol. Diagn.* 24, 395–405 (2022).
34. Zhang, J. *et al.* Clinical value of metagenomic next-generation sequencing by Illumina and Nanopore for the detection of pathogens in bronchoalveolar lavage fluid in suspected community-acquired pneumonia patients. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 12, 1021320 (2022).
35. Keck, F., Vasselon, V., Rimet, F., Bouchez, A. & Kahlert, M. Boosting DNA metabarcoding for biomonitoring with phylogenetic estimation of operational taxonomic units' ecological profiles. *Mol. Ecol. Resour.* 18, 1299–1309 (2018).
36. Loose, M., Malla, S. & Stout, M. Real-time selective sequencing using nanopore technology. *Nat. Methods* 13, 751–754 (2016).
37. Menegon, M. *et al.* On site DNA barcoding by nanopore sequencing. *PLOS ONE* 12, e0184741 (2017).

38. MacKenzie, M. & Argyropoulos, C. An Introduction to Nanopore Sequencing: Past, Present, and Future Considerations. *Micromachines* 14, 459 (2023).
39. Cao, E. & Siwy, Z. S. Leaving constraints of single nanopores and designing biomimetic nanopore arrays. *Curr. Opin. Electrochem.* 51, 101677 (2025).
40. Senol Cali, D., Kim, J. S., Ghose, S., Alkan, C. & Mutlu, O. Nanopore sequencing technology and tools for genome assembly: computational analysis of the current state, bottlenecks and future directions. *Brief. Bioinform.* 20, 1542–1559 (2019).
41. Lebreton, F. *et al.* High genetic relatedness between multidrug resistant bacteria before and after the 2022 invasion of Ukraine. *Genome Med.* 17, 74 (2025).
42. Yaacoub, S., Truppa, C., Pedersen, T. I., Abdo, H. & Rossi, R. Antibiotic resistance among bacteria isolated from war-wounded patients at the Weapon Traumatology Training Center of the International Committee of the Red Cross from 2016 to 2019: a secondary analysis of WHONET surveillance data. *BMC Infect. Dis.* 22, 257 (2022).
43. Ko, K. K. K., Chng, K. R. & Nagarajan, N. Metagenomics-enabled microbial surveillance. *Nat. Microbiol.* 7, 486–496 (2022).
44. Oliveira, M. *et al.* Sequencing Technologies in Forensic Microbiology: Current Trends and Advancements. *Forensic Sci.* 4, 523–545 (2024).
45. Nodari, R. *et al.* Forensic Microbiology: When, Where and How. *Microorganisms* 12, 988 (2024).
46. Fletcher, M., Trueba, M. & Al-Hassan, L. Antibiotic stewardship and antimicrobial resistance in conflict-affected Sudan: a situational analysis. *Front. Public Health* 13, 1589290 (2025).
47. Sauerborn, E. *et al.* Detection of hidden antibiotic resistance through real-time genomics. *Nat. Commun.* 15, 5494 (2024).
48. Gargis, A. S., Cherney, B., Conley, A. B., McLaughlin, H. P. & Sue, D. Rapid Detection of Genetic Engineering, Structural Variation, and Antimicrobial Resistance Markers in Bacterial Biothreat Pathogens by Nanopore Sequencing. *Sci. Rep.* 9, 13501 (2019).

VÝVOJ NOVÝCH LÁTEK NA BÁZI DERIVÁTŮ PIPERAZINU PRO OCHRANU PROTI IONIZUJÍCÍMU ZÁŘENÍ

DEVELOPMENT OF NEW COMPOUNDS BASED ON PIPERAZINE DERIVATIVES FOR PROTECTION AGAINST IONIZING RADIATION

Vojtěch Chmil, Alžběta Filipová, Aleš Tichý, Marcela Milanová*

Univerzita obrany, Vojenská lékařská fakulta, Katedra radiobiologie, Třebešská 1575, 500 01 Hradec Králové, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: marcela.milanova@unob.cz, tel.: +420 732 746 229

Abstrakt

Ionizující záření (IZ) nachází široké uplatnění v různých oblastech, včetně medicíny, průmyslu i bezpečnostních složek, avšak představuje riziko poškození zdravých tkání a DNA. Stávající radioprotektivní látky trpí řadou omezení, zejména vysokou toxicitou. Tato studie se zaměřuje na vývoj a hodnocení nových derivátů piperazinu jako potenciálních radioprotektivních látek. Syntetizované sloučeniny byly testovány *in vitro* a *ex vivo* na lidských buňkách z hlediska cytotoxicity a schopnosti zmírnit účinky gama záření. Několik z testovaných látek prokázalo schopnost snižovat radiační poškození DNA a zvyšovat přežívání buněk. Výsledky ukazují na potenciál těchto derivátů jako účinnějších a bezpečnějších alternativ k dosud používaným radioprotektivům.

Klíčová slova: deriváty piperazinu, ionizující záření, radioprotektivní látky

Abstract

Ionizing radiation (IR) is widely used across various fields, including medicine, industry, and security, but it poses a risk of damage to healthy tissues and DNA. Existing radioprotective agents suffer from several limitations, particularly high toxicity. This study focuses on the development and evaluation of novel piperazine derivatives as potential radioprotective compounds. The synthesized substances were tested *in vitro* and *ex vivo* on human cells for cytotoxicity and their ability to mitigate the effects of gamma radiation. Several tested compounds demonstrated the capacity to reduce radiation-induced DNA damage and improve cell survival. The results indicate the potential of these derivatives as more effective and safer alternatives to currently used radioprotective agents.

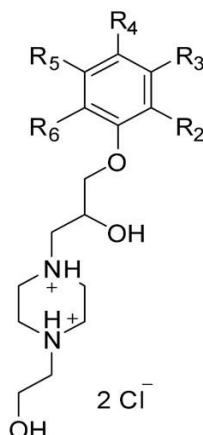
Keywords: ionizing radiation, piperazine derivatives, radioprotective agents

ÚVOD

Expozice ionizujícímu záření (IZ) v lékařském kontextu v posledním desetiletí významně vzrostla [1, 2]. Tento trend, v kombinaci s rostoucím rizikem rozsáhlých radiačních událostí vyplývajících ze současné geopolitické nestability, zdůrazňuje potřebu vývoje účinných radioprotektivních látek [3–5]. Stávající léčiva využívaná v radiační ochraně jsou však zásadně limitována. Dostupné látky vykazují nízkou účinnost, nebo jsou jejich klinické aplikace výrazně omezeny závažnými nežádoucími účinky, úzkým terapeutickým oknem či obtížemi spojenými s podáním [6].

Naše předchozí studie identifikovaly deriváty hydroxyethylpiperazinu jako účinné inhibitory PUMA-dependentní apoptózy, čímž položily základ pro racionální návrh nových radioprotektivních molekul. Na tomto základě jsme syntetizovali a experimentálně validovali sérii sloučenin, které prokázaly významný radioprotektivní účinek, včetně statisticky

signifikantního prodloužení přežití u ozářených myších modelů [7, 8]. Z této série byla identifikována tzv. vedoucí struktura (Obrázek 1), která sloužila jako výchozí bod pro systematickou optimalizaci.



Obrázek 1 Vedoucí struktura nově syntetizovaných sloučenin

V této práci prezentujeme hit-to-lead vývoj nových derivátů založených na uvedeném skeletu, kdy byly aplikovány cílené substituční reakce s cílem zlepšit farmakologický profil sloučenin (Tabulka 1). Byla provedena charakterizace jejich toxicity a biologické účinnosti, přičemž výsledky potvrzují potenciál této skupiny chemických látek jako východisko pro vývoj účinných a bezpečných radioprotektivních látek [9]. Pro porovnání byla do testu zahrnuta známá radioprotektivní látka amifostin (WR-2721) a její aktivní metabolit WR-1065.

Tabulka 1 Struktury testovaných derivátů 1-(4-(2-hydroxyethyl)piperazin-1-yl)-3-fenoxipropan-2-olu

Látka	Substituenty na základní struktuře
R23	3,4-dimethoxyfenyl
NŽ25	2-methoxy-4-nitrofenyl
NŽ38	4-fluorfenyl
NŽ40	3,4,5-trifluorfenyl
NŽ46/47	3-chlorfenyl
NŽ48/49	2-fluor-4-nitrofenyl
NŽ67	4-methoxy-2-nitrofenyl
NŽ68	4-chlor-3-nitrofenyl
NŽ69	4-(4-fluorfenoxy)fenyl

1 MATERIÁL A METODY

Pro stanovení toxicity a radioprotektivních vlastností testovaných látek byl použit test klonogenity. Pro experimenty byly zvoleny dvě immortalizované adherentní buněčné linie. Zdravé buňky byly reprezentovány normálními lidskými kožními fibroblasty NHDF (MatTek, USA) a jako nádorová buněčná linie byly vybrány buňky karcinomu děložního hrdla HeLa (ATCC, USA). Kultivace buněk probíhala v Dulbeccově modifikovaném Eaglově médiu suplementovaném látkou GlutaMAX™ (DMEM) (Gibco, Thermo Fisher, USA) suplementovaném fetálním bovinním sérem (Gibco, Thermo Fisher, USA, původ: Brazílie) na finální koncentraci 10 % (HeLa), resp. 15 % (NHDF) a 1% roztokem antibiotik penicilin/streptomycin (Sigma-Aldrich, USA).

Buňky byly kultivovány v 6jamkových destičkách v objemu 2 ml při hustotě 300 buněk na jamku. Po 24hodinové kultivaci byly k adherovaným buňkám přidány testované sloučeniny.

Následovala inkubace při 37 °C, 100% vlhkosti a 5 % CO₂ po dobu 10–14 dnů. Po inkubační fázi byly buňky fixovány a barveny 0,5% roztokem krystalové violeti ve směsi methanol:voda 7:3 (v/v).

Pro hodnocení radioprotektivních účinků byly testované látky aplikovány k NHDF buňkám po 24hodinové kultivaci v předem stanovené netoxické koncentraci (Tabulka 2). Jednu hodinu po aplikaci látek byly buňky ozářeny dávkou D₀.

Obarvené buňky byly následně naskenovány a analyzovány pomocí zařízení GelCount™ (Oxford Optronics, Spojené království), které představuje automatizovaný systém pro kvantifikaci buněčných kolonií na různých typech kultivačních destiček. Byla sledována plocha porostlá buňkami v jednotlivých jamkách. Frakce přežití (SF) byla vypočtena jako poměr plochy porostlé buňkami ve vzorku k ploše kontrolní, neovlivněné populace podle rovnice (1).

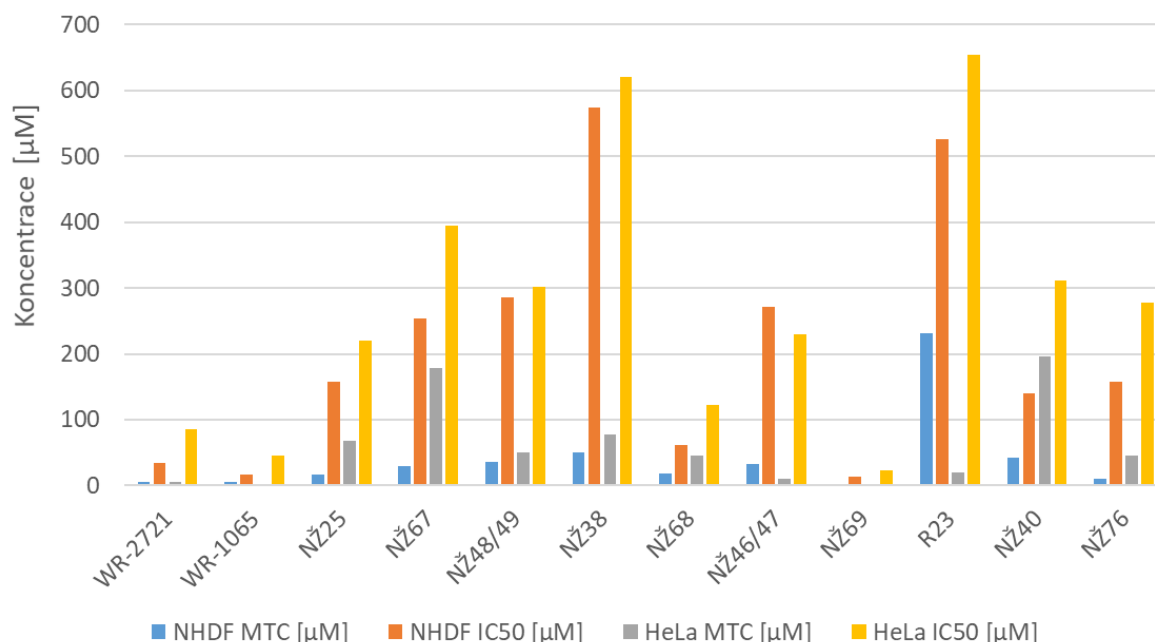
$$SF = \frac{A_{vzorek}[mm^2]}{A_{kontrola}[mm^2]} \quad (1)$$

Ozařování vzorků bylo zajištěno zdrojem gama záření ⁶⁰Co (přístroj Chisostat®) dávkovým příkonem v rozmezí 0,6–0,9 Gy/min.

2 VÝSLEDKY

2.1. Cytotoxicita na buněčných liniích NHDF a HeLa

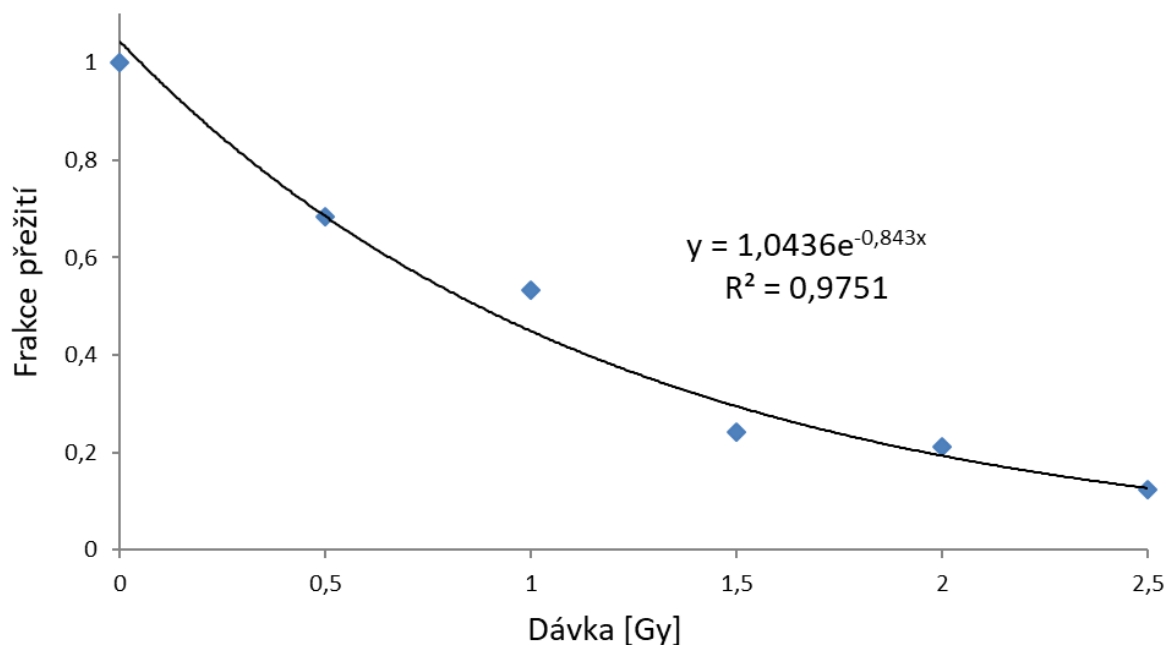
Cytotoxicita testovaných sloučenin byla hodnocena pomocí testu klonogenity na buněčných liniích NHDF a HeLa. U obou linií byly stanoveny hodnoty maximální tolerované koncentrace (MTC) a střední inhibiční koncentrace (IC₅₀) daných sloučenin. Nejtoxictější se ukázala látka NŽ69, která z tohoto důvodu byla vyřazena z dalších experimentů. Všechny ostatní deriváty piperazinu vykázaly nižší toxicitu než amifostin a WR-1065. Souhrn výsledků znázorňuje Obrázek 2.



Obrázek 2 Toxicita testovaných látek na NHDF a HeLa buňkách vyjádřená jako maximální tolerovaná koncentrace (MTC) a střední inhibiční koncentrace (IC₅₀)

2.2. Stanovení dávky D_0 na buněčné linii NHDF

Dávka D_0 představuje takovou dávku IZ, která sníží počet přežívajících jedinců na 37 % původní populace. Pro buněčnou linii NHDF byla dávka D_0 stanovena testem klonogenity. Viabilita buněk byla sledována po vystavení dávkám 0; 0,5; 1; 1,5; 2 a 2,5 Gy. Na základě získaných dat byla sestrojena křivka přežití (Obrázek 3) a vypočtena dávka D_0 , která činila 1,23 Gy.



Obrázek 3 Křivka přežití buněk NHDF po ozáření zdrojem gama záření

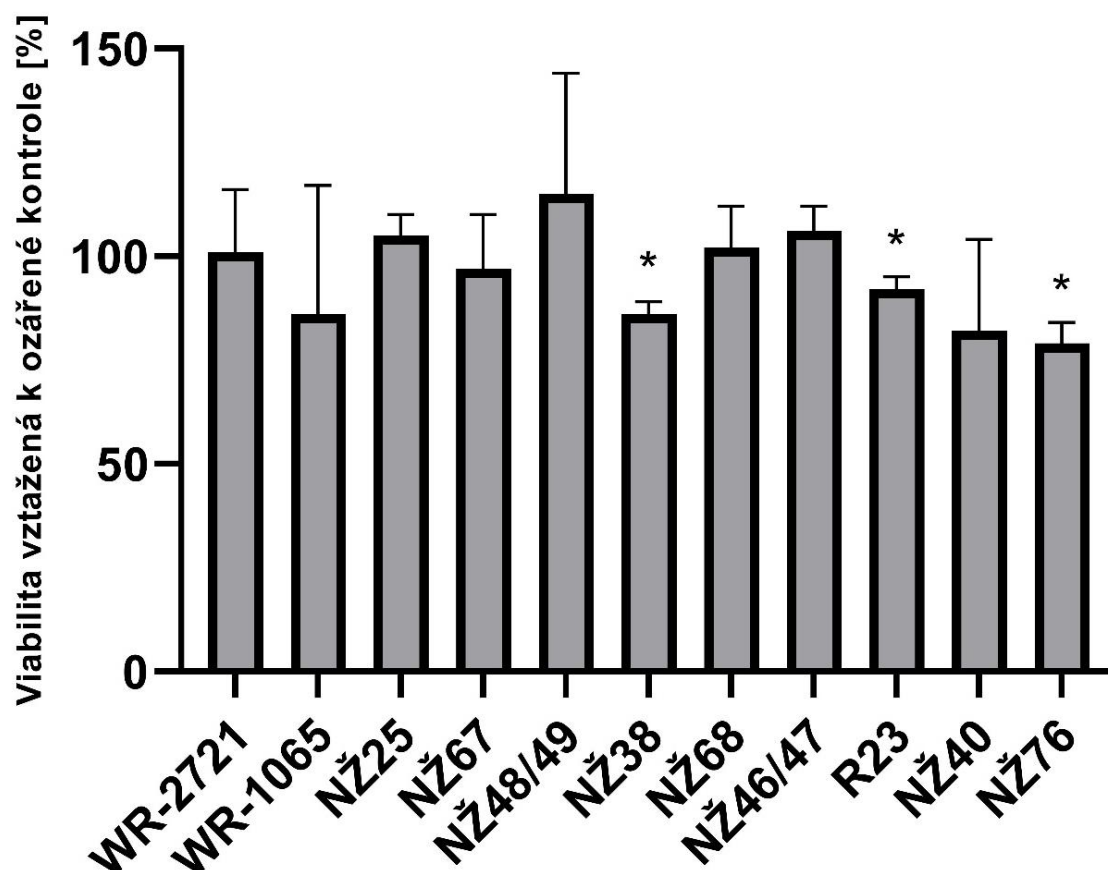
2.3. Radioprotekce na buněčné linii NHDF

Radioprotektivní účinek testovaných derivátů piperazinu na NHDF buňkách byl stanoven testem klonogenity. Buňky byly vystaveny dávce D_0 odpovídající 1,23 Gy (stanoveno experimentálně). Koncentrace jednotlivých látek byly stanoveny na základě výsledků cytotoxicity (Tabulka 2).

Tabulka 2 Použité netoxické koncentrace pro stanovení radioprotektivních účinků na NHDF buňkách

Látka	Koncentrace [μM]	Látka	Koncentrace [μM]
WR-2721	3	NŽ68	10
WR-1065	3	NŽ46/47	15
NŽ25	5	R23	100
NŽ67	15	NŽ40	20
NŽ48/49	15	NŽ76	5
NŽ38	25		

Zvýšení viability a schopnosti proliferace po ozáření bylo pozorováno u látek NŽ25 (105 %), NŽ48/49 (115 %), NŽ68 (102 %) a NŽ46/47 (106 %). Naproti tomu u amifostinu zvýšení viability pozorováno nebylo. Výsledky stručně shrnuje Obrázek 4.



Obrázek 4 Účinek testovaných derivátů na viabilitu NHDF buněk po expozici 1,23 Gy gama záření. Viabilita je vztažena k ozářené, neovlivněné kontrole (100 %). Chybové úsečky znázorňují standardní chybu průměru. (* $P < 0,05$)

3 DISKUZE

Současně dostupné prostředky k prevenci škodlivých účinků IZ mají řadu omezení. Přírodní látky jsou obecně méně toxické a lépe tolerované organismem, jejich radioprotektivní účinek je však slabý a většinou neselektivní vůči zdravým tkáním. Syntetické sloučeniny naopak vykazují vyšší účinnost, avšak často provázenou významnými nežádoucími účinky. Typickým příkladem je amifostin, nejúčinnější známá radioprotektivní látka, ovšem se závažnými nežádoucími projevy jako nevolnost, zvracení, únava či hypotenze [10–12].

Deriváty piperazinu představují perspektivní skupinu látek zkoumaných pro využití v radiační ochraně. Základem jejich struktury je piperazinový kruh, šestičlenná cyklická molekula se dvěma atomy dusíku, který umožňuje rozsáhlé chemické úpravy a tvorbu derivátů s rozdílnými biologickými účinky [13]. Mezi předpokládané mechanismy jejich radioprotektivního působení patří neutralizace reaktivních forem kyslíku, ovlivnění signálních drah, regulace apoptických proteinů (např. p53, Bax, Bcl-2), stabilizace mitochondriálních membrán, interakce s DNA či imunomodulační účinky [14–16].

V této studii byla testována série derivátů 1-(4-(2-hydroxyethyl)piperazin-1-yl)-3-fenoxipropan-2-olu z hlediska jejich toxicity a radioprotektivních účinků. S výjimkou NŽ69 všechny testované deriváty piperazinu vykazovaly výrazně nižší toxicitu než amifostin i jeho aktivní metabolit WR-1065 na všech testovaných buněčných liniích. Do další fáze testování tedy byly postoupeny všechny látky kromě toxické NŽ69.

Hodnocení radioprotektivního účinku probíhalo prostřednictvím testu klonogenity, jenž umožňuje nejen stanovit míru přežívání buněk, ale i jejich schopnost proliferovat a vytvářet

kolonie. U látek NŽ48/49, NŽ46/47, NŽ25 a NŽ68 byla zjištěna zvýšená buněčná proliferace, a to o 2–15 % oproti ozářené kontrolní skupině.

Naše pracoviště se podílelo na projektu, v jehož rámci byly radioprotektivní vlastnosti zkoumány na buněčné linii MOLT-4 pomocí apoptotického testu Annexin V/PI. Ukázalo se, že podání zkoumaných sloučenin v dávce 100 μ M dvě hodiny před ozářením 2 Gy vede ke zvýšení viability buněk. Nejvýraznější efekt byl zaznamenán u NŽ46/47 a NŽ38, kde viabilita dosáhla 143 % a 135 % oproti kontrolní skupině. Při dvojnásobné koncentraci (200 μ M) se viabilita dále zvýšila, u NŽ46/47 na 145 % a u NŽ38 na 137 %. Tato pozorování potvrzují dávkově závislý radioprotektivní účinek testovaných látek [9].

IZ vyvolává vznik chromozomálních aberací, přičemž dicentrické chromozomy (DC) patří k nejtypičtějším a slouží jako specifický biomarker expozice IZ, jehož frekvence se zvyšuje s dávkou záření [17, 18]. Snížení počtu DC po ozáření je tedy možné využít pro sledování míry radioprotektivního účinku. V naší paralelní práci proto byla využita metoda analýzy DC. Výsledky ukázaly, že většina nově syntetizovaných látek vykazuje vyšší radioprotektivní efekt než amifostin, přičemž největší pokles DC byl zaznamenán u NŽ48/49 (4,16 $\times$) a NŽ46/47 (2,69 $\times$) [9].

ZÁVĚR

Z výsledků provedených experimentů vyplývá, že nově připravené deriváty 1-(4-(2-hydroxyethyl)piperazin-1-yl)-3-fenoxipropan-2-olu představují nadějnou skupinu radioprotektivních látek. Většina testovaných sloučenin vykazovala nižší toxicitu než referenční amifostin a jeho aktivní metabolit WR-1065 a současně dosahovala pozitivních výsledků v testech klonogenity, apoptózy i v analýze DC. Nejslibnější molekuly NŽ48/49 a NŽ46/47 prokázaly významný radioprotektivní efekt, projevující se zvýšenou viabilitou buněk a redukcí počtu DC.

Tyto poznatky potvrzují, že cílená modifikace piperazinového skeletu může vést k látkám s příznivým toxikologickým profilem a vysokým potenciálem v oblasti radiační ochrany, a poskytují tak pevný základ pro další vývoj a optimalizaci účinných a bezpečných radioprotektivních sloučenin.

Použitá literatura

- [1] DELANEY, Geoff, Susannah JACOB, Carolyn FEATHERSTONE a Michael BARTON. The role of radiotherapy in cancer treatment. *Cancer* [online]. 2005, **104**(6), 1129–1137. ISSN 1097-0142. Dostupné z: doi:10.1002/cncr.21324
- [2] LIN, Eugene C. Radiation risk from medical imaging. *Mayo Clinic Proceedings* [online]. 2010, **85**(12), 1142–1146; quiz 1146. ISSN 1942-5546. Dostupné z: doi:10.4065/mcp.2010.0260
- [3] TROIANOVSKI, Anton. Putin Says West Risks Nuclear Conflict if It Intervenes More in Ukraine. *The New York Times* [online]. 2024 [vid. 2024-08-06]. ISSN 0362-4331. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2024/02/29/world/europe/putin-speech-ukraine-nuclear-conflict.html>
- [4] GORCHAKOV, Dmitry. *The radiation risks of seizing the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant* [online]. B.m.: The Bellona Foundation, Vilnius. 2023. Dostupné z: <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2023/06/The-Radiation-Risks-of-Seizing-the-Zaporizhzhia-Nuclear-Power-Plant.pdf>

- [5] TOON, Owen B., Charles G. BARDEEN, Alan ROBOCK, Lili XIA, Hans KRISTENSEN, Matthew MCKINZIE, R. J. PETERSON, Cheryl S. HARRISON, Nicole S. LOVENDUSKI a Richard P. TURCO. Rapidly expanding nuclear arsenals in Pakistan and India portend regional and global catastrophe. *Science Advances* [online]. 2019, 5(10), eaay5478. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.aay5478
- [6] CHMIL, Vojtěch, Alžběta FILIPOVÁ a Aleš TICHÝ. Looking for the phoenix: the current research on radiation countermeasures. *International Journal of Radiation Biology* [online]. 2023, 99(8), 1148–1166. ISSN 1362-3095. Dostupné z: doi:10.1080/09553002.2023.2173822
- [7] MAREK, Jan, Ales TICHY, Radim HAVELEK, Martina SEIFRTOVA, Alzbeta FILIPOVA, Lenka ANDREJSOVA, Tomas KUCERA, Lukas PRCHAL, Lubica MUCKOVA, Martina REZACOVA, Zuzana SINKOROVA a Jaroslav PEJCHAL. A novel class of small molecule inhibitors with radioprotective properties. *European Journal of Medicinal Chemistry* [online]. 2020, 187, 111606. ISSN 1768-3254. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejmech.2019.111606
- [8] FILIPOVA, Alzbeta, Jan MAREK, Radim HAVELEK, Jaroslav PEJCHAL, Marcela JELICOVA, Jana CIZKOVA, Martina MAJOROSOVA, Lubica MUCKOVA, Tomas KUCERA, Lukas PRCHAL, Miroslav PSOTKA, Natalie ZIVNA, Darja KOUTOVA, Zuzana SINKOROVA, Martina REZACOVA a Ales TICHY. Substituted Piperazines as Novel Potential Radioprotective Agents. *Molecules (Basel, Switzerland)* [online]. 2020, 25(3), 532. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules25030532
- [9] CHMIL, Vojtěch, Natálie ŽIVNÁ, Marcela MILANOVÁ, Alžběta FILIPOVÁ, Jaroslav PEJCHAL, Lukáš PRCHAL, Darina MUTHNÁ, Vít ŘEHÁČEK, Martina ŘEZÁČOVÁ, Jan MAREK, Aleš TICHÝ a Radim HAVELEK. Second-generation piperazine derivatives as promising radiation countermeasures. *RSC Medicinal Chemistry* [online]. 2024, 15(8), 2855–2866. ISSN 2632-8682. Dostupné z: doi:10.1039/D4MD00311J
- [10] ARORA, Rajesh, Damodar GUPTA, Raman CHAWLA, Ravinder SAGAR, Ashok SHARMA, Raj KUMAR, Jagdish PRASAD, Surinder SINGH, Namita SAMANTA a Rakesh Kumar SHARMA. Radioprotection by plant products: present status and future prospects. *Phytotherapy research: PTR* [online]. 2005, 19(1), 1–22. ISSN 0951-418X. Dostupné z: doi:10.1002/ptr.1605
- [11] KAMRAN, Mohammad Zahid, Atul RANJAN, Navrinder KAUR, Souvik SUR a Vibha TANDON. Radioprotective Agents: Strategies and Translational Advances. *Medicinal Research Reviews* [online]. 2016, 36(3), 461–493. ISSN 1098-1128. Dostupné z: doi:10.1002/med.21386
- [12] RAJ, Seema, Romila MANCHANDA, Meena BHANDARI a Md Sabir ALAM. Review on Natural Bioactive Products as Radioprotective Therapeutics :Present & Past Perspective. *Current Pharmaceutical Biotechnology* [online]. 2022. ISSN 1873-4316. Dostupné z: doi:10.2174/1389201023666220110104645
- [13] FAIZAN, Md, Rajnish KUMAR, Avijit MAZUMDER, SALAHUDDIN, Neelima KUKRETI, Arvind KUMAR a M. V. N. L. CHAITANYA. The medicinal chemistry of piperazines: A review. *Chemical Biology & Drug Design* [online]. 2024, 103(6), e14537. ISSN 1747-0285. Dostupné z: doi:10.1111/cbdd.14537

- [14] PANDA, Krishna Chandra, B MAMATHA DEVI A., J MANGALA K, Maya Krishna GUPTA, Pramod Bhaskar KUMAR, Harsha MAHAUR a P SIVASUBRAMANIAN. Exploring the Chemistry and Biological Activities of Piperazine Derivatives in Medicinal Chemistry. *NATURALISTA CAMPANO*. 2024, **28**(1), 2588–2596.
- [15] TICHY, A., J. MAREK, R. HAVELEK, J. PEJCHAL, M. SEIFRTOVA, L. ZARYBNICKA, A. FILIPOVA, M. REZACOVA a Z. SINKOROVA. New Light on An Old Friend: Targeting PUMA in Radioprotection and Therapy of Cardiovascular and Neurodegenerative Diseases. *Current drug targets* [online]. 2018, **19**(16) [vid. 2024-01-08]. ISSN 1873-5592. Dostupné z: doi:10.2174/1389450119666180406110743
- [16] BEGUM, Shaheen, M.S. RASHIDA ANJUM, G. Poojitha HARISREE, N. SIVALAKSHMI, P. PRIYANKA a K. BHARATHI. Antioxidant Activity of Piperazine Compounds: A Brief Review. *Asian Journal of Chemistry* [online]. 2020, **32**(9), 2105–2118. ISSN 0975427X, 09707077. Dostupné z: doi:10.14233/ajchem.2020.22832
- [17] HAVRÁNKOVÁ, Renata, Julia ČUPROVÁ, Martin FALK, Iva FALKOVÁ, Zuzana FREITINGER SKALICKÁ, Aleksander Nikolajevič GREBENYUK, Jiří HAVRÁNEK, Jan HORÁČEK, Ladislav JEBAVÝ, Emil KORMÚTH, Leoš NAVRÁTIL a Pavel ŽÁK. *Klinická radiobiologie*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2020. ISBN 978-80-271-1350-7.
- [18] ŘEZÁČOVÁ, MARTINA a VÁVROVÁ, JIŘINA. *Molekulární mechanismy účinku ionizujícího záření*. Hradec Králové: Nucleus HK, 2011. ISBN 978-80-87009-82-6.

Poděkování - podpora

Tato práce byla podpořena Ministerstvem zdravotnictví České republiky (projekt „Hit-to-lead vývoj malých molekul pro zlepšení radiační ochrany v terapii a diagnostice“, č. NU23-08-00256), Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt specifického výzkumu č. SV/FVZ202102) a Ministerstvem obrany České republiky „Dlouhodobý plán rozvoje organizace 1011“ – Zdravotnická problematika ZHN II Vojenské lékařské fakulty Hradec Králové Univerzity obrany (projekt č. DZRO-FVZ22-ZHN II). Na projektu spolupracovali kolegové z Lékařské fakulty v Hradci Králové Univerzity Karlovy a z Centra biomedicínského výzkumu Fakultní nemocnice Hradec Králové.

PŘÍNOSY POUŽITÍ POKROČILÝCH UHLÍKOVÝCH MATERIÁLŮ V OCHRANNÝCH ODĚVECH

BENEFITS OF USING ADVANCED CARBON MATERIALS IN PROTECTIVE CLOTHING

Lukáš Králík^{a*}, Pavel Častulík^b, Jakub Vaněk^a, Kamila Lunerová^a, Jiří Chrástek^b

^a Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., Kamenná 71, 262 31 Milín, Česká republika

^b DENKOTA, a.s., Volutová 2523, 158 00 Praha 5, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: kralik@sujchbo.cz, tel.: +420 517 546 133

Abstrakt

Příslušníci záchranných a obranných složek státu mohou být při své práci vystaveni působení různých škodlivých látek, včetně plynů, par, kouře, sazí, aerosolů a prachových částic, které mohou mít negativní vliv na jejich zdraví. Ochranné oděvy, které nejsou primárně protichemické, plně nechrání proti penetraci kapalných a pevných látek konstrukčními materiály oděvů ani proti permeaci látek na molekulové úrovni. Kromě toho mohou škodlivé látky pronikat také netěsnostmi mezi jednotlivými součástmi oděvu. Příkladem škodlivin, které představují riziko nejen pro příslušníky hasičských záchranných sborů, jsou karcinogenní produkty hoření. Tento příspěvek přináší návrhy na zvýšení ochranné úrovně oděvů a jejich doplňků použitím nových textilních materiálů na bázi aktivního uhlí. Studie srovnává schopnost různých typů uhlíkových textilií adsorbovat nebezpečné chemické látky, především z kategorií PAH. Zároveň se zabývá regenerací těchto textilií pro opakované použití při zachování mechanických a chemicko-fyzikálních vlastností.

Klíčová slova: Aktivní uhlí, ochranné oděvy, nebezpečné chemické látky

Abstract

Members of the state's rescue, defense and armed forces may be exposed during their work to various harmful substances, including gases, vapors, smoke, soot, aerosols, and dust particles, which can negatively affect their health. Protective garments that are not primarily designed for chemical protection do not fully prevent the penetration of liquid and solid substances through the construction materials of garments, nor against the permeation of substances at the molecular level. In addition, toxic substances can also enter through gaps between individual components of the clothing. An example of harmful substances posing a risk not only to fire rescue service personnel are carcinogenic combustion products. This contribution presents proposals for increasing the protective level of clothing and its accessories by using new textile materials based on activated carbon. The study compares the ability of various types of carbon textiles to adsorb chemical substances, particularly from the PAHs categories. It also addresses the regeneration of these textiles for repeated use while maintaining their mechanical and physicochemical properties.

Key words: Active carbon, Protective clothing, Toxic chemical compounds

Pozn. Uvedená stat' byla prezentována na jednání konference. Autoři neposkytli souhlas se zveřejněním jejího znění ve Sborníku statí MVK CBRN PROTECT 2025. Tato skutečnost byla vědeckým a organizačním výborem konference respektována.

DATOVÁNÍ URANOVÝCH ČÁSTIC V JADERNÉ FORENZNÍ VĚDĚ

AGE DATING OF URANIUM PARTICLES IN NUCLEAR FORENSICS

Jan Lorinčík^{a*}, Ivan Elantjev^{a,b}, Jakub Neumann^{a,c}, Kristína Sihelská^{a,b},
Daniela Veselá^a, Jan Gut^{a,b}

^a Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec, Česká republika

^b Katedra jaderné chemie, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, České vysoké učení technické v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha, Česká republika

^c Přírodovědecká fakulta, Universita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Pasteurova 15, 400 96 Ústí nad Labem, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: jan.lorincik@cvrez.cz, tel.: +420 266 173 662

Abstrakt

Datování uranu je klíčovou metodou v jaderné forenzní vědě, využívající radioaktivního rozpadu uranu a jeho produktů k určení doby, která uplynula od poslední chemické purifikace nebo úpravy materiálu. Měřením poměrů mateřských a dceřiných izotopů lze vypočítat "modelový věk" materiálu, což je nezbytné pro sledování jeho výrobní historie a identifikaci jeho původu v kontextu boje proti nezákonnému obchodování s jadernými materiály.

V tomto příspěvku je popsána metodika stanovení věku uranových částic založená na měření poměru $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ pomocí hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS).

Probíhající výzkum nadále zdokonaluje tuto metodiku a řeší výzvy, jako jsou extrémně nízká koncentrace ^{230}Th u "mladých" nízko-obohacených mikrometrových částic a potřeba standardizovaných protokolů.

Klíčová slova: datování uranu, jaderná forenzní věda, hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů, SIMS

Abstract

Uranium dating is a key method in nuclear forensics, utilizing the radioactive decay of uranium and its progeny to determine the time elapsed since the material's last chemical purification or modification. By measuring the ratios of parent and daughter isotopes, the "model age" of the material can be calculated, which is essential for tracing its production timeline and identifying its provenance in the context of combating illicit trafficking of nuclear materials.

This contribution describes a methodology for determining the age of uranium particles based on the measurement of the $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ ratio using secondary ion mass spectrometry (SIMS). Ongoing research continues to refine this methodology, addressing challenges such as the extremely low concentration of ^{230}Th in "young" low-enriched micrometer-sized particles and the need for standardized protocols.

Keywords: Uranium age dating, nuclear forensics, secondary ion mass spectrometry, SIMS

ÚVOD

Jaderná forenzní věda, známá také jako jaderná kriminalistika (anglicky *Nuclear Forensics*) [1], se zabývá analýzou jaderných a jiných radioaktivních materiálů v rámci policejního vyšetřování nebo soudního řízení souvisejícího s jadernou bezpečností. Z pohledu specializovaných laboratoří jde o vývoj a aplikaci technických metod a odborných znalostí, které umožňují odpovědět na otázky vyšetřovatelů týkající se původu, manipulace, transportu a možného záměru pachatele ve vztahu k zachycenému jadernému materiálu.

Kriminalistika jako celek – včetně té jaderné – je převážně komparativní vědou. To znamená, že získané důkazní materiály, předměty nebo stopy se porovnávají s referenčními vzorky, které lze spojit s konkrétními fyzickými nebo právními osobami. Příkladem může být zachycený vzorek uranové palivové peletky, který je třeba porovnat s evidovaným vzorkem uranu od držitele povolení k nakládání s jaderným materiálem – obdobně jako se porovnává otisk prstu z místa činu s otiskem podezřelé osoby.

Vedle komparativních metod nabízí kriminalistika také prediktivní možnosti. V klasické kriminalistice může jít například o odhad doby úmrtí oběti. V jaderné kriminalistice je klíčovou prediktivní metodou stanovení věku jaderného materiálu, tedy doby, která uplynula od jeho výroby, případně od poslední chemické separace či purifikace.

Znalost doby výroby materiálu obsahujícího uran, plutonium nebo thorium může významně přispět k identifikaci jeho zdroje. Význam této metody potvrzuje i Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), která ji zařadila mezi své nejvyšší výzkumné priority [2]. Stanovení věku umožňuje rozlišit čerstvě vyrobený štěpný materiál od materiálu pocházejícího z přebytečných zásob jaderných zbraní, což je zásadní pro monitorování případné budoucí Smlouvy o zákazu výroby štěpného materiálu (Fissile Material Cut-off Treaty) [3].

V Centru výzkumu Řež s.r.o. (CVŘ) vyvíjíme široké spektrum analytických metod, které mají za cíl zefektivnit podporu pro Policii České republiky, Státní úřad pro jadernou bezpečnost a další národní i mezinárodní instituce, včetně MAAE [4]. Mezi tyto metody patří i měření modelového věku jednotlivých uranových částic pomocí hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS).

Tato práce se zaměřuje na popis základních principů metody stanovení věku pomocí SIMS, možnosti jejího dalšího rozvoje prostřednictvím aglomerace částic a prezentaci prvních experimentálních výsledků.

1 PRINCIP DATOVÁNÍ URANU

1.1. Datování materiálů

Datování materiálů spadá obecně do oboru radiochronometrie, který se dlouhodobě rozvíjí zejména v geochemii při určování stáří minerálů [5]. Princip spočívá ve využití přirozených radioaktivních rozpadů, při nichž vznikají páry „mateřských“ a „dceřiných“ nuklidů – tzv. radiochronometry.

V případě datování uranu se nejčastěji uplatňují dva chronometry:

- $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$ s poločasem rozpadu $2,46 \times 10^5$ let
- $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$ s poločasem rozpadu $7,04 \times 10^8$ let

V této práci se zaměříme pouze na chronometr ^{230}Th – ^{234}U , protože izotop ^{231}Pa se ve většině případů vyskytuje v uranových částicích v mnohem menším množství než ^{230}Th , což výrazně omezuje možnosti jeho analýzy.

Radioaktivní rozpad mateřského izotopu na dceřiný, který se dále rozpadá, se řídí Batemanovou rovnicí [6]. Pro náš případ ji lze vyjádřit následovně:

$$\frac{N_{230}(t)}{N_{234}(t_0)} = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \cdot (e^{-\lambda_{234}t} - e^{-\lambda_{230}t}) \quad , \quad (1)$$

kde:

- $N_{230}(t)$ a $N_{234}(t)$ jsou počty izotopů ^{230}Th a ^{234}U v čase t ,
- $\lambda_{230} = 9,2 \times 10^{-6}$ rozpadů za rok,
- $\lambda_{234} = 2,8 \times 10^{-6}$ rozpadů za rok.

Pro krátké časové intervaly $t \ll 1/\lambda_{230}$ a $t \ll 1/\lambda_{234}$, lze exponenciální členy v rovnici (1) aproximovat pomocí prvních dvou členů Taylorova rozvoje, čímž získáme zjednodušenou formu:

$$\frac{N_{230}(t)}{N_{234}(t_0)} = \lambda_{234}t \quad . \quad (2)$$

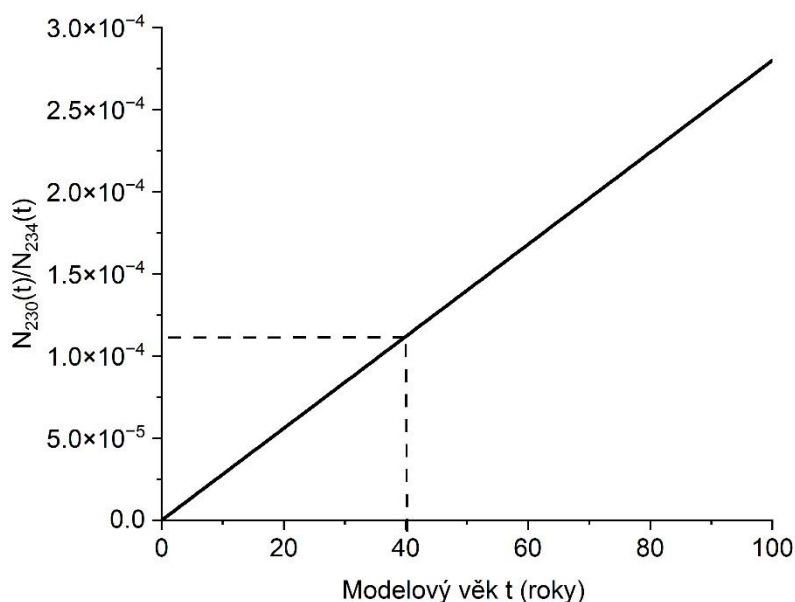
Při výpočtu tzv. modelového věku předpokládáme:

- že $N_{234}(t) \approx N_{234}(t_0)$,
- že na počátku t_0 nebyl v materiálu žádný izotop ^{230}Th , tedy $N_{230}(t_0) = 0$,
- že systém zůstává uzavřený, tj. nedochází k přísunu ani úbytku mateřského nebo dceřiného nuklidu z vnějšího prostředí.

Pro časové období do cca 100 let – což pokrývá prakticky celou historii jaderného průmyslu – se výsledky získané podle rovnic (1) a (2) liší jen nepatrně o zlomek procenta. Proto lze pro praktické výpočty použít zjednodušenou rovnici:

$$t = \frac{N_{230}(t)}{N_{234}(t_0)} \cdot \frac{1}{\lambda_{234}} \quad . \quad (3)$$

Pro kvantitativní představu je na Obr. 1 zobrazen nárůst poměru $N_{230}(t)/N_{234}(t)$ v závislosti na modelovém věku uranu podle rovnice (2), pokrývající období tzv. jaderného věku.



Obrázek 1 Nárůst poměru $N_{230}(t)/N_{234}(t)$ podle rovnice (2). Čárkovaná čára označuje přibližný věk uranových částic analyzovaných v této práci.

1.2. Datování uranových částic

Radiochronometr ^{230}Th – ^{234}U se již delší dobu využívá pro stanovení modelového věku uranu u objemových vzorků, a to jak pomocí radiometrických metod (např. alfa a gama spektrometrie), tak pomocí analytických technik, jako je hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS) [7].

Objemová analýza má však zásadní nevýhodu: pokud vzorek obsahuje směs jaderných materiálů z různých zdrojů, výsledkem je pouze průměrná hodnota, která může být zkreslená nebo neúplná. Z tohoto důvodu se v současnosti klade důraz na vývoj metod a přístrojů schopných analyzovat jednotlivé uranové částice.

Analýza mikrometrových uranových částic je však technicky velmi náročná, zejména z hlediska citlivosti a stability měřicích zařízení. Ilustrativní je následující příklad:

Částice U_3O_8 o průměru 2 μm obsahuje přibližně 8×10^{10} atomů uranu. Při přirozeném zastoupení izotopu $^{234}\text{U} \sim 5 \times 10^{-5}$ to odpovídá asi 4×10^6 atomů ^{234}U . Pokud předpokládáme modelový věk 40 let, pak podle Obr.1 je poměr $N_{230}(t)/N_{234}(t) \approx 1 \times 10^{-4}$, což znamená přibližně 400 atomů ^{230}Th .

Při typické detekční účinnosti (zahrnující ionizaci a přenos iontů Th^+) v rozmezí 5×10^{-3} až 1×10^{-2} budou detektorem zachyceny pouze 1–2 ionty $^{230}\text{Th}^+$. Podle Poissonovy statistiky to odpovídá nejistotě 70 – 100 %, což výrazně omezuje spolehlivost měření.

První experimenty s datováním mikroskopických uranových částic proto ukázaly, že metoda je použitelná pouze pro dostatečně velké, vysoce obohacené a starší částice [4, 8].

Od té doby se této problematice systematicky věnovala řada předních laboratoří v oblasti jaderné forenzní analýzy, které prokázaly, že s využitím přístroje SIMS s velkou geometrií (Large Geometry SIMS, LG-SIMS) lze stanovit modelový věk i u menších, mladších a méně obohacených částic:

- 1 μm částice obohacené na 20 % a více,

- 2 μm částice obohacené na 3 % a více,
- 3 μm částice již od přírodního zastoupení ^{235}U [9].

Těchto pokroků bylo dosaženo díky následujícím metodickým inovacím:

- Agregace sekvenčních měření jednotlivých částic se stejným obohacením a jejich zpracování jako jednoho souhrnného měření, v kombinaci s pokročilými statistickými metodami [9, 10].
- Použití primárního iontového svazku O_3^- , který oproti běžně používaným O^- , O_2^- nebo O_2^+ výrazně zvyšuje iontový výtěžek pro U^+ i Th^+ [11].

Datování submikrometrových částic nebo mikrometrových částic s přírodním či nižším obohacením ^{235}U zatím zůstává mimo možnosti současné experimentální techniky a analytických postupů.

2 EXPERIMENT

2.1. Datování uranu při paralelním měření více částic

V Centru výzkumu Řež (CVŘ) je k dispozici přístroj typu SIMS s malou geometrií (*Small Geometry SIMS*, SG-SIMS), který oproti variantě s velkou geometrií LG-SIMS vykazuje několik významných analytických omezení. Mezi hlavní nevýhody při datování jednotlivých uranových částic patří:

- nižší transmise iontů při vysokém hmotnostním rozlišení,
- monokolektorová detekce, která neumožňuje simultánní měření více iontových signálů.

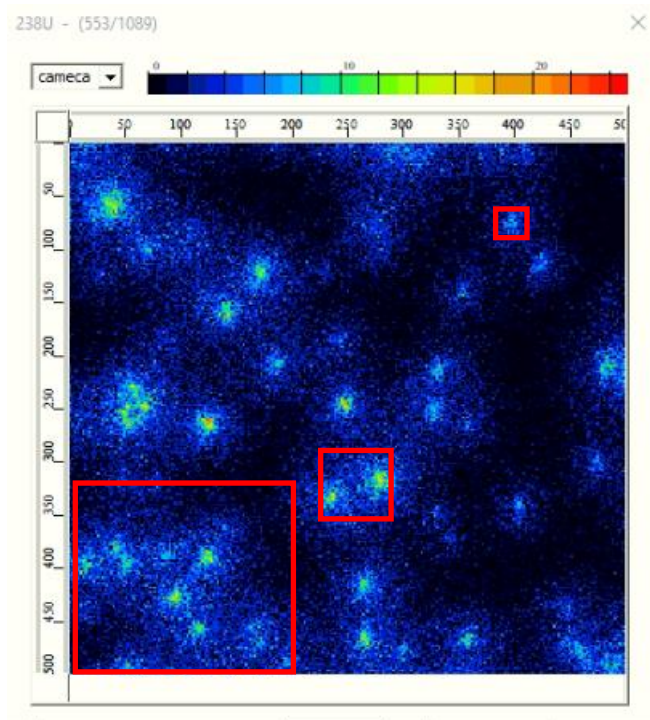
Jedním ze způsobů, jak tyto nevýhody kompenzovat, je paralelní analýza více uranových částic se stejným obohacením.

Pro testování této metody byl použit přístroj CAMECA IMS-7f (CAMECA SAS, Francie), SG-SIMS vybavený duoplazmatronovým zdrojem kyslíku. Na vzorek – křemíkový plátek s nanesenými uranovými částicemi – dopadal iontový svazek O_2^+ o energii 15 keV. Vzorek byl nastaven na potenciál 5 kV, což definovalo dopadovou energii iontů 10 keV a zároveň urychlovací napětí sekundárních iontů 5 kV. Proud primárního svazku byl upravován podle velikosti rastované oblasti (viz dále). Další parametry nastavení přístroje:

- hmotnostní rozlišení: $m/\Delta m=1200$,
- energetický interval sekundárních iontů: $\Delta E=50$ eV,
- integrační doby:
 - pro 1 částici: $^{230}\text{Th}^+ - 9$ s, $^{234}\text{U}^+ - 2$ s,
 - pro 10 částic: stejné jako výše,
 - pro 16 částic: $^{230}\text{Th}^+ - 18$ s, $^{234}\text{U}^+ - 2$ s.

Pro přípravu testovacích vzorků byl použit certifikovaný referenční materiál CRM U010, tvořený částicemi oxidu uranu U_3O_8 o průměru $\sim 1,5$ μm s obohacením ^{235}U na 1 % [12]. Malé množství částic bylo rozptýleno v ethanolu a suspenze nanesena pipetou na vyleštěný křemíkový plátek o průměru 25 mm. Po odpaření ethanolu byl vzorek vložen do analyzační komory SIMS.

Na Obr. 2 je znázorněna izotopová mapa signálu $^{238}\text{U}^+$, získaná pomocí SIMS. Světlé bodové objekty představují jednotlivé uranové částice. Rastrovaná oblast měla velikost $500\text{ }\mu\text{m} \times 500\text{ }\mu\text{m}$. Cílem tohoto měření bylo určit polohu částic, přičemž bylo spotřebováno několik procent jejich materiálu.

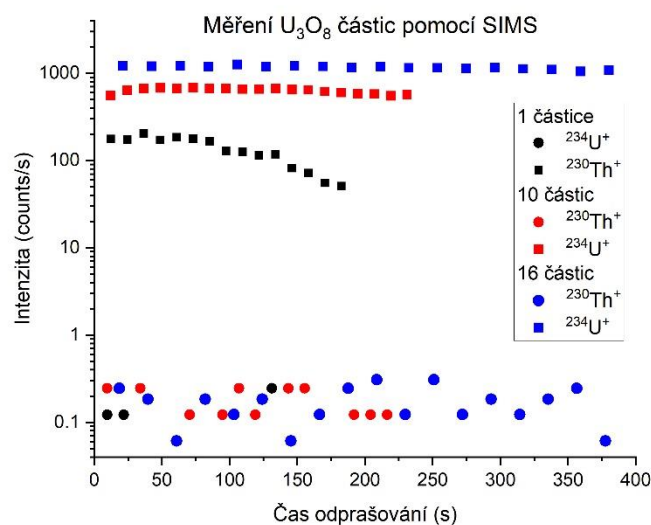


Obrázek 2 Obrázek $500\text{ }\mu\text{m} \times 500\text{ }\mu\text{m}$ plošného rozložení $^{238}\text{U}^+$ změřeného pomocí SIMS. Měřeným materiálem byly referenční uranové částice U_3O_8 s obohacením 1 % [12] nanesené na křemíkové podložce. Tři čtvercové oblasti o velikostech $15\text{ }\mu\text{m} \times 15\text{ }\mu\text{m}$, $60\text{ }\mu\text{m} \times 60\text{ }\mu\text{m}$, $150\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$ obsahují 1, 10, 16 uranových částic a definují oblasti integrace signálu při měření poměru N_{230}/N_{234} .

Následně byla provedena tři měření poměru signálů $^{230}\text{Th}^+/^{234}\text{U}^+$ vybraných částic:

- 1) 1 částice – proud 8 nA, plocha $15\text{ }\mu\text{m} \times 15\text{ }\mu\text{m}$,
- 2) 10 částic – proud 50 nA, plocha $60\text{ }\mu\text{m} \times 60\text{ }\mu\text{m}$,
- 3) 16 částic – proud 100 nA, plocha $150\text{ }\mu\text{m} \times 150\text{ }\mu\text{m}$.

Na Obr. 3 je znázorněn průběh intenzit signálů $^{230}\text{Th}^+$ a $^{234}\text{U}^+$ během měření. Při analýze jediné částice je patrný pokles signálu $^{234}\text{U}^+$ v čase, způsobený spotřebováváním materiálu a signál $^{230}\text{Th}^+$ byl ve 12 z 15 měřených bodů nulový. Naproti tomu při paralelní analýze více částic byl signál $^{234}\text{U}^+$ stabilní v rámci po celou dobu analýzy. Měření 16 částic navíc umožnilo prodloužení integrační doby na dvojnásobek oproti jednočásticovému měření.



Obrázek 3 Intenzity $^{234}\text{U}^+$ (čtvercové symboly) a $^{230}\text{Th}^+$ (kulaté symboly) v závislosti na čase měření. Pokles intenzity $^{234}\text{U}^+$ indikuje ubývání materiálu částice. U měření s 16 částicemi byla prodloužena integrační doba $^{230}\text{Th}^+$.

Tabulka 1 shrnuje výsledky měření zobrazené na Obr. 3. Pro výpočet modelového věku podle rovnice (3) bylo nejprve nutné korigovat naměřený poměr intenzit:

$$\bar{I}(^{230}\text{Th}^+)/\bar{I}(^{234}\text{U}^+)$$

na rozdílné užitečné iontové výtěžky (*Useful Ion Yields*, UY) iontů Th^+ a U^+ . Užitečný iontový výtěžek je definován jako poměr mezi počtem detekovaných iontů daného typu a celkovým počtem atomů téhož prvku obsažených ve spotřebovaném objemu materiálu – v případě částic tedy v objemu celé částice.

Experimentálně lze UY stanovit změřením počtu detekovaných iontů pomocí SIMS a objemu částice pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM). Při znalosti hustoty materiálu (např. UO_2) lze výtěžek pro izotop $^{238}\text{U}^+$ vyjádřit rovnicí:

$$UY(^{238}\text{U}^+) = \frac{\bar{I}(^{238}\text{U}^+) \cdot T}{\frac{\rho(\text{UO}_2) \cdot V}{M(\text{UO}_2)} \cdot N_A \cdot A_{238}}, \quad (4)$$

kde:

- $\bar{I}(^{238}\text{U}^+)$ je střední intenzita signálu (counts/s),
- T je doba měření (s),
- $\rho(\text{UO}_2)$ je hustota oxidu uranu (g/cm^3),
- V je objem částice (cm^3),
- $M(\text{UO}_2)$ je molární hmotnost (g/mol),
- N_A je Avogadrova konstanta,
- A_{238} je izotopové zastoupení ^{238}U v částici.

Analogická rovnice platí i pro výpočet UY pro $^{230}\text{Th}^+$. Důležité je, že nezáleží na tom, který izotop uranu nebo thoria je použit pro stanovení výtěžku – klíčové je zachování stejné matrice, tedy v našem případě typu oxidu.

V rámci této práce nebyly k dispozici referenční částice U a Th, a proto byla pro korekci poměru atomů N_{230}/N_{234} použita hodnota poměru užitečných iontových výtěžků:

$$\text{UY}(\text{Th}^+)/\text{UY}(\text{U}^+) \approx 0,76$$

odvozená od hodnoty z publikace [9], kde bylo měření provedeno na stejném typu SIMS jako v CVŘ. Tímto číslem byly vynásobeny poměry průměrných intenzit ze 6. sloupce Tabulky 1, čímž byly získány korigované poměry N_{230}/N_{234} uvedené v 7. sloupci. Modelový věk byl následně vypočten podle rovnice (3).

Neuvádíme nejistoty vypočtených hodnot modelového věku, protože nemáme k dispozici vlastní experimentální hodnotu poměru užitečných iontových výtěžků. Z tabulky je však patrné, že hlavním zdrojem nejistoty při určení věku částic je nejistota měření signálu $^{230}\text{Th}^+$.

Tabulka 1 Výsledky měření z Obr.3. Směrodatná odchylka σ se vztahuje k hodnotám ve sloupcích nalevo od ní.

Počet paralelně měřených částic	Průměrná intenzita $\bar{I}(^{230}\text{Th}^+)$ (counts/s)	σ (%)	Průměrná intenzita $\bar{I}(^{234}\text{U}^+)$ (counts/s)	σ (%)	$\bar{I}(^{230}\text{Th}^+)/\bar{I}(^{234}\text{U}^+)$	N_{230}/N_{234}	Model. věk (roky)
16	0,172	15	1180	0,5	$1,5 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	40
10	0,106	28	648	0,7	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-4}$	45
1	0,033	50	133	1,6	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$	66

2.2. Aglomerace uranových částic

Postup stanovení věku uranových částic popsáný v předchozí podkapitole je použitelný pouze tehdy, pokud je předem známo, že stíraný vzorek obsahuje částice jednoho obohacení a z jednoho zdroje. V praxi se však často setkáváme se směsí populací částic s různým obohacením v rámci jednoho vzorku. V takových případech je nutné částice se stejným obohacením a původem separovat od ostatních, a to pomocí mikromanipulačních metod.

V této práci jsme testovali metodu manipulace založenou na elektrostatických silách mezi manipulační jehlou a uranovou částicí. V závislosti na elektronických vlastnostech částic může jít o:

- dielektroforetickou sílu vznikající polarizací částice,
- nebo Coulombické přitahování/odpuzování způsobené akumulací povrchového náboje [13].

Pro testování elektrostatické manipulace jsme použili optický mikroskop Nikon Eclipse LV100ND (Nikon Corp., Japonsko) vybavený dvěma mikromanipulátory Transferman 4r (Eppendorf SE, Německo). Jehla mikromanipulátoru byla elektricky izolována od uzemněného držáku a připojena tenkým vodičem ke zdroji stejnosměrného napětí ± 32 V (model 2280S-32-6, Keithley Instruments, USA). Při přibližování k částici bylo na jehlu aplikováno napětí +1 V, které vyvolalo přerozdělení náboje a vznik dielektroforetické síly působící na částici.

Pozorování však ukázala, že přenos částic byl ovlivněn nejen elektrostatickými silami, ale také dalšími vlivy, jako jsou kmity konce jehly a přerušované doteky mezi jehlou a částicí. Průběh mikromanipulace byl sledován pomocí objektivu 100× s dlouhou pracovní vzdáleností, jak je znázorněno na Obrázku 4.



Obrázek 4 Jehla mikromanipulátoru skloněná pod úhlem 20° mezi objektivem 100x optického mikroskopu a povrchem křemíkové podložky s uranovými částicemi.

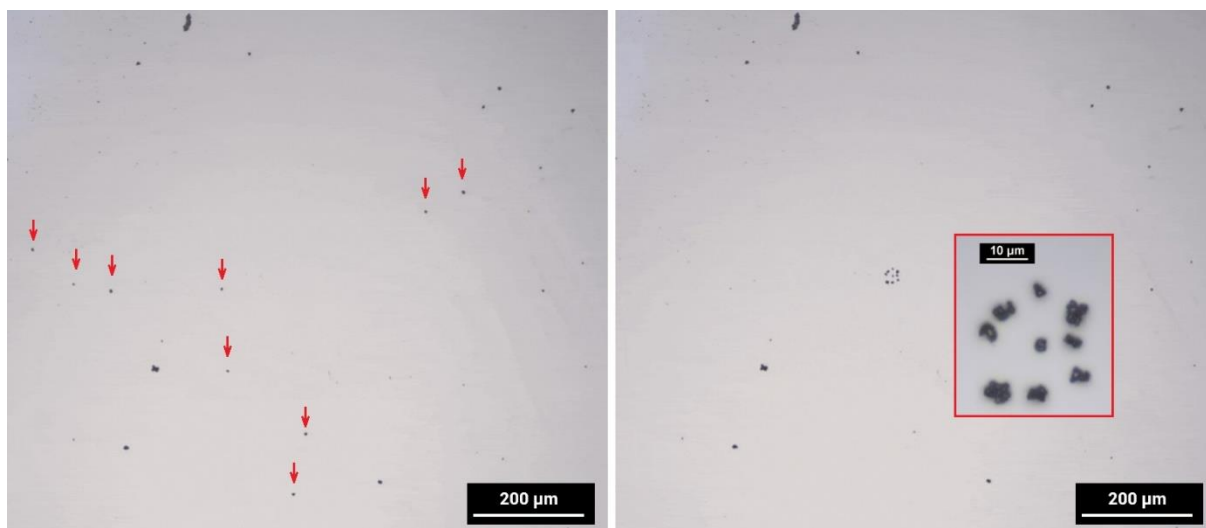
Vzorek s částicemi na křemíkové podložce byl připraven obdobně jako v předchozí kapitole, s tím rozdílem, že byl použit jiný certifikovaný referenční materiál – CRM 129-A, tvořený mikroskopickými částicemi oxidu uranu U_3O_8 s přírodním zastoupením ^{235}U (0,72 %) [12]. Kromě kruhového křemíkového plátku byly použity také obdélníkové (1 cm × 1,5 cm) a čtvercové (1 cm × 1 cm) křemíkové podložky.

Na Obrázku 5 je znázorněn počáteční (vlevo) a konečný stav aglomerace devíti uranových částic. Šipky na levém obrázku označují původní polohy částic. V rámečku jsou zobrazeny přenesené částice při vyšším zvětšení. Doba aglomerace těchto částic byla přibližně 30 minut.

Na dalším obrázku je znázorněn přenos částic mezi dvěma křemíkovými substráty o průměru 25 mm. V tomto experimentu byly přenášeny referenční částice CRM U200 oxidu uranu U_3O_8 s obohacením ^{235}U na 20 % [12]. Doba aglomerace deseti částic byla přibližně 60 minut.

Získaná experimentální data umožňují odhad limitů metody aglomerace částic pro účely stanovení jejich věku. Maximální velikost rastrované oblasti u přístrojů SG-SIMS i LG-SIMS je 500 μm × 500 μm . Při teoretickém uspořádání částic do čtvercové sítě s rozestupy 10–20 μm lze aglomerovat 625–2500 částic. Při rychlosti aglomerace 10 částic/hod předvedené v této práci by přenos maximálního počtu částic trval 63–250 hodin, což je neefektivní.

Nicméně přenos desítek částic je manuálně realizovatelný v přijatelném čase. Pro dosažení vyššího počtu částic a přiblížení se k limitu danému velikostí rastrované oblasti je nutné výrazně zvýšit rychlost aglomerace, ideálně prostřednictvím automatizace procesu.



Obrázek 5 Aglomerace uranových částic v rámci jedné křemíkové podložky. Šipky v levém obrázku ukazují polohy částic před jejich přenosem. Uprostřed pravého obrázku jsou vidět přenesené (aglomerované) částice, v rámečku pak tytéž částice při větším zvětšení.



Obrázek 6 Znárodnění přenosu částic mezi dvěma křemíkovými podložkami. Vložený obrázek vpravo nahoře ukazuje výsledné polohy 10 aglomerovaných částic na cílové podložce. Vzdálenosti mezi částicemi jsou ~10 μm.

ZÁVĚR

Datování částic jaderného materiálu, zejména uranu, patří mezi prioritní výzkumná témata v oblasti jaderné kriminalistiky a mezinárodních jaderných záruk. Analýza jednotlivých mikrometrových uranových částic je však mimořádně náročná, především kvůli nízkému počtu atomů dceřiného produktu ^{230}Th , což výrazně ovlivňuje přesnost měření.

Tuto skutečnost potvrdily experimenty prezentované v této práci. Měření věku jednotlivých částic o velikosti 1–2 μm, s nízkým obohacením, pomocí přístroje SG-SIMS v CVŘ vedlo k vysokým nejistotám, které výrazně omezují využitelnost výsledků pro kriminalistické nebo zárukové účely.

Za účelem snížení těchto nejistot byl navržen postup, při kterém se částice se stejným obohacením a ze stejného zdroje pomocí mikromanipulace přenesou na čistou podložku a sdruží do malé oblasti, aby mohly být analyzovány současně v rámci jednoho SIMS skenu. Experimenty s aglomerací částic potvrdily proveditelnost této metody, přičemž bylo dosaženo rychlosti přenosu 10 částic za hodinu a nejistoty stanovení věku částice se dostaly do přijatelných mezí.

Tato práce tak prokázala, že metoda aglomerace uranových částic může významně zvýšit přesnost stanovení modelového věku uranu, což otevírá perspektivu její aplikace i na submikrometrové částice nebo částice obsahující ochuzený uran.

Použitá literatura

1. IAEA. *Nuclear forensics in support of investigation*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. 62 s. ISBN 978-92-0-102115-1.
2. IAEA Safeguards Research and Development Plan - Enhancing Capabilities for Nuclear Verification, STR-385, 2018, 11.
3. GLASER A., BÜRGER S., Verification of a Fissile Material Cutoff Treaty: The case of enrichment facilities and the role of ultra-trace level isotope ratio Analysis, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2009, 280, 85-90.
4. LORINČÍK J., SIHELSKÁ K., ELANTYEV I., VESELÁ D., GUT J., Aktivita Centra výzkumu Řež v oblasti jaderně forenzních analýz, *CBRN Protect* 2023, 26. – 27.9.2023, ISBN 978-80-7582-265-9.
5. DICKIN, A. P., *Radiogenic Isotope Geology*, 3rd ed., 2018, Cambridge University Press.
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Bateman_equation
7. MAYER K., WALLENIS M., VARGA Z., Nuclear forensic science: Correlating measurable material parameters to the history of nuclear material, *Chemical Reviews*, 2013, 113, 884.
8. FAURÉ A.-L., DALGER T., Age Dating of Individual Micrometer-Sized Uranium Particles by Secondary Ion Mass Spectrometry: An Additional Fingerprint for Nuclear Safeguards Purposes, *Analytical Chemistry*, 2017, 89, 6663.
9. SZAKAL C., SIMONS D.S., FASSETT J.D., FAHEY A.J., Advances in age-dating of individual uranium particles by large geometry secondary ion mass spectrometry, *Analyst*, 2019, 144, 4219.
10. GROOPMAN E.E., WILLIAMSON T.L., POPE T.R., BRONIKOWSKI M.G., SCOTT S.M., WELLONS M.S., Uranium particle age dating, aggregation, and model age best estimators, *Analyst*, 2025, 150, 3089-3111.
11. GROOPMAN E.E., WILLIAMSON T.L., SIMONS D.S., Improved uranium particle analysis by SIMS using O_3^- primary ions, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2022, 37, 2089-2102.
12. CRM U010, CRM 129-A, CRM U200, New Brunswick Laboratory (DOE, U.S.A, dříve National Bureau of Standards)
13. YAMASHIMA A., SAITO S., Electrostatic manipulation of a dielectric microparticle considering surface conductivity using a single probe, 2009, 106, 114903.

Poděkování - podpora

Předkládané výsledky byly získány v rámci Open Access projektu PP0994 “Analýzy mikroskopických částic jaderného materiálu” v rámci využívání infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

CAVIPLASMA V TERÉNU: VALIDACE A VÝROBNÍ ZAJIŠTĚNÍ INOVATIVNÍ DEKONTAMINAČNÍ TECHNOLOGIE

CAVIPLASMA IN ACTION: VALIDATING AND ASSURING PRODUCTION OF AN INNOVATIVE DECONTAMINATION TECHNOLOGY

Blahoslav Maršálek^{a*}, Klára Odehnalová^a, Štěpán Zezulka^a, Pavel Šťáhel^b, Barbora Mayer^b, Radek Horňák^b, Jan Čech^b, Pavel Rudolf^c, Martin Hudec^c

^a Oddělení experimentální fykologie a ekotoxikologie, Botanický ústav AV ČR, v.v.i., Lidická 25/27, 602 00 Brno, Česká republika

^b Ústav fyziky a technologií plazmatu, Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita, Kotlářská 267/2, 611 37 Brno, Česká republika

^c Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Odbor fluidního inženýrství Viktora Kaplana, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: sinice@sinice.cz, tel.: +420 603 872 955

Abstrakt

Technologie CaviPlasma využívá kombinaci hydrodynamické kavitace a plazmových procesů k cílené dekontaminaci vody, zejména k odstraňování biologických a chemických polutantů. Zařízení bylo úspěšně ověřeno v laboratorních i reálných podmínkách, kde prokázalo svou účinnost při selektivní eliminaci sinic. Zátěžové testy potvrdily stabilní výkon i při zvýšeném objemu zpracované vody v řádech tisíců litrů za hodinu. Na základě provozních zkušeností byly optimalizovány technické parametry pro škálování systému. Klíčovým milníkem bylo nalezení výrobce splňujícího požadavky na kvalitu, kapacitu a servis, což představuje zásadní krok k převodu vědecké invence do výroby a k praktickému nasazení technologie v reálných podmínkách. Právě tento klíčový krok výzkumu a vývoje se často nedaří, ale technologie CaviPlasma se tím řadí mezi pozitivní příklady uvádění vědy do praxe.

Klíčová slova: dekontaminace, sinice, cyanotoxiny, kavitace, nízkoteplotní plazma

Abstract

CaviPlasma technology uses a combination of hydrodynamic cavitation and plasma processes to decontaminate water by removing biological and chemical pollutants. The device has been successfully tested in laboratory and real-life conditions, demonstrating its potential in the selective elimination of cyanobacteria. Stress tests demonstrate stable performance, even with water volumes reaching thousands of liters per hour. Based on operational experience, the technical parameters for scaling up the system have been optimised. A key milestone was finding a manufacturer that met quality, capacity, and service requirements. This represents a major step towards the practical deployment of CaviPlasma technology in real-world conditions. This important step advances the practical application of CaviPlasma technology, demonstrating success in translating scientific innovation into commercial production.

Key words: decontamination, cyanobacteria, cyanotoxins, cavitation, cold plasma

ÚVOD

Eutrofizace tedy zvýšená koncentrace živin, především fosforu a dusíku, vede k rychlému růstu biomasy sinic, které jsou schopny se za příznivých podmínek masově rozmnožovat a vytvářet tzv. květy sinic. Tyto fotosyntetické prokaryotické mikroorganismy jsou schopné produkovat

různé sekundární metabolity, z nichž některé jsou toxické, tzv. cyanotoxiny. Cyanotoxiny mohou mít účinek hepatotoxický (např. mikrocytin), neurotoxický (např. anatoxin-a) či cytotoxický, a představují významné riziko jak pro ekosystémy, tak pro zdraví člověka a živočichů. Navíc sinice při rozkladu organické hmoty spotřebovávají významné množství rozpuštěného kyslíku ve vodním prostředí, což může vést k ohrožení ekosystému vlivem hypoxických podmínek. Přítomnost sinic a jejich toxinů v povrchových vodách má za následek často zhoršení kvality vody, snížení biodiverzity a omezení využití vodních zdrojů [1,2].

K odstranění sinic se využívá mimo jiné peroxid vodíku (H_2O_2), na které jsou mnohem citlivější než zelené řasy a rozsivky, což umožňuje jejich selektivní bez výrazného negativního dopadu na ostatní fytoplankton [3]. Cyanotoxiny mohou být zase účinně odstraňovány chemickými oxidačními metodami [4]. Tvorbu peroxidu vodíku a dalších silných oxidačních činidel jako ozón či hydroxylový radikál umožňuje *in-situ* technologie CaviPlasma. Tato inovativní technologie kombinuje hydrodynamickou kavitaci s nízkoteplotním plazmovým výbojem, čímž vytváří synergický efekt s výrazně vyšší oxidační silou a schopností odbourávat širokou škálu biologických i chemických kontaminantů [5,6].

1 TECHNOLOGIE CAVIPLASMA – PRINCIP, POUŽITÍ, SOUČASNÝ STAV

Technologie CaviPlasma je založena na synergii dvou fyzikálně-chemických procesů: hydrodynamické kavitace a nízkoteplotního studeného plazmatu. Hydrodynamická kavitace vytváří v kapalině oblasti s velmi nízkým tlakem, kde dochází k přeměně kapaliny na páru, což umožňuje zapálení plazmového výboje mezi elektrodami připojenými na vysoké napětí. V tomto prostředí dochází k plazmochemickým reakcím, které vedou k tvorbě vysoce reaktivních radikálů kyslíku, dusíku a síry, mezi nimiž jsou klíčové hydroxylové radikály, peroxidy a ozon. Současně je generováno také UV-C záření, které působí přímo na mikroorganismy a toxické látky, čímž se zvyšuje účinnost destrukce sinic, bakterií a organických polutantů.

V současnosti jsou publikovány například přístupy, které se snaží implementovat plazmatické technologie do procesů čištění vody prostřednictvím produkce jemno-bublinné aerace [7] či pomocí vysokotlaké trysky, jež nasměruje plazmou ošetřený plyn do nádoby s vodou [8]. Tyto metody však umožňují zpracování pouze jednotek litrů vody za hodinu, což je nejen technicky nepraktické, ale zároveň energeticky náročné a tím limitující jejich aplikaci v dostatečném měřítku. CaviPlasmová (CP) jednotka je schopna produkovat tisíce litrů ošetřené vody za hodinu, což je podstatný rozdíl od doposud publikovaných technologií, které ošetří maximálně jednotky litrů za hodinu [9,10]. V aktuální verzi umožňuje reálné technologické aplikace jako pokročilá oxidační technologie na rozklad široké škály toxických látek, farmak, pesticidů, biotoxinů, včetně bojových a CBRN látek a mikroorganismů včetně cyanobakterií [6,11]. CaviPlasmová jednotka je stále vylepšována a lze ji upravovat a dle požadované aplikace. Škálovatelná je v současné fázi nejen kapacita a spektrum produkce radikálů s možností přísávat vzduch a rozšířit tak spektrum dusíkových radikálů pro detoxikaci látek v aplikacích pro IZS, nebo zvýšenou dezinfekci, nebo ozon, nebo také přísávat feráty (šestimocné železo pro oxidaci a detoxikaci). Volit lze dle potřeby také objemy zásobníků a objemy ošetřené tekutiny.

1.1. Způsoby použití CP jednotky

CaviPlasmová jednotka může fungovat v modu i) přímého průchodu ošetřované tekutiny tzv. přímá dekontaminace nebo ii) jako výrobce plazmou ošetřené vody. Každá varianta má své využití. Zatímco přímá dekontaminace je vhodná zejména na rozklad chemických polutantů, plazmou ošetřená voda se dá využít pro výrobu dezinfekčních roztoků na operační sály jako

prevence nozokomiálních infekcí, dezinfekce veřejných prostor při epidemiích (a tím omezení vnosu perzistentních biocidních látek) apod.

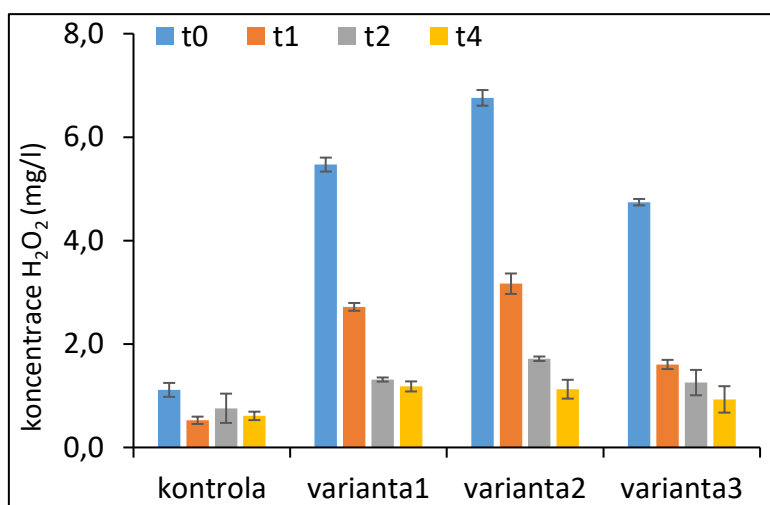
1.2. Terénní testování

Mezokosmové terénní pokusy byly prováděny na sinicemi zasažené vodě v bývalé požární nádrži v obci Veselí (Lomnice). Ve fytoplanktonním společenstvu byly zastoupeny jak sinice (převážně rodu *Microcystis*), tak eukaryotické řasy. V tomto pokusu jsme ověřovali mobilní modulární zařízení s kapacitou 4 m³/h (varianta 3) a výkonem 4 kW. Funkčnost a účinnost byla porovnávána s jednotkou s kapacitou 1.5 m³/h s výkonem 1,5kW (varianta 1) a také 4kW (varianta 2). Objem ošetřené vody byl 1000 litrů. Celkově proces ošetření trval 36 minut (Obrázek 1).



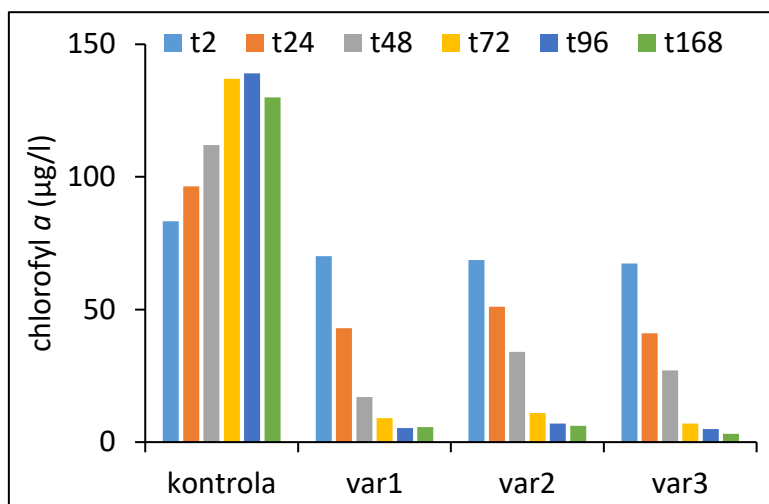
Obrázek 1 Experimentální uspořádání terénního pokusu

V průběhu ošetření byl orientačně sledován obsah peroxidu vodíku (Quantofix® Peroxyde 25, Macherey-Nagel GmbH & Co.KG, Dueren, Germany), který slouží jako indikátor účinnosti jednotky. Nejvyšší obsah peroxidu vodíku byl zaznamenán u varianty 2, zatímco u varianty 3 byl obsah peroxidu vodíku nejnižší (Obrázek 2). Úbytek peroxidu vodíku byl pak průběžně sledován.

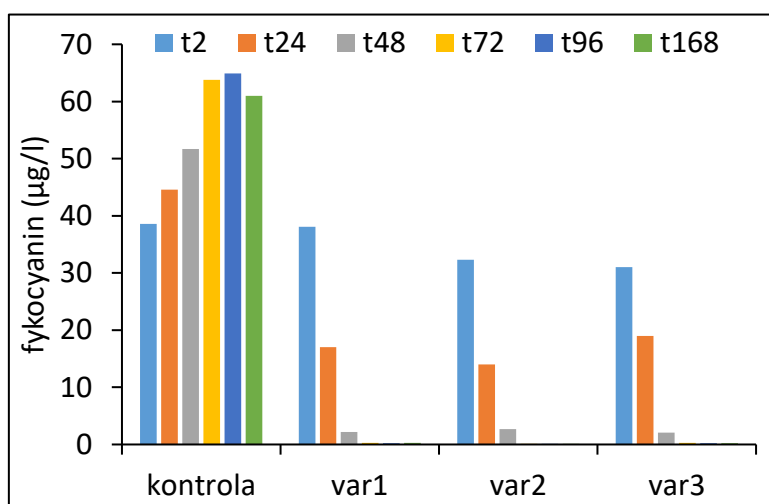


Obrázek 2 Naměřený obsah peroxidu vodíku po ošetření CP jednotkou a jeho vývoj v čase 0-4 hodiny po ošetření

Efektivita ošetření byla hodnocena měřením fotosyntetické aktivity sinic a řas a také monitorováním hladin fotosyntetických pigmentů. Fotosyntetická aktivita sinic a řas byla sledována pomocí metody PAM (AquaPen AP110-C; Photon System Instruments, Drásov). Obsah fotosyntetických pigmentů – chlorofylu a a fykocyaninu byl měřen sondou YSI exo (Xylem Inc., USA). Z dat měření fotosyntetické aktivity lze konstatovat, že všechny tři varianty konfigurace CP jednotky v porovnání s kontrolou negativně ovlivnily primární procesy fotosyntézy u populace sinic. Naopak populace eukaryotických řas byla ovlivněna minimálně a ošetření umožnilo získat konkurenční výhodu populace řas nad populací sinic. Stejně závěry dokládají i data měření chlorofylu (Obrázek 3) a fykocyaninu (Obrázek 4).



Obrázek 3 Obsahu chlorofylu po ošetření CP jednotkou a jeho vývoj v čase 0-168 hodin po ošetření



Obrázek 4 Obsahu fykocyaninu po ošetření CP jednotkou a jeho vývoj v čase 0-168 hodin po ošetření

Jednotlivé varianty se lišily i vizuálně (viz **Obrázek 1**), kdy kontrola rostla spolehlivě, což je důležité pro porovnání vlivů. Varianty 1 a 3 byly charakteristické šedým zákalem, pravděpodobně kvůli mikrobiálnímu rozkladu. Při porovnání jednotek s kapacitou 1,5m³/h s různými výkony (1,5 a 4 kW) lze konstatovat, že ačkoliv v případě výkonnější jednotky neprošla část populace sinic kavitací, množství peroxidu, které při plazmovém ošetření vody vzniklo, bylo dostatečné a 95 % populace sinic bylo eliminováno v polovičním čase.

Nicméně stejně jako každá technologie i CaviPlasma má své limity. Naměřená data fotosyntetické aktivity také prokázala, že účinek CaviPlasmy nebyl letální a malá populace sinic přežila. Navíc je rozpad sinic doprovázen uvolněním buněčného obsahu spolu s cytotoxiny. Je proto potřeba na tomto dále pracovat a zkoumat danou problematiku, aby bylo možné přesně stanovit a zlepšit účinnost jednotky případně stanovit podmínky jejího použití.

ZÁVĚR

Technologie CaviPlasma je zcela nové originální řešení vycházející z výzkumu moravských vědeckých pracovišť, které může nalézt uplatnění jako dekontaminační technologie pro potřeby IZS např. při haváriích.

Terénní pokus potvrdil rychlý a intenzivní účinek ošetření vody CaviPlasmou na populaci sinic, zprostředkovaný zřejmě zvýšenou koncentrací peroxidu vodíku a dalších radikálů v prvních hodinách po ošetření. Účinnost odstranění nežádoucích mikroorganismů demonstrovanou na tomto modelovém organismu technologií CaviPlasma se ukazuje jako vysoká, a proto bude otázkou dalšího výzkumu a potřebách státu, kde bude strategicky vhodné začít tuto novou technologii využívat v praxi.

Použitá literatura

1. Metcalf, J.S.; Codd, G.A. Co-Occurrence of Cyanobacteria and Cyanotoxins with Other Environmental Health Hazards: Impacts and Implications. *Toxins* **2020**, *12*, doi:10.3390/toxins12100629.
2. Codd, G.A.; Morrison, L.F.; Metcalf, J.S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicology and Applied Pharmacology* **2005**, *203*, 264-272, doi:10.1016/j.taap.2004.02.016.
3. Drábková, M.; Admiraal, W.; Marsálek, B. Combined exposure to hydrogen peroxide and light -: Selective effects on cyanobacteria, green algae, and diatoms. *Environmental Science & Technology* **2007**, *41*, 309-314, doi:10.1021/es060746i.
4. Zhan, M.; Hong, Y. Recent Advances in Technologies for Removal of Microcystins in Water: a Review. *CURRENT POLLUTION REPORTS* **2022**, *8*, 113-127, doi:10.1007/s40726-022-00215-w.
5. Odehnalova, K.; Cech, J.; Marsalkova, E.; St'ahel, P.; Mayer, B.; Santana, V.T.; Rudolf, P.; Marsalek, B. Exploring the dynamics of reactive oxygen species from CaviPlasma and their disinfection and degradation potential - the case of cyanobacteria and cyanotoxins. *Environmental Science and Pollution Research International* **2025**, *32*, 849-863, doi:10.1007/s11356-024-35803-4.
6. Cech, J.; Stahel, P.; Rahel, J.; Prokes, L.; Rudolf, P.; Marsalkova, E.; Marsalek, B. Mass Production of Plasma Activated Water: Case Studies of Its Biocidal Effect on Algae and Cyanobacteria. *Water* **2020**, *12*, doi:10.3390/w12113167.
7. Gao, Y.; Saedi, Z.; Shi, H.; Zeng, B.; Zhang, B.; Zhang, X. Machine Learning-Assisted Optimization of Microbubble-Enhanced Cold Plasma Activation for Water Treatment. *ACS ES&T WATER* **2024**, *4*, 735-750, doi:10.1021/acsestwater.3c00783.
8. Kumar, A.; Saini, V.; Huaccallo-Aguilar, Y.; Reinecke, S.; Hampel, U. Characterization of reactive species in water induced by cold atmospheric air plasma: Experimental applications for industrial micropollutant removal from wastewater and seed germination. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING* **2025**, *13*, doi:10.1016/j.jece.2025.117263.

9. Lee, S.; Ma, S.; Hong, Y.; Choi, M. Effects of pulsed and continuous wave discharges of underwater plasma on *Escherichia coli*. *SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY* **2018**, 193, 351-357, doi:10.1016/j.seppur.2017.10.040.
10. Machala, Z.; Tarabová, B.; Sersenová, D.; Janda, M.; Hensel, K. Chemical and antibacterial effects of plasma activated water: correlation with gaseous and aqueous reactive oxygen and nitrogen species, plasma sources and air flow conditions. *Journal of Physics D-Applied Physics* **2019**, 52, doi:10.1088/1361-6463/aae807.
11. Marsalek, B.; Marsalkova, E.; Odehnalova, K.; Pochyly, F.; Rudolf, P.; Stahel, P.; Rahel, J.; Cech, J.; Fialova, S.; Zezulka, S. Removal of *Microcystis aeruginosa* through the Combined Effect of Plasma Discharge and Hydrodynamic Cavitation. *Water* **2020**, 12, 14, doi:10.3390/w12010008.

Poděkování - podpora

Práce byla finančně podpořena projektem Ministerstva vnitra České republiky (Projekt č. VB02000041) s názvem CaviPlasma: širokospektrální velkoobjemová dekontaminační plazmová technologie pro IZS.

VYHODNOCENÍ RIZIK SPOJENÝCH S KONTAMINACÍ VEŘEJNÝCH BUDOV PARAMI BCHL

EVALUATION OF RISKS ASSOCIATED WITH CONTAMINATING THE INTERIORS OF PUBLIC BUILDINGS WITH CWA VAPOURS

Karel Mazanec*, Roman Šmíd, Miroslav Skoumal

Vojenský výzkumný ústav, s. p., Veslařská 230, 637 00 Brno, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: mazanec@vvu.cz, tel.: +420 532 191 341

Abstrakt

Kontaminace povrchů bojovými chemickými látkami (BCHL) v plynné formě sice nedosahuje takové úrovně jako při kontaminaci kapalnou BCHL nebo aerosoly, v civilní infrastruktuře tvořené nezodolněnými materiály může i tak představovat dlouhodobé riziko. Vojenský výzkumný ústav, s. p., byl pověřen švýcarským Federálním úřadem pro civilní ochranu (Spiez Laboratory) řešením dlouhodobého výzkumného úkolu zaměřeného na experimentální hodnocení rizik spojených s kontaminací interiérů veřejných budov parami BCHL. Výzkum byl zaměřen na ověření rychlosti desorpce (odpařování) vybraných BCHL (sarin, soman a sulfidický yperit) z běžných stavebních materiálů. Získaná data byla použita k vytvoření regresních křivek, které kvantifikují množství odpařené i zbytkové BCHL v materiálech po daném čase. Tyto výsledky pomáhají určit, jak dlouho zůstávají kontaminované povrchy nebezpečné.

Klíčová slova: BCHL, desorpce, interiéry budov

Abstract

Vapor contamination of surfaces by chemical warfare agents (CWAs) may not reach the same levels as contamination by liquid CWAs or aerosols, but it can still pose a long-term risk in civilian infrastructure made of non-resistant materials. The Military Research Institute, s. p., on behalf of the Swiss Federal Office for Civil Protection (Spiez Laboratory), addressed a long-term research task focused on the experimental evaluation of risks associated with the vapor contamination of public building interiors by CWAs. The research was focused on verifying the desorption rate (evaporation) of selected CWAs (sarin, soman, and sulfur mustard) from common building materials. The obtained data was used to create regression curves that quantify the amount of both evaporated and residual CWA in materials after a given time. These results help determine how long contaminated surfaces remain hazardous.

Key words: CWA, desorption, building interiors

ÚVOD

Kontaminace povrchů parami bojových chemických látek sice nedosahuje takové úrovně jako při kontaminaci kapalnou BCHL nebo aerosoly, v civilní infrastruktuře tvořené nezodolněnými materiály však přesto může představovat významné riziko. V uzavřených prostorách se specifickou výměnou vzduchu může navíc dojít k zánosu par kontaminantů i do míst velmi vzdálených od místa prvotní kontaminace a vést k druhotné kontaminaci velkých ploch. Dekontaminace takto rozsáhlých ploch pak vyžaduje mnoho času i zdrojů s produkcí značného množství odpadu.

Vojenský výzkumný ústav, s. p., byl pověřen švýcarským Federálním úřadem pro civilní ochranu (Spiez Laboratory) řešit dlouhodobý výzkumný úkol zaměřený na experimentální vyhodnocení rizik spojených s kontaminací interiérů veřejných budov parami BCHL. Z toho důvodu byly ověřovány desorpční charakteristiky vybraných stavebních materiálů po kontaminaci parami vybraných BCHL (sarin, soman a sulfidický yperit). Vzorky povrchů byly opakovatelně kontaminovány ve speciální nerezové kontaminační cele a následně bylo cílem sledovány rychlosti desorpce/odpařování BCHL. Cílem bylo ověřit, jak dlouho a do jaké míry zůstávají tyto povrchy nebezpečné. Vzorky povrchů byly po kontaminaci studovány čtyřmi různými metodami: extrakce ihned po kontaminaci pro stanovení hodnoty původní plošné hustoty kontaminace, dále bylo sledováno množství odpařené BCHL v čase, zbývající dvě série byly extrahovány po jedné hodině a 24 hodinách, pro stanovení zbytkového množství BCHL v materiálu. Získaná data byla použita k vytvoření nelineárních regresních křivek, které ukazují kumulativní množství odpařené BCHL a stejně tak je možné kvantifikovat množství BCHL zůstávající v materiálech po daném čase.

1 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1.1. Vzorky povrchů

Vzorky povrchů použité pro testy byly upraveny převážně do formy čtvercových kupónů o rozměrech 50 x 50 mm. Výběr materiálů představuje průřez povrchy používanými ve veřejných budovách. Část materiálů byla dodána přímo z konkrétních budov ve Švýcarsku, ostatní byly připraveny ve VVÚ. Přehled materiálů použitých v testech je zobrazen v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled materiálů použitých v testech

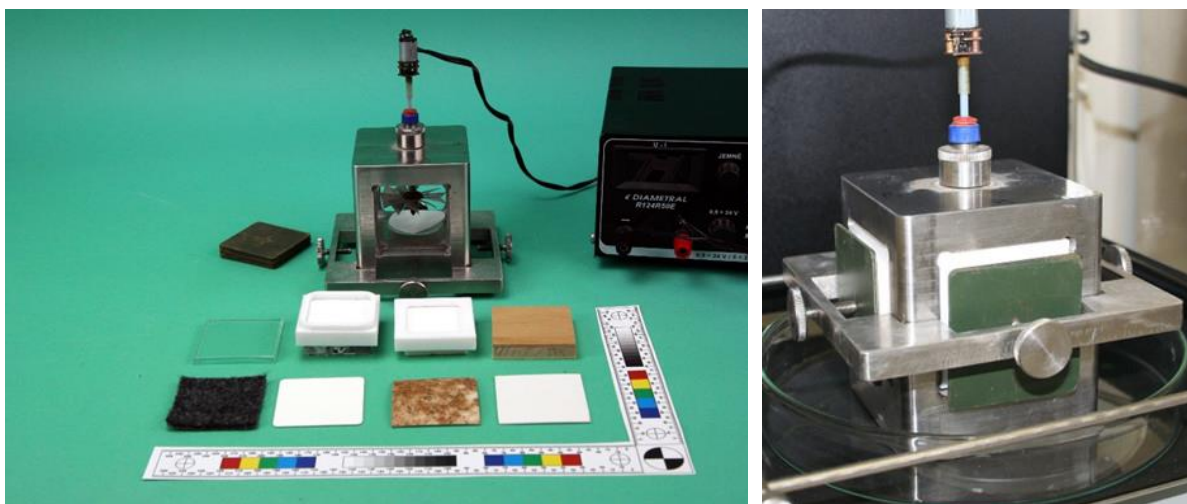
Zkratka	Materiál	Popis	Obrázek
CPB	Zátěžový koberec	SK Filzfliese, 100% PP Franz Reinkemeler, GmbH Německo	
GYB	Sádrokarton	natřený interiérovou barvou Flügger Denmark, Flutex 1 Plus, akrylátová barva pro vnitřní použití, bílá	
PCN	Beton	natřený interiérovou barvou Flügger, Dánsko, Flutex 1 Plus, akrylátová barva pro vnitřní použití, bílá	

PLF	Linoleum	PVC podlaha	
PSP	Kov opatřený nátěrem	<i>Maston Oy, Finsko, alkydový nátěr, bílá matná, 3 vrstvy</i>	
PVC	PVC	PVC lišty	
SPQ	Parkety	lakované parkety <i>Keindl, GmbH, Rakousko, Eiche solid</i>	
WGL	Okenní sklo		

1.2. Kontaminace vzorků parami BCHL

V testech použité BCHL sarin (GB), soma (GD) a sulfidický yperit (HD) byly připraveny na Vojenském výzkumném ústavu, s. p., a pro testy byly použity šarže s čistotou větší než 95 %.

Pro rovnoměrnou a opakovatelnou kontaminaci testovacích kupónů je nezbytné přesně udržovat parametry jako koncentrace par BCHL, teplota, relativní vlhkost a doba expozice. Pro expozici testovaných povrchů parám BCHL byla použita speciální nerezová kontaminační cela. Tato cela je nerezová kostka o vnitřní straně 5 cm a celkovém vnitřním objemu 125 cm³. Ve stěnách jsou vyříznuta čtyři čtvercová okna o rozměrech 50 x 50 mm. Každé okno je uzavřeno vzorkem povrchu, který je vsazen do teflonového těsnění. Pro zatěsnění kupónů o jiném rozměru byly použity těsnění odpovídajících rozměrů. Na horní straně cely je plynotěsné pouzdro, které drží osu nízko otáčkového vrtulového míchadla. Míchadlo je napájeno z laboratorního zdroje.



***Obrázek 1** Nerezová kontaminační cela se vzorky testovaných povrchů*

Kontaminační cela byla umístěna v klimatizační komoře WK-1 (Weiss Technik, Německo). Zde byla nastavena teplota na 20 ± 1 °C a relativní vlhkost na 50 ± 5 %. Cela včetně testovacích panelů byla ponechána v komoře minimálně po dobu 2 hodin před zahájením experimentu pro ustálení parametrů.

Kontaminace byla zahájena nanesením požadovaného množství kapalné BCHL na kulatý kus filtračního papíru, umístěný na malém hodinovém sklíčku na dně cely. Dostatečné množství každé BCHL bylo stanoveno experimentálně s pomocí materiálu s nejvyšší absorpční schopností tak, aby v průběhu kontaminace nedošlo k vyčerpání kapalné BCHL a poklesu koncentrace par v kontaminační cele, a činilo 80 μ l HD, 120 μ l GD anebo 200 μ l GB.

Okna cely byla uzavřena čtyřmi testovanými kupóny. Všechny čtyři panely byly pevně utaženy v oknech cely pomocí šroubů, které jsou umístěny na čtvercové objímce kolem cely. Doba expozice testovacích kupónů parám BCHL uvnitř cely byla 30 minut. Bezprostředně po skončení kontaminace byla kontaminační cela přemístěna do digestoře, otevřena a kontaminované panely byly přeneseny do prázdných nádob pro další zpracování. Pro každý materiál a BCHL byly kontaminovány 4 série po 4 vzorcích.

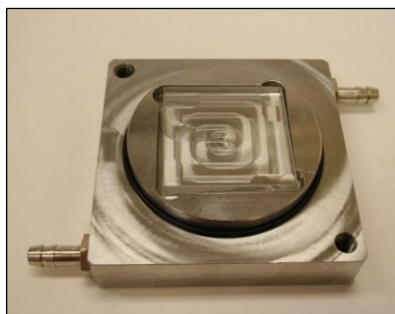
1.3. Stanovení počáteční kontaminace

Hodnota počáteční kontaminace testovaných kupónů byla stanovena extrakcí do rozpouštědla. Vzorky byly přeneseny pomocí pinzety do extrakčních nádob. Do nádoby bylo přidáno přesně 20 ml rozpouštědla (n-hexan), které zcela zakrylo vzorek. Sklenice pak byly uzavřeny a umístěny na orbitální třepačku na 1 hodinu. Po této době byl přibližně 1 ml extraktu přenesen do prázdné 1,5 ml analytické vialky. V případě potřeby byly vzorky před přenosem do vialek odstředěny. Množství BCHL bylo stanoveno pomocí plynové chromatografie (GC).

1.4. Monitorování uvolněných par BCHL z kontaminovaných povrchů

Druhá sada čtyř kontaminovaných kupónů byla vložena do čtveřice nerezových evaporačních cel pro sledování desorpce a odparu BCHL z povrchu kontaminovaných materiálů. Evaporační cely jsou navrženy pro kontrolované odvětrávání povrchu vzorků vzduchem za stanovených podmínek.

Evaporační cela, viz obrázek 2, se skládá ze dvou částí, které jsou temperovány kapalinou. Do výřezu na dně cely je umístěn kontaminovaný vzorek. Vzduch se přivádí 2 cm nad povrch



Kontinuální detektor BCHL, MINICAMS (O.I. Analytical, USA) byl zapojen do systému evaporačních cel přes rozdělovač pro průběžné monitorování koncentrace kontaminantů v odcházejícím proudu vzduchu. Délka experimentu závisela na typu vzorku a druhu kontaminantu tak, aby byla dostatečně věrně zachycena křivka desorpce a odpařování. Tato doba byla od 24 hodin pro rigidní povrchy až po týden pro porézní materiály s velkým zachytem par BCHL s pomalým uvolňováním. Po skončení odpařování byly kupóny extrahovány pro zjištění případného neodpařeného zbytku BCHL.

1.5. Stanovení zbytkové kontaminace po 1 hodině a 24 hodinách

Třetí a čtvrtá sada kontaminovaných kupónů byly udržovány 1 hodinu a 24 hodin v evaporačních celách za totožných podmínek jako v předchozím testu. Po uplynutí této doby byly extrahovány stejným způsobem jako počáteční kontaminace (kapitola 1.3).

2 VÝSLEDKY A DISKUSE

Cílem tohoto výzkumu bylo zjistit, jak moc mohou být vybrané povrchy v interiérech budov kontaminovány parami BCHL a jak dlouho po takové kontaminaci trvá jejich samovolné odvětrání. Pro každý testovaný materiál byly provedeny čtyři sady experimentů, každá ve čtyřech opakováních. Všechny experimenty začínaly stejným krokem, a to kontaminací vzorků parami BCHL v kontaminační cele. Se vzorky se následně pracovalo odlišně:

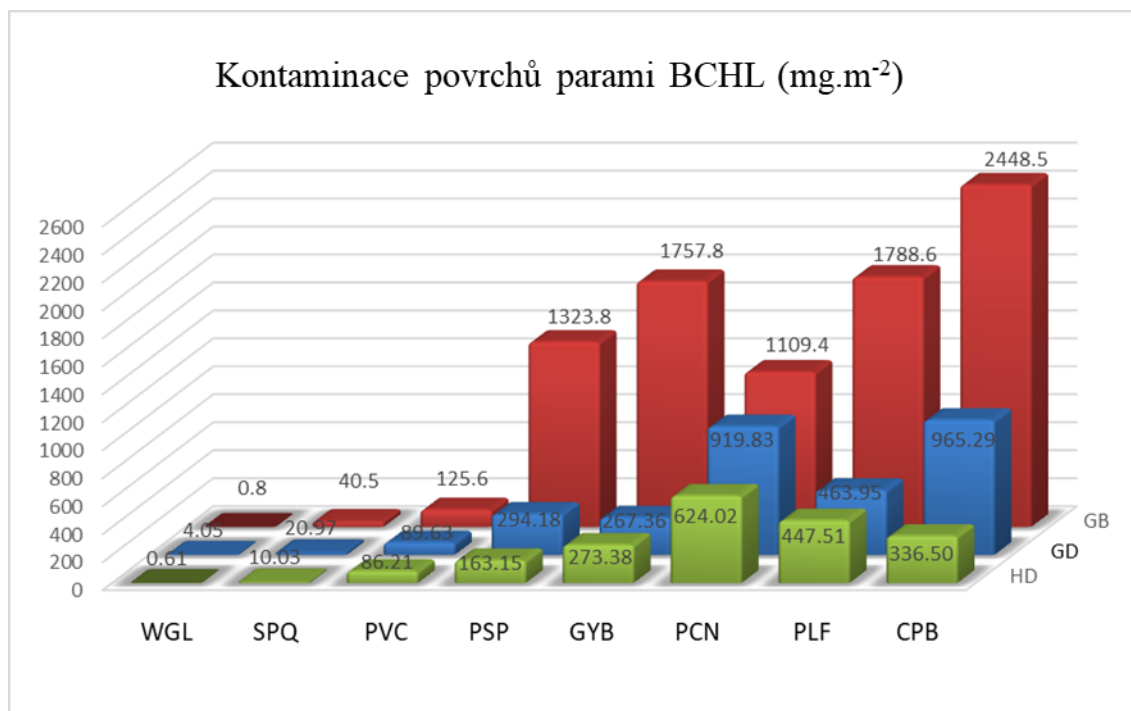
- a) Stanovení počáteční kontaminace: vzorky byly ihned po kontaminaci extrahovány.
- b) Monitorování uvolňovaných par BCHL: vzorky byly umístěny do speciálních evaporačních cel, kde se kontinuálně monitorovalo množství uvolněných par BCHL pomocí detektoru MINICAMS. Po ukončení experimentu bylo zbytkové množství BCHL ve struktuře vzorků stanoveno pomocí extrakce rozpouštědlem.
- c) Stanovení zbytkové kontaminace po 1 hodině: vzorky byly umístěny do evaporačních cel po dobu 1 hodiny a následně extrahovány rozpouštědlem.
- d) Stanovení zbytkové kontaminace po 24 hodinách: vzorky byly umístěny do evaporačních cel po dobu 24 hodin a následně extrahovány rozpouštědlem.

Z dat získaných z průběžného monitorování uvolňované BCHL pomocí detektoru MINICAMS byly vytvořeny nelineární regresní křivky pro každý experiment, které v kumulativní formě ukazují množství BCHL odpařené z povrchu vzorku. Křivky byly následně využity pro výpočet uvolněné BCHL v první hodině po kontaminaci, za 24 hodin a celkové množství uvolněné BCHL.

2.1. Kontaminace stavebních materiálů parami BCHL

Experimentálně získaná data umožňují porovnat stavebními materiály používané v interiérech budov z hlediska množství zachycené BCHL po kontaminaci parami BCHL. Za konstantních podmínek kontaminace (teplota, vlhkost, doba expozice) závisí množství kontaminantu, které se sorbuje na povrch, na dvou klíčových parametrech: i) koncentraci par kontaminantu a ii) rychlosti průniku molekul kontaminantů do hlubších vrstev materiálu, respektive odolnosti materiálu vůči pronikání BCHL.

Obrázek 4 shrnuje porovnání počáteční úrovně kontaminace studovaných materiálů vystavených nasyceným parám sarinu, somanu a yperitu po dobu 30 minut. Výsledky jsou plně v souladu s teoretickými předpoklady a odpovídají koncentracím nasycených par daných BCHL.



Obrázek 4 Srovnání plošné hustoty kontaminace interiérových povrchů po vystavení nasyceným parám BCHL po dobu 30 min, za teploty 20 °C a 50 % rel. vlhkosti.

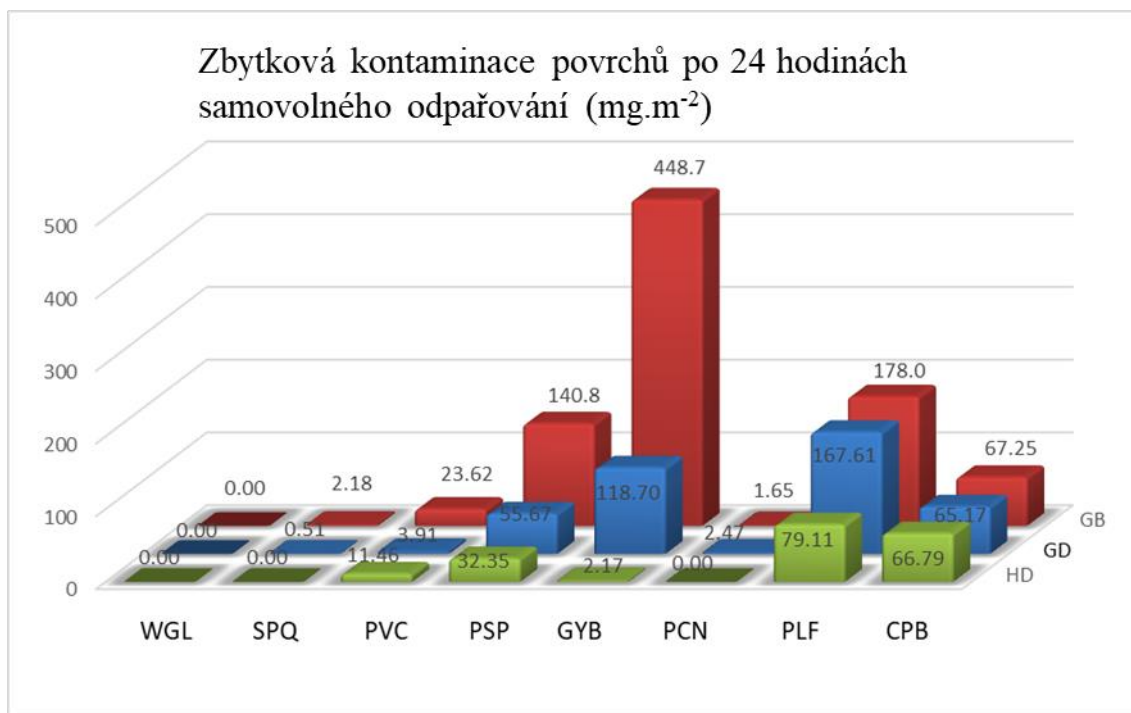
Povrchy vystavené nasyceným parám sarinu ($22\,500\text{ mg.m}^{-3}$) vykazují nejvyšší hodnoty plošné kontaminace. Naopak povrchy vystavené parám yperitu (625 mg.m^{-3}) vykazují nejnižší hodnoty. Materiály jako alkydový nátěr (PSP), sádrokarton (GYB), linoleum (PLF) a koberec (CPB) vykazují po expozici parám sarinu až pětikrát vyšší hodnoty kontaminace než v případě somanu ($2\,060\text{ mg.m}^{-3}$). Tento předpoklad však nelze aplikovat na všechny materiály. V případě materiálů s pevným povrchem vzrůstá vliv rychlost průniku molekul BCHL do struktury materiálu. To je patrné zejména při porovnání GD s HD. Ačkoli je koncentrace nasycených par HD přibližně čtvrtinová oproti GD, hodnoty počáteční kontaminace jsou srovnatelné. Pro kratší dobu kontaminace je koncentrace par nejdůležitějším faktorem, se vzrůstající délkou expozice a nasycení povrchu se však dá předpokládat vzrůstající vliv rychlosti penetrace molekul do materiálu. Plošná kontaminace parami HD s malými molekulami pak poroste rychleji než v případě GD a GB s většími molekulami.

2.2. Zbytková kontaminace po samovolném odvětrání

Obdobný efekt je pozorován naopak i při samovolném odvětrávání materiálů. Po 24 hodinách samovolného odvětrání závisí úroveň zbytkové kontaminace povrchů na více faktorech než jen na hodnotě počáteční kontaminace. Celkové srovnání hodnot zbytkové kontaminace v mg.m^{-2} je znázorněno na obrázku 5. U všech povrchů je pozorován výrazný pokles hodnot, a tím i nebezpečnosti povrchu. V průměru se jedná o pokles přibližně na desetinu původních hodnot. U většiny povrchů se hodnoty zbytkové kontaminace GB a GD po 24 hodinách vyrovnávají. Výjimku představují alkydový nátěr (PSP) a sádrokarton (GYB), u nichž zůstává zbytková kontaminace GB přibližně 3krát vyšší. Sádrokarton zůstává výrazně kontaminován GB i po 24 hodinách samovolného odpařování. Naproti tomu je v tomto případě zbytková kontaminace HD minimální.

Zbytková kontaminace koberce (CPB) je pro všechny tři BCHL vyrovnaná. Špatné odvětrávání HD ze struktury koberce může být způsobeno nízkou těkavostí HD, což vede k dosažení nasycených par mezi vlákny koberce. Nasycení nad takto složitým povrchem chráněným před

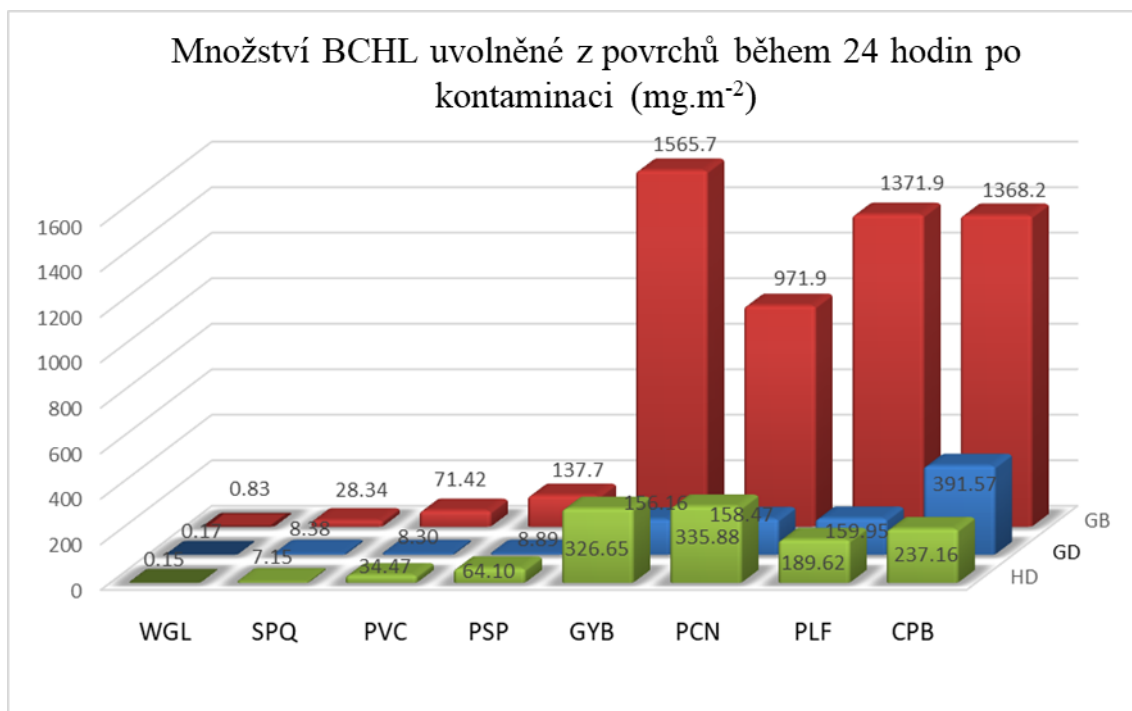
prouděním vzduchu vede k potlačení dalšího odpařování látky. Zbytková kontaminace betonu (PCN) je v případě všech tří BCHL minimální. Natřený beton je materiál, který se i přes svou vysokou schopnost sorbovat BCHL stejně snadno stává bezpečným.



Obrázek 5 Srovnání zbytkové kontaminace interiérových povrchů po 24 hodinách samovolného odvětrávání za teploty 20 °C a 50 % rel. vlhkosti.

2.3. Inhalační riziko

Množství BCHL uvolněných a odpařených z kontaminovaných povrchů je shrnuto na obrázku 6. Je zřejmé, že masivně kontaminované povrchy umožňují uvolnění a zpětné odpaření největšího množství BCHL, a představují tak největší inhalační riziko hodiny po kontaminaci. Jedná se především o materiály s vysokou sorpční kapacitou, jako jsou sádrokarton (GYB), natřený beton (PCN), linoleum (PLF) a koberec (CPB) kontaminované sarinem. Výjimku představuje kov opatřený alkydovým nátěrem (PSP), který i přes relativně vysokou počáteční kontaminaci neuvolňuje významné množství GB ani GD. Přesto extrakce rozpouštědlem po 24 hodinách ukazuje, že zbytkové množství není větší než 20 % původní hodnoty. Celkem 85,30 % počátečního množství GB a 93,39 % množství GD adsorbovaného na vrstvu nátěru nebylo dohledáno. Pravděpodobně bylo rozloženo samotnou barvou anebo jiným mechanismem, který si zaslouží další studium.



Obrázek 6 Srovnání množství BCHL odpařeného z kontaminovaných povrchů během 24 hodin po kontaminaci.

2.4. Hmotová bilance

Naměřená data umožňují vedle sebe porovnat hodnoty počáteční kontaminace povrchů a celkové odpařené množství BCHL spolu s případnou zbytkovou kontaminací po skončení odpařování. Tyto výsledky jsou uvedeny v tabulce 2. Odolné materiály s minimální počáteční kontaminací (sklo, parkety a PVC) nejsou zahrnuty.

Tabulka 2 Přehled počáteční kontaminace (P.K.) a nalezené množství (N.M.) v $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ pro jednotlivé BCHL.

Materiál	GB		GD		HD	
	P.K.	N.M.	P.K.	N.M.	P.K.	N.M.
PSP	1323,8	194,7	294,2	19,4	163,1	96,4
GYB	1757,8	1800,7	267,4	285,6	273,4	295,2
PCN	1109,4	971,8	919,8	176,8	624,0	335,9
PLF	1788,6	1488,7	463,9	269,0	447,5	228,4
CPB	2448,5	1486,5	965,3	423,1	336,5	247,1

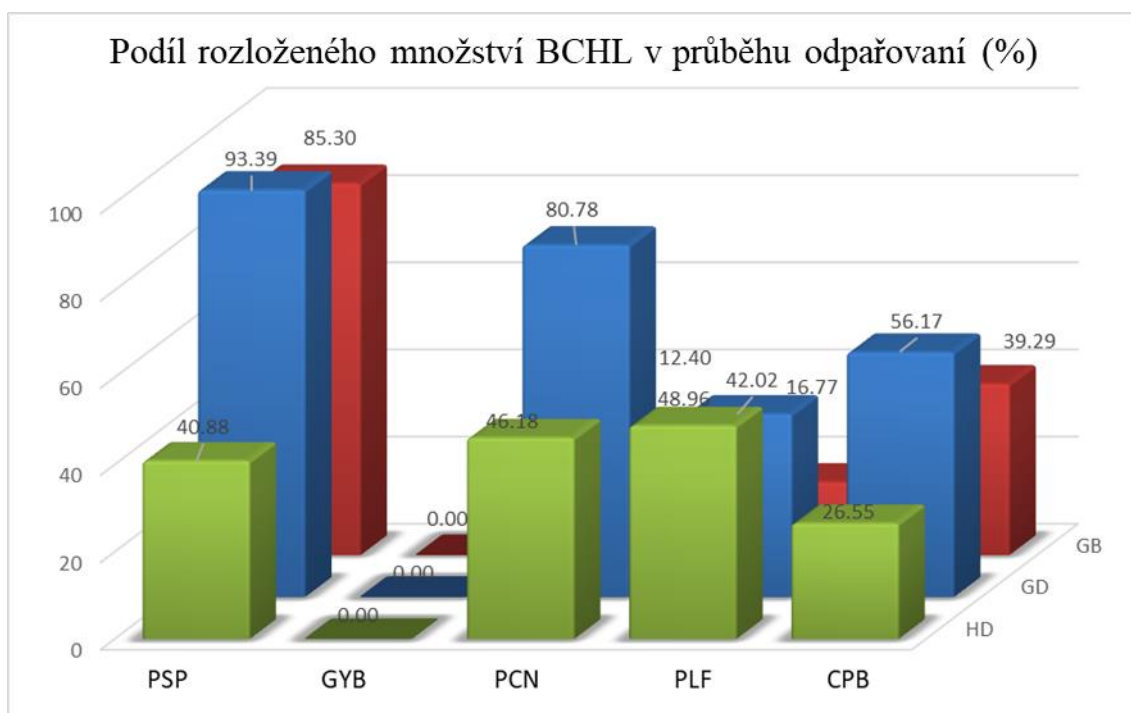
S výjimkou sádkokartonu, u něhož jsou hodnoty počáteční kontaminace a nalezeného množství BCHL obdobné, u všech ostatních materiálů jsou mezi těmito hodnotami rozdíly. Tyto rozdíly dosahují výše až 93,4 % v případě GD na kovovém povrchu opatřeném nátěrem. Předpokládá se, že nedohledaná část BCHL byla rozložena působením vzdušné vlhkosti v průběhu odpařování nebo interakcemi mezi BCHL a materiály.

U materiálů jako je natřený beton (PCN), linoleum (PLF) a částečně i koberec (CPB) hraje důležitou roli celková doba odpařování, a tím i vystavení rozkladným reakcím způsobeným vlhkostí. Nižší hodnoty u nejvíce těkavého sarinu podporují tento předpoklad.

Dá se předpokládat, že i ztráta HD na kovu s nátěrem je způsobena samovolnou hydrolyzou. Naopak vysoké ztráty organofosfátových GD a GB (85,30 a 93,39 % původního množství) na tomto materiálu ukazují na rozkladné reakce způsobené některou ze složek nátěru.

Specifickým materiálem je sádrokarton (GYB). Hmotová bilance ukazuje, že veškeré počáteční množství tří zkoumaných látek se buď zcela odpařilo (HD), anebo po skončení odpařování zůstalo částečně v materiálu (GB a GD). Sádrokarton je materiál, který dokáže velmi dobře pracovat s relativní vlhkostí, a dokáže tak zřejmě velmi dobře ochránit BCHL před samovolným rozkladem vlhkostí. To představuje po kontaminaci značné riziko, protože zvláště v případě GD, zůstává i po 14 dnech více než 40 % původního množství sorbované v materiálu.

Relativní množství BCHL rozložené během samovolného odpařování v procentech počáteční kontaminace je uvedeno na obrázku 7.



Obrázek 7 Procentuální podíl množství BCHL, které bylo rozloženo během odpařování z povrchů kontaminovaných parami BCHL.

ZÁVĚR

Výzkum se zaměřil na pochopení procesů adsorpce, desorpce a stability vybraných BCHL (HD, GB a GD) na běžných stavebních materiálech používaných ve vnitřních prostorech veřejných budov. Cílem bylo stanovit, jak dlouho zůstávají vybrané interiérové povrchy nebezpečné po kontaminaci parami BCHL, a jaké je celkové množství zachycené a uvolněné látky. Výsledky jasně kvantifikují rozdíly v charakteristikách samovolného odpařování, což je zásadní pro rozhodování o tom, zda použít aktivní dekontaminaci, nebo se spolehnout na spontánní desorpci (off-gassing) při řešení rozsáhlé kontaminace vnitřních prostor budov.

Poděkování - podpora

Výzkum byl finančně podpořen Federal Office for Civil Protection (FOCP), Spiez Laboratory.

ANALÝZA DICENTRICKÝCH CHROMOZOMŮ: ZÁKLADNÍ KÁMEN BIOLOGICKÉ DOZIMETRIE PŘI RADIAČNÍCH MIMOŘÁDNÝCH UDÁLOSTECH

DICENTRIC CHROMOSOME ASSAY: A CORNERSTONE OF BIOLOGICAL DOSIMETRY IN RADIATION EMERGENCY SCENARIOS

Marcela Milanová, Zuzana Šinkorová, Aleš Tichý, Vojtěch Chmil*

^a Univerzita obrany, Vojenská lékařská fakulta, Katedra radiobiologie, Třebešská 1575, 500 01 Hradec Králové, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: vojtech.chmil@unob.cz, tel.: +420 728 649 456

Abstrakt

Analýza dicentrických chromozomů (DCA) představuje osvědčenou a spolehlivou metodu, která je stále považována za zlatý standard biologické dozimetrie, zejména při řešení radiačních mimořádných událostí. Spolehlivé využití vyžaduje standardizované protokoly a úzkou spolupráci národních i mezinárodních laboratoří. Dosažení této standardizace závisí na mezilaboratorních porovnáních prováděných za kontrolovaných podmínek jak na národní úrovni, tak v rámci evropské sítě RENEB, spolu s průběžnou harmonizací metod. Tento příspěvek shrnuje naše zkušenosti a výsledky vyhodnocení dávek slepých vzorků a zdůrazňuje vliv klíčových faktorů, zejména uchovávání krve, kultivačních podmínek nebo kvality záření. Výsledky podtrhují význam národní i mezinárodní spolupráce pro zajištění přesnosti, rychlosti a spolehlivosti biodozimetrické odezvy při mimořádných radiačních událostech.

Klíčová slova: *ionizující záření, dicentrický chromozom, biologická dozimetrie*

Abstract

The dicentric chromosome assay (DCA) represents a well-established and reliable method, still considered the gold standard of biological dosimetry, especially in managing radiological emergencies. A reliable application requires standardized protocols and strong collaboration among national and international laboratories. Achieving this standardization depends on interlaboratory comparisons conducted under controlled conditions, both nationally and within the European RENEB network, as well as ongoing harmonization of methods. This contribution presents our experience and results of blinded dose estimations and highlights the influence of key pre-analytical factors, including blood storage, cultivation conditions, and radiation quality. The results emphasize the value of sustained international cooperation to ensure biodosimetric response accuracy, speed, and reliability in a radiation emergency.

Key words: *ionizing radiation, dicentric chromosome, biological dosimetry*

ÚVOD

Ionizující záření představuje významné riziko nejen v medicíně či průmyslu, ale především v souvislosti s radiačními mimořádnými událostmi, kdy může dojít k ozáření většího počtu osob. Rychlé a přesné stanovení absorbované dávky je v těchto situacích klíčové pro rozhodování o lékařské péči i krizové řízení. Klasické fyzikální metody měření dávky jsou však v hromadných scénářích často nedostačující, protože nezohledňují individuální variabilitu

expozice a nejsou vždy dostupné pro všechny postižené. Proto se uplatňuje biologická dozimetrie, která umožňuje odhadnout dávku přímo na základě biologické odpovědi exponovaných buněk [1]. Mezi dostupnými biodozimetrickými metodami zaujímá analýza dicentrických chromozomů (DCA, z angl. *dicentric chromosome assay*) výjimečné postavení. Je široce uznávána jako „zlatý standard“ pro odhad dávky ionizujícího záření, protože tvorba dicentrických chromozomů je vysoce specifická pro expozici ionizujícímu záření a jejich četnost dobře koreluje s absorbovanou dávkou [2]. DCA se běžně používá pro akutní celotělové ozáření (např. 0,1–5 Gy) [3].

Z pohledu CBRN ochrany má DCA zásadní význam, protože poskytuje spolehlivý nástroj pro rychlou identifikaci ozářených osob v případě radiologických či jaderných hrozeb. Umožňuje tak cílenou zdravotní intervenci, efektivní triáž a podporuje rozhodovací procesy v krizovém řízení. Správná integrace této metody do systému připravenosti významně zvyšuje schopnost státu reagovat na mimořádné události s radiologickým dopadem [4]. Pro praktické použití DCA v podmínkách reálných mimořádných událostí je však zásadní dodržování standardizovaných protokolů a úzká spolupráce mezi národními i mezinárodními laboratořemi. Jen tak lze zajistit, aby výsledky byly srovnatelné, rychle dostupné a klinicky využitelné. Významnou roli v tomto směru sehrává síť RENEB (z angl. *Realizing the European Network of Biodosimetry*), která prostřednictvím mezilaboratorních porovnání a harmonizace postupů podporuje jednotnou a efektivní biodozimetrickou odezvu v případě radiačních hrozeb [5]. Spolehlivost biologické dozimetrie je úzce spjata se schopností jednotlivých laboratoří dosahovat konzistentních a reprodukovatelných výsledků. I když je DCA mezinárodně uznávaným zlatým standardem, její provedení je citlivé na celou řadu faktorů. Rozdíly v podmínkách odběru a uchovávání krve, v metodice kultivace, v kvalitě přípravy preparátů či v samotném mikroskopickém hodnocení mohou vést k odchylkám ve výsledcích a tím i k nepřesnému odhadu dávky. Proto je zásadní, aby byla tato metoda pravidelně prověřována prostřednictvím mezilaboratorních srovnávání, která umožňují identifikovat slabá místa, sjednotit postupy a zajistit vysoký standard kvality napříč pracovišti [6].

Síť RENEB sdružuje specializované laboratoře a usiluje o dlouhodobou harmonizaci biodozimetrických metod. Prostřednictvím pravidelných mezilaboratorních cvičení a testů se ověřuje schopnost laboratoří přesně a spolehlivě vyhodnocovat zaslepené vzorky, což přispívá k jednotnosti a srovnatelnosti výsledků. RENEB se rovněž zaměřuje na školení odborníků, sdílení zkušeností a systematický rozvoj nových metod, které rozšiřují spektrum dostupných nástrojů biologické dozimetrie [4]. Význam této spolupráce se ukazuje zejména v situacích, kdy je nutné zvládnout hromadné ozáření velkého počtu osob. Jednotlivé národní laboratoře by v takovém případě nebyly schopny pokrýt celou potřebu samostatně, zatímco koordinovaná síť umožňuje efektivní sdílení kapacit a zajišťuje rychlou biodozimetrickou odezvu. Díky aktivitám RENEB je tak Evropa lépe připravena čelit radiačním mimořádným událostem a posiluje svou celkovou odolnost v rámci systémů CBRN ochrany [6].

Základem spolehlivé biologické dozimetrie je kvalitní kalibrační křivka, která vyjadřuje vztah mezi frekvencí dicentrických chromozomů a absorbovanou dávkou ionizujícího záření. Každá laboratoř by měla disponovat vlastní kalibrační křivkou, protože její parametry jsou ovlivněny řadou faktorů, mezi něž patří především kvalita použitého záření, rozsah dávkové řady, druh zdroje a jeho dávkový příkon, ale také způsob ozáření, včetně použití či nepoužití fantomu. Tyto parametry mohou významně ovlivnit tvar křivky i výsledné dávkové odhady, a proto není možné spoléhat se pouze na univerzální či literární data [7, 8].

V rámci této práce byla připravena vlastní kalibrační křivka pro gama záření, kdy byla krev *in vitro* ozářena v rozsahu deseti dávek pomocí zdroje ^{60}Co . Na základě této křivky byly následně vyhodnocovány slepě ozářené vzorky krve, které naše laboratoř obdržela v rámci tří

mezilaboratorních porovnávání organizovaných partnerskými pracovišti. Tyto vzorky byly v některých případech ozářeny zdroji odlišnými od kobaltového zářiče, případně se lišily i podmínkami ozáření. Podobné postupy, kdy se hodnotí robustnost kalibrační křivky i při odlišných typech záření nebo odlišných podmínkách, jsou doporučovány v rámci mezinárodních mezilaboratorních porovnání [9].

Tento přístup nám umožňuje nejen ověřit přesnost a robustnost vlastních kalibračních křivek, ale také posoudit vliv jednotlivých parametrů, jako je kvalita záření, dávkový příkon či přítomnost fantomu, na výsledné odhady dávek. Zároveň poskytuje možnost nezávisle zhodnotit výkonnost laboratoře v rámci spolupráce a porovnat výsledky s ostatními pracovišti. Prezentované výsledky proto ilustrují nejen význam vlastních kalibračních dat, ale také přínos mezilaboratorních srovnání pro dlouhodobou spolehlivost a standardizaci biologické dozimetrie.

1 METODIKA

1.1. Odběr periferní krve a ozařování

Vzorky periferní krve byly odebrány od dvou zdravých dárců (muž/žena, věk <50 let, bez předchozí terapie). Alikvoty plné krve byly pro potřeby sestrojení kalibrační křivky ozářeny *in vitro* gama zářením v deseti dávkových bodech pokrývajících rozmezí 0–5 Gy. Ozařování vzorků bylo zajištěno zdrojem gama záření ⁶⁰Co (přístroj Chisostat®) dávkovým příkonem v rozmezí 0,6–0,9 Gy/min.

1.2. Kultivace lymfocytů a příprava preparátů

Kultivace krevních vzorků probíhala v médiu RPMI 1640 doplněném 20 % FBS, 2 % PHA-M a antibiotiky (penicilin–streptomycin). Do 8 ml média bylo přidáno 800 µl plné krve a buňky byly kultivovány 48 h při 37 °C a 5 % CO₂. Kolcemid (74 ng/ml) byl přidán 24 h před ukončením kultivace. Následně byly buňky ošetřeny hypotonickým roztokem KCl (75 mM, 37 °C, 20 min), třikrát fixovány směsí metanol/kyselina octová (3:1), centrifugovány 3 min při 210 × g a obarveny 5% roztokem Giemsa Romanowski v deionizované vodě. Detailní popis metodiky přípravy kultur, preparátů a následného hodnocení je uveden v naší předchozí publikaci Milanová et al., 2025 [10].

1.3. Skenování preparátů a vyhodnocení

Akvizice dat byla provedena pomocí mikroskopu Axio Imager 2 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Göttingen, DE) v kombinaci se systémem Metafer 4 (MetaSystems Hard & Software GmbH, Altlußheim, DE). Analýza metafází a hodnocení dicentrických chromozomů bylo provedeno v manuálním režimu dle kritérií Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) [7] vyškoleným a zkušeným hodnotitelem.

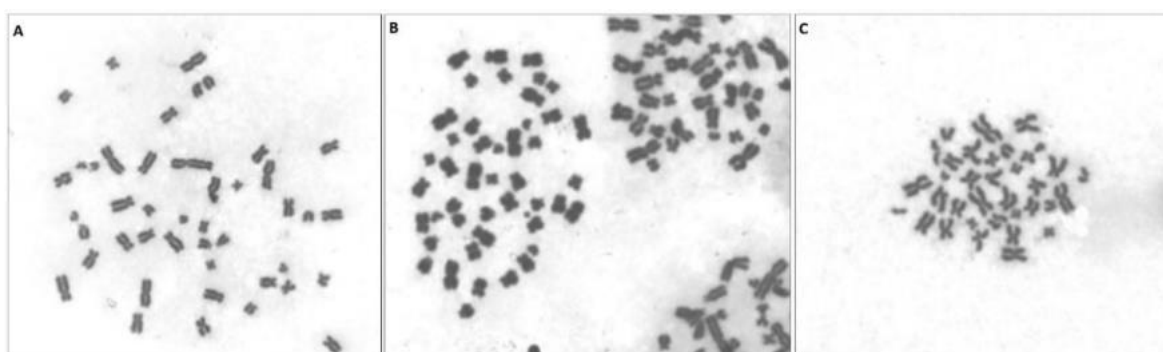
1.4. Mezilaboratorní porovnání

Pro účely mezilaboratorního porovnávání připravila referenční laboratoř (RL) sadu periferních krevních vzorků dvou zdravých dárců, které byly ozářeny třemi různými dávkami gama záření v intervalech relevantních pro potřeby biologického třídění ve třech kategoriích (<1 Gy, 2–4 Gy a >4 Gy). Tyto vzorky byly následně v souladu se standardizovaným postupem distribuovány do tří zúčastněných laboratoří (L1–Vojenská lékařská fakulta, VLF; L2 a L3 – zahraniční partnerské laboratoře). Všechny laboratoře, které se účastnily této studie, jsou taktéž členové mezinárodní sítě RENEB. Skutečné hodnoty absorbovaných dávek nebyly laboratořím známy a jejich úkolem bylo aplikovat DCA s využitím vlastních laboratorních protokolů a kalibračních křivek k provedení zpětného odhadu absorbované dávky.

2 VÝSLEDKY

2.1. Kritéria hodnocení metafází

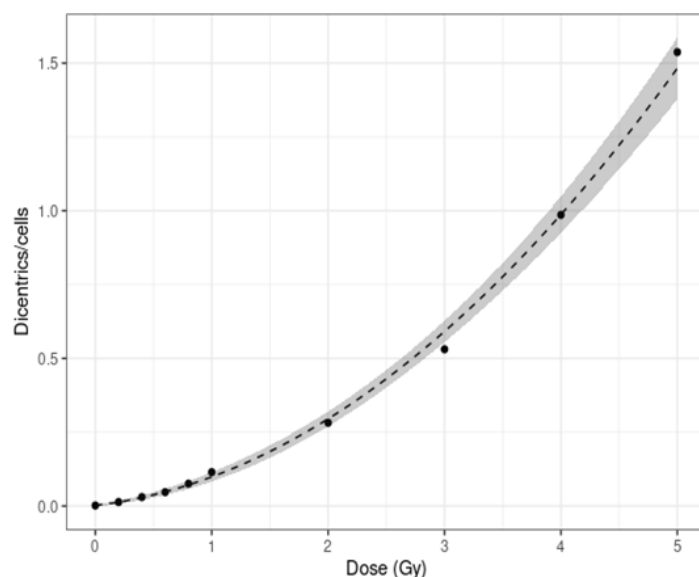
Hodnocení metafází a dicentrických chromozomů probíhalo v souladu s doporučeními [7, 11]. Do analýzy byly zahrnuty pouze metafáze splňující stanovená morfologická kritéria, tj. s kompletní diploidní sadou 46 chromozomů, dostatečně rozprostřenými chromozomy bez výrazného překrývání a s jasně identifikovatelnými centromerami a raménky. Za dicentrický chromozom byl považován pouze útvar se dvěma jednoznačně morfologicky definovanými centromerami. Z hodnocení byly vyloučeny metafáze s neúplným nebo nadměrným počtem chromozomů, slabě barvené nebo s nedostatečným rozlišením. Do analýzy dále nebyly zahrnuty snímky metafází s nadměrně rozprostřenými chromozomy, u nichž docházelo ke ztrátě přehlednosti a také snímky zachycující více než jednu metafázi, jelikož v těchto případech nebylo možné spolehlivě určit kompletní chromozomovou sadu (Obrázek 1).



Obrázek 1 Metafáze nevhodné pro hodnocení: (A) metafáze s nadměrně rozprostřenými chromozomy, (B) více než jedna zachycená metafáze, (C) metafáze s neúplnou sadou chromozomů. Převzato z Milanová et al., 2025 [11].

2.2. Kalibrační křivka pro DCA

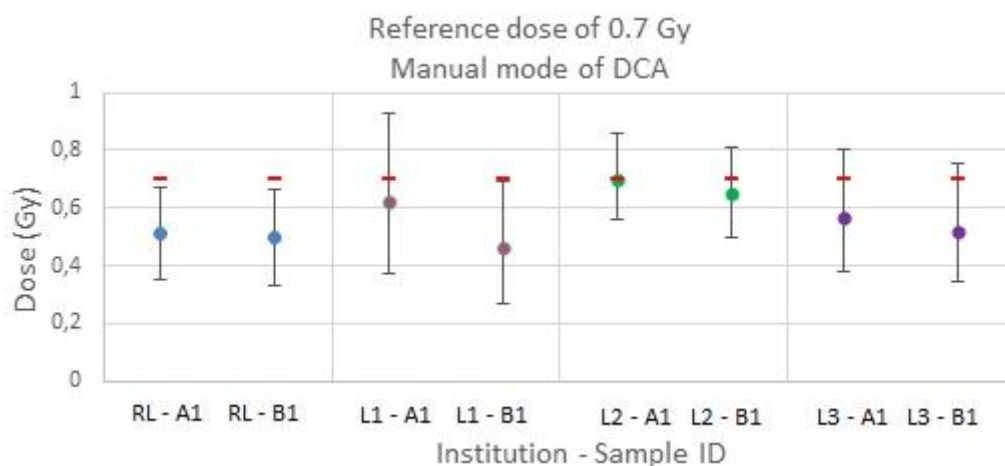
V rámci přípravy kalibrační křivky pro DCA bylo analyzováno přibližně 20 000 metafází, což představuje asi 1000 metafází na každý dávkový bod pro každého z dárců ($D=2$). Na základě těchto výsledků byla vytvořena kalibrační křivka pro gama záření, jejíž parametry byly stanoveny pomocí softwarového nástroje Biodose Tools [12]. Výsledky byly popsány lineárně-kvadratickým modelem: $Y=0,0021(\pm 0,0010) + 0,0466 (\pm 0,0180) \times D + 0,0986 (\pm 0,0240) \times D^2$, kde Y představuje frekvenci dicentrických chromozomů a D absorbovanou dávku v jednotkách Gy. Výsledná kalibrační křivka (Obrázek 2) vykazuje vysokou korelaci mezi absorbovanou dávkou a počtem dicentrických chromozomů. Tato kalibrační závislost potvrzuje vhodnost zvoleného modelu pro účely biologické dozimetrie a umožňuje spolehlivý odhad absorbované dávky ionizujícího záření na základě cytogenetické analýzy.



Obrázek 2 Kalibrační křivka pro metodu DCA rozsahu dávek 0–5 Gy. Znázornění závislosti mezi dávkou IZ (osa X, Gy) a průměrným počtem dicentrických chromozomů na buňku (osa Y, Dics/Cell) včetně intervalu spolehlivosti 95 %. Generováno pomocí nástroje Biodose Tools [12].

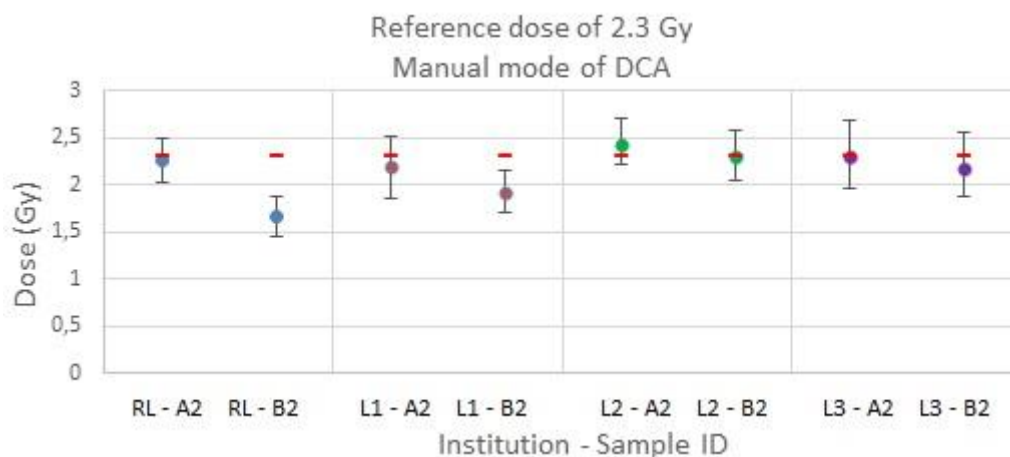
2.3. Výsledky porovnávací studie

Na základě této kalibrační křivky byly následně vyhodnoceny zaslepené vzorky krve dvou různých dárců, které naše laboratoř obdržela v rámci studie mezilaboratorního porovnávání. Výsledky odhadů byly porovnány se skutečnými dávkami, které byly zveřejněny až po ukončení hodnocení, což umožnilo objektivně zhodnotit přesnost a spolehlivost naší kalibrační křivky. Tímto postupem bylo možné posoudit nejen validitu naší metodiky, ale také robustnost kalibrační křivky v podmínkách mezinárodní spolupráce a různého typu ozáření.



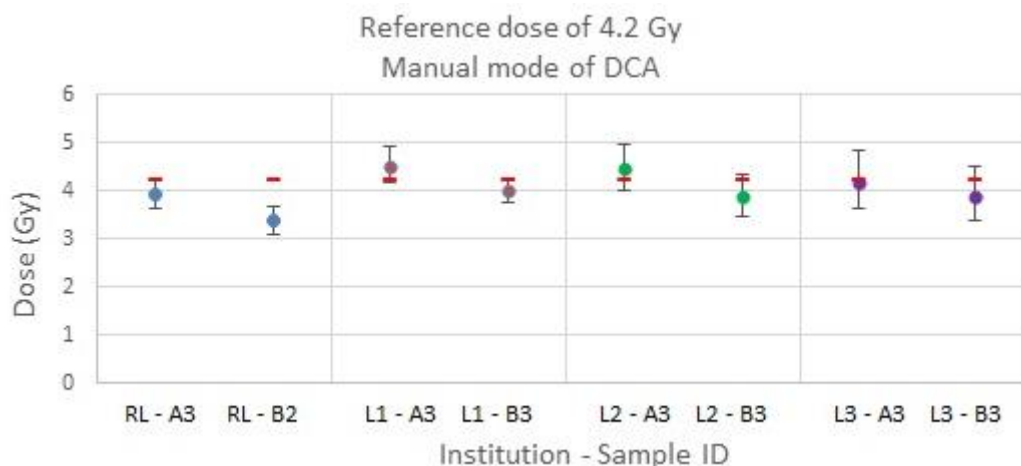
Obrázek 3 Výsledky hodnocení vzorků A1 a B1 s referenční dávkou 0,7 Gy (RL – referenční laboratoř, L1 – laboratoř VLF, L2 a L3 zahraniční laboratoře 2 a 3), manuální režim hodnocení DCA.

Obrázek 3 graficky znázorňuje porovnání odhadů absorbované dávky při referenční dávce 0,7 Gy mezi jednotlivými laboratořemi. Všechny zúčastněné laboratoře odhadly dávku v intervalu nejistoty blízkém skutečné hodnotě, přičemž rozdíly mezi jednotlivými vzorky (A1, B1) nebyly zásadní. Referenční laboratoř (RL) vykázala mírné podhodnocení, obdobný trend byl patrný také u laboratoří L1 a L3. Laboratoř L2 naopak dosáhla odhadu mírně nadhodnoceného vůči skutečné dávce. Celkově lze konstatovat, že při nízké dávce (0,7 Gy) byly všechny výsledky konzistentní a v akceptovatelném rozptylu vůči referenční hodnotě.



Obrázek 4 Výsledky hodnocení vzorků A2 a B2 s referenční dávkou 2,3 Gy (RL – referenční laboratoř, L1 – laboratoř VLF, L2 a L3 zahraniční laboratoře 2 a 3), manuální režim hodnocení DCA.

V případě dávky 2,3 Gy byla pozorována dobrá konzistence napříč zapojenými laboratořemi. Většina výsledků se pohybovala v těsné blízkosti referenční hodnoty, přičemž rozdíly mezi jednotlivými vzorky byly malé. Laboratoře L1 a L3 vykázaly stabilní výsledky, laboratoř L2 dosáhla odhadu velmi blízkého skutečné dávce. Referenční laboratoř (RL) podhodnotila hodnotu jednoho vzorku, zatímco druhý odpovídal referenční dávce. Tyto výsledky ukazují, že v oblasti středních dávek je metoda spolehlivá a mezilaboratorní variabilita je minimální.



Obrázek 5 Výsledky hodnocení vzorků A3 a B3 s referenční dávkou 4,2 Gy (RL – referenční laboratoř, L1 – laboratoř VLF, L2 a L3 - zahraniční laboratoře 2 a 3), manuální režim hodnocení DCA.

Při dávce 4,2 Gy vykázaly všechny laboratoře výsledky blízké skutečné hodnotě. Referenční laboratoř (RL) mírně podhodnotila vzorek B2, zatímco laboratoře L1, L2 a L3 vykázaly odhady dobře korespondující s referenční dávkou. Největší variabilita byla patrná u laboratoře L2, avšak odhady se stále pohybovaly v rámci akceptovatelného intervalu spolehlivosti.

Ve všech třech referenčních dávkách (0,7; 2,3 a 4,2 Gy) byly odhady jednotlivých laboratoří konzistentní a pohybovaly se v akceptovatelném intervalu spolehlivosti, přičemž při nízké dávce docházelo k mírnému podhodnocení, zatímco při středních a vyšších dávkách byla shoda mezi laboratořemi velmi dobrá.

3 DISKUZE

Naše pracoviště se dlouhodobě účastní mezilaboratorních porovnávání jak na národní úrovni, tak mezinárodně v rámci sítě RENEB [9, 13, 14]. Tato četná mezilaboratorní porovnávání ukázala, že i když zapojená pracoviště dokážou spolehlivě zařadit vzorky do klinicky relevantních kategorií, v přesném kvantitativním odhadu dávek se opakovaně objevují systematické odchylky. Například v mezilaboratorním porovnávání RENEB z roku 2021, které zahrnovalo 33 laboratoří z 22 zemí, byly odhady pro vzorky ozářené nad 1 Gy a 3 Gy systematicky vyšší než referenční dávky, s odchylkou 0,5 Gy a 0,95 Gy při manuálním hodnocení; po převodu hodnot z γ -kalibrační křivky na ekvivalentní hodnoty pro použitou energii rentgenového záření se tyto odchylky snížily na 0,27 Gy a 0,6 Gy [14]. V novější studii zaměřené na dávky nad 2,5 Gy autoři ukázali, že ačkoli nelze potvrdit univerzální systematický bias, určité laboratoře vykazovaly tendenci k podhodnocení či nadhodnocení dávek v závislosti na vlastních metodikách [9].

Pozorované odchylky korespondují s trendy popisovanými v mezinárodních studiích. Naše výsledky odpovídají těmto mezinárodním trendům. Při nízké dávce 0,7 Gy jsme stejně jako ostatní laboratoře zaznamenali mírné odchylky, přičemž referenční laboratoř (RL) i laboratoře L1 a L3 měly tendenci k podhodnocení a laboratoř L2 naopak k mírnému nadhodnocení. V oblasti střední dávky (2,3 Gy) byla mezi pracovišti pozorována velmi dobrá shoda, odhady se pohybovaly v těsné blízkosti skutečné dávky a variabilita mezi laboratořemi byla minimální. Při vysoké dávce (4,2 Gy) byla rovněž prokázána dobrá shoda, přičemž odhady jednotlivých laboratoří se pohybovaly v akceptovatelném rozptylu vůči referenční hodnotě; mírné podhodnocení se objevilo u RL a zvýšená variabilita u laboratoře L2. Tyto výsledky potvrzují, že metoda DCA poskytuje spolehlivé odhady napříč celým sledovaným dávkovým rozsahem, přičemž největší nejistota je spojena s nízkými dávkami, jak je uváděno i v literatuře [9, 14, 15].

Nepřesnosti v odhadu dávky mohou být ovlivněny řadou faktorů. Patří k nim zejména kvalita a typ záření (γ vs. rentgen), podmínky ozařování (dávkový příkon, homogenita pole, použití fantomu), ale i laboratorní odlišnosti zahrnující kalibrační křivky, metodiku kultivace, transport vzorků a subjektivní variabilitu při hodnocení metafází [15]. V kontextu našich výsledků, kde jsme pozorovali mírné, ale patrné odchylky od skutečných dávek, lze tyto poznatky interpretovat jako potvrzení, že i zkušené a opakovaně ověřené laboratoře mohou být ovlivněny kombinací technických i metodických faktorů. Tento fakt podtrhuje nutnost pravidelného zapojení do mezinárodních porovnávacích cvičení, která umožňují nejen ověřit robustnost používaných kalibračních křivek, ale také dlouhodobě validovat aplikační postupy biologické dozimetrie a zajišťovat jejich harmonizaci napříč pracovišti.

ZÁVĚR

Analýza dicentrických chromozomů zůstává základním kamenem biologické dozimetrie a představuje zlatý standard při odhadu absorbované dávky ionizujícího záření. Výsledky ukázaly, že naše laboratoř dosahuje při odhadu absorbovaných dávek pomocí DCA konzistentních a spolehlivých hodnot, které jsou plně srovnatelné s ostatními referenčními pracovišti zapojenými do mezilaboratorních porovnávání. Mírné odchylky od skutečných dávek, které jsme zaznamenali, odpovídají trendům popisovaným v literatuře a lze je přičíst kombinaci faktorů spojených s kvalitou záření, podmínkami ozařování a laboratorními odlišnostmi.

Tyto skutečnosti potvrzují, že i zkušená pracoviště nejsou zcela imunní vůči systematickému posunu, a zdůrazňují význam pravidelné účasti v mezinárodních porovnávacích cvičeních

a průběžné validace používaných postupů biologické dozimetrie. Zároveň výsledky ukazují, že naše laboratoř je schopna rychle a spolehlivě aplikovat DCA i v podmínkách, kdy je nezbytné provést biologické třídění po radiační události. Tato připravenost představuje důležitý prvek krizové odezvy. Přispívá k zajištění včasné a přesné diagnostiky expozice, což je klíčové pro adekvátní medicínský zásah a ochranu obyvatelstva.

Použitá literatura

- [1] BALAJEE, A. S., H. C. TURNER a R. C. WILKINS, 2023. Radiation Biodosimetry: Current Status and Future Initiatives. *Cytogenetic and Genome Research*. 163(3–4), 85–95. ISSN 1424-8581. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1159/000529973>
- [2] AINSBURY, E. A., A. A. EDWARDS a D. C. LLOYD, 2011. Dicentric chromosome assay as a tool in radiation biodosimetry: Past, present and future. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. 751(1), 1–15. ISSN 1383-5742. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2011.06.001>
- [3] ABE, Y., M. A. YOSHIDA, K. FUJIOKA, Y. KUROSU, R. UJIE, A. YANAGI, N. TSUYAMA, T. MIURA, T. INABA a K. KAMIYA, 2018. Dose–response curves for analyzing dicentric chromosomes and chromosome translocations following doses of 1000 mGy or less, based on irradiated peripheral blood samples from five healthy individuals. *Journal of Radiation Research*. 59(1), 35–42. ISSN 1349-9157. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rad005>
- [4] KULKA, U., E. AINSBURY, M. ATKINSON, J. F. BARQUINERO, L. BARRIOS, C. BEINKE, ... C. WODA, 2017. Realising the European Network of Biodosimetry (RENEB). *Radiation Protection Dosimetry*. 175(4), 323–329. ISSN 0144-8420. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx154>
- [5] AINSBURY, E. A., J. AL-HAFIDH, A. BAJINSKIS, J. F. BARQUINERO, C. BEINKE, aj., 2014. Inter-laboratory comparison of dicentric chromosome analysis for dose assessment after simulated whole- and partial-body exposures. *Radiation Research*. 182(5), 512–520. ISSN 0033-7587. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1667/RR13604.1>
- [6] AINSBURY, E. A., 2024. Networking in biological and physical retrospective dosimetry in Europe and beyond. *Journal of Radiation Research*. 65(Supplement_1), i2–i8. ISSN 1349-9157. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rad005>
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), 2011. Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. EPR-Biodosimetry 2011. Vienna: IAEA. ISBN 978-92-0-121010-3.
- [8] ROY, L., G. GRUEL, S. ROCH-LEFÈVRE, A. VAURIJOUX, aj., 2012. Cellular responses to ionizing radiation assessed by gene expression: comparison of human responses in peripheral blood lymphocytes and fibroblasts. *Mutation Research*. 751(2), 206–215. ISSN 0027-5107. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2011.12.006>
- [9] BUCHER, M., D. ENDESFELDER, S. POJTINGER, aj., 2025. RENEb interlaboratory comparison for biological dosimetry based on dicentric chromosome analysis and cobalt-60 exposures higher than 2.5 Gy. *Scientific Reports*. 15, 5485. ISSN 2045-2322. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89966-2>
- [10] MILANOVÁ, M., V. CHMIL, A. TICHÝ a L. LECOVÁ, 2025. Application of dicentric chromosome assay for evaluation of radioprotective effect. *Biology Methods*

and Protocols. 10(1), bpaf058. ISSN 2399-8073. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1093/biometmethods/bpaf058>

- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), 2023. *BS EN ISO 19238:2023 – Radiological protection. Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics – Dicentric assay*. ICS 13.280; 17.240.
- [12] HERNANDEZ, A., D. ENDESFELDER, J. EINBECK, P. PUIG, M. A. BENADJAOUD, aj., 2023. Biodose Tools: an R shiny application for biological dosimetry. *International Journal of Radiation Biology*. [online], 7. února 2023, 1–13. ISSN 0955-3002. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1080/09553002.2023.2176564>
- [13] ENDESFELDER, D., U. OESTREICHER, M. BUCHER, C. BEINKE, C. SIEBENWIRTH, aj., 2023. RENEB inter-laboratory comparison 2021: the dicentric chromosome assay. *Radiation Research*. 199(6), 556–570. ISSN 0033-7587. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1667/RADE-22-00202.1>
- [14] PORT, M., J.-F. BARQUINERO, D. ENDESFELDER, J. MOQUET, U. OESTREICHER, G. TERZOUDI, aj., 2023. RENEB inter-laboratory comparison 2021: Inter-assay comparison of eight dosimetry assays. *Radiation Research*. 199(6), 535–555. ISSN 0033-7587. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1667/RADE-22-00207.1>
- [15] ENDESFELDER, D., U. OESTREICHER, J. F. BARQUINERO, A. VRAL, G. TERZOUDI, J. MOQUET, F. TROMPIER, A. WOJCIK, M. ABEND a M. PORT, 2023. What we have learned from RENEB inter-laboratory comparisons since 2012 with focus on ILC 2021. *Radiation Research*. 199(6), 616–627. ISSN 0033-7587. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1667/RADE-22-00204.1>

Poděkování - podpora

Tato práce byla finančně podpořena Ministerstvem obrany České republiky „Dlouhodobý plán rozvoje organizace 1011“ – Zdravotnická problematika ZHN II Vojenské lékařské fakulty Hradec Králové Univerzity obrany (projekt č. DZRO-FVZ22-ZHN II).

VYUŽITÍ BEZPILOTNÍCH DETEKČNÍCH SYSTÉMŮ V OBLASTI MONITOROVÁNÍ RADIAČNÍ SITUACE V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH

THE USE OF UNMANNED DETECTION SYSTEMS IN THE FIELD OF MONITORING RADIATION SITUATIONS IN REAL CONDITIONS

Bronislav Prokop^a, Daniel Sas^{a*}, Marcel Ohera^b

^a Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, Univerzita obrany, Sídliště Víta Nejedlého, 682 01 Vyškov, Česká republika

^b Státní ústav radiační ochrany, v.v.i, Bartoškova 1450/28, 140 00 Praha 4 - Nusle

* Korespondující autor; e-mail: daniel.sas@unob.cz, tel.: +420 605 155 613

Abstrakt

Článek je věnován možnostem využití bezpilotních detekčních systémů v oblasti monitorování radiační situace. Bepilotní detekční systémy jsou již v ČR zavedeny a využívány Hasičským záchranným sborem a také Státním ústavem radiační ochrany. Jejich využití se jeví jako velmi perspektivní i v Armádě České republiky, a to zejména oblasti radiačního průzkumu. V rámci ověření deklarovaných detekčních schopností byly tyto systémy využity pro monitorování reálné radiační situace s využitím bodových zdrojů ionizujícího záření i plošné kontaminace radioaktivní látkou v terénních podmínkách. Cílem experimentálních měření v terénních podmínkách je vybrat vhodné detektory, které mají potenciál rozšířit a vhodně doplnit současný systém monitorování radiační situace.

Klíčová slova: *detekční systém, UAV, radiační situace, radiační průzkum*

Abstract

The article is devoted to the possibilities of using unmanned detection systems in the field of monitoring the radiation situation. Unmanned detection systems have already been introduced in the Czech Republic and are used by the Fire Rescue Service and the State Institute of Radiation Protection. Their use also appears to be very promising in the Army of the Czech Republic, especially in the field of radiation reconnaissance. As part of the verification of the declared detection capabilities, these systems were used to monitor the real radiation situation using point sources of ionizing radiation and area contamination with radioactive substances in field conditions. The aim of experimental measurements in field conditions is to select suitable detectors that have the potential to expand and appropriately supplement the current system of monitoring the radiation situation.

Key words: *detection systém, UAV, radiation situation, radiation reconnaissance*

ÚVOD

Současná bezpečnostní situace v Evropě, respektive nebývalé využití pokročilých technologií v rusko-ukrajinském konfliktu, otevřeně demonstruje široké použití bezpilotních systémů a stále se rozšiřující škálu jejich možného využití. Mimo to, jsme také v posledním období v Evropě zaznamenaly tendenci narušování bezpečnosti letišť a dalších objektů kritické infrastruktury států, kterou nelze ignorovat, neboť ty ohrožují nejen naši bezpečnost, ale také náš způsob života.

Taktéž hrozba možného nasazení jaderných zbraní, či cílené útoky na jaderné zařízení je něco nového, a to si vyžaduje poměrně rozsáhlý systém protiopatření. Oba typy možných

mimořádných událostí by neměly jen katastrofální důsledky pro vedení vojenských operací, ale významně by ovlivnili i životy nás všech, a to v dlouhodobém horizontu.

Z výše uvedeného je patrné, že aktuální hrozby a rizika plynoucí z bezpečnostního prostředí enormně umocňují požadavky na včasné získávání informací, jejich shromažďování, rychlé vyhodnocení (analýzu) a předání štábu jednotek, popřípadě krizovým štábům, k rozhodnutí a vydání opatření a následně urgentní realizaci. Případný vznik mimořádné události zahrnující radioaktivní kontaminaci (zdroje ionizujícího záření) by následně vyžadoval permanentní monitorování jednotkami AČR a IZS. To před nás staví hned několik výzev. Tou první je modernizace systému monitorování radiační situace, a to především formou začlenění bezpilotních detekčních prostředků do stávajícího systému. Tato schopnost by měla být budována soustavně a cílevědomě, neboť má enormní potenciál pro budoucnost a mimo to, rychlý rozvoj moderních technologií nám v současné době ukazuje jen zlomek možností budoucích. Druhou klíčovou výzvou je soustavně se zlepšovat v oblastech radiačního průzkumu a monitorování radiační situace.

Tento článek je zaměřen na praktické využití bezpilotních radiačních detekčních systémů dle klasifikace NATO Třídy I. Jedná se o systémy určené pro taktický stupeň velení a soustředí se primárně na kategorii mini. Klíčovými požadavky na tyto bezpilotní systémy je přenos a zpracování dat v reálném čase, jejich autonomní ovládání a detekce gama záření v obtížně dostupných a potenciálně rizikových oblastech. Dlouhodobým problémem zůstává, že AČR nemá žádné organické prostředky, které by mohly nést testované detekční systémy, a tak je tato schopnost budována reálně na spolupráci s firmami a institucemi, které je v současnosti vlastní a provozují, především s firmou NUVIA, a.s., se Státním ústavem radiační ochrany, v.v.i, a s Institutem ochrany obyvatelstva z lázní Bohdaneč a dalšími partnery.

1 TESTOVANÉ BEZPILOTNÍ SYSTÉMY S RADIAČNÍMI PODVĚSY

Cílem série experimentálních měření bylo v obecné rovině ověřování deklarovaných schopností detekčních systémů, které jsou již zavedeny a využívány v praxi u HZS či Státního ústavu radiační ochrany, v.v.i. Jedním z logických požadavků je kompatibilita a vzájemná zastupitelnost všech prvků systému v rámci připravenosti a odezvy na mimořádné události. Testovanými bezpilotními systémy byly drones-G mini a vybrané detektory určené pro drones-G Combo.

Modul Drone G Mini (NUVIA,CZ) je miniaturizovaný podvěs dronu v kompaktním provedení s nízkou hmotností. Je vybaven detektorem dávkového příkonu (GM-trubice), spektrometrickým detektorem (speciálně tvarovaný scintilační NaI(Tl) detektor), komunikačním a geopozičním zařízením, výškoměrem a zdrojem napájení. Tento modul lze připojit k takřka libovolné platformě a je zcela autonomní. Pro komunikaci a vyhodnocování byl použit software DRONIC.

Technické parametry modulu:

Radiační rozsah použití: 50nGy.h⁻¹ - 20 mGy.h⁻¹

Integrované detektory: NaI(Tl) Ø 1“ x 2“, 1“ fotonásobič, GM trubice LND 71210

Spektrometrická část: integrovaný gamaspektrometr 50 keV - 3 MeV; 1024 kanálů

Komunikační část: RF 433 MHz/868 MHz, max. dosah 3 km

Výškoměr: optický dálkoměr, max. 50 m

Určení polohy: A-GPS, GLONASS/GALILEO

Napájení: Lipol-Pol 11,1 VDC, 500 mA/h

Hmotnost: 1,2 kg



Obrázek 1 Modul Drones G Mini

Modul Drone G Combo (NUVIA,CZ) je radiační podvěš dronu. Je vybaven integrovaným detektorem dávkového příkonu (GM-trubice), komunikačním a geopozičním zařízením, výškoměrem a zdrojem napájení. Tento modul lze připojit k takřka libovolné platformě a je zcela autonomní. Pro komunikaci a vyhodnocování byl použit software DRONIC a AGAMA. Využity byly dva připojitelné detektory: NaI(Tl) 2“ x 2“ a CeBr₃ 1,5“ x 1,5“.

Technické parametry modulu:

Radiační rozsah použití: 50nGy.h⁻¹ – 20mGy/h.

Integrované detektory: GM trubice LND 71210.

Připojitelné spektrometrické moduly: NaI(Tl) 2“ x 2“, CeBr₃ 1,5“ x 1,5“.

Pracovní charakteristiky spektrometrických modulů:

NaI(Tl) 2“ x 2“ 1024 kanálů, 50keV – 3MeV, rozlišení pod 7,5% pro Cs-137, 50 nGy.h⁻¹ – 18 μGy.h⁻¹

CeBr₃ 1,5“ x 1,5“ – 1024 kanálů, 50keV – 3MeV, rozlišení 4% pro Cs-137, 50 nGy.h⁻¹ – 70 μGy.h⁻¹

Komunikační část: RF 433 MHz/868 MHz, max. dosah 3 km

Výškoměr: laserový výškoměr, dosah max. 50 m

Určení polohy: A-GPS, GLONASS/GALILEO

Napájení: Lipol-Pol 11,1 VDC, 5100 mA/h

Hmotnost s nejtěžším typem detektoru do 5 kg



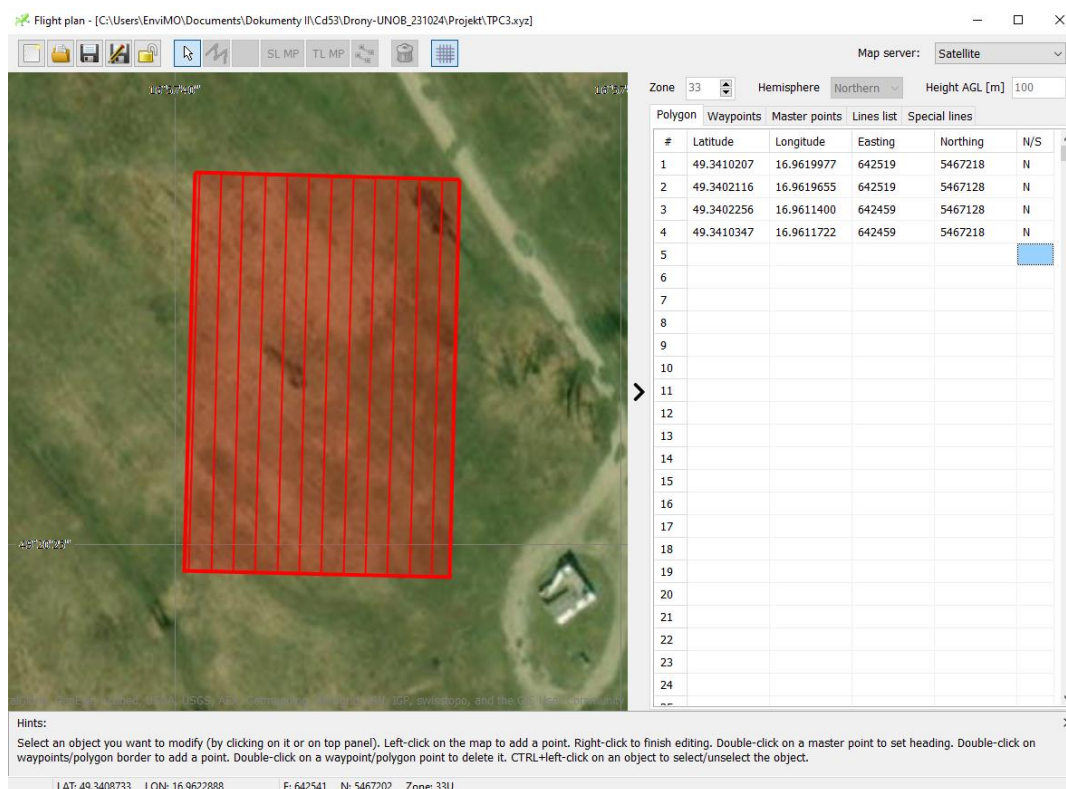
Obrázek 2 Modul Drones G Combo s vyměnitelnými detekčními moduly

2 PRACOVNÍ POSTUP MĚŘENÍ ZDROJŮ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

2.1. Pracovní postup měření bodového zdroje ionizujícího záření

Pro vyhodnocení dat z detektorů NaI(Tl) 2" x 2" a CeBr₃ 1.5" x 1.5" (SÚRO, v.v.i.) byl použitý program AGAMA, který vyhodnocuje data po ukončení letu. V simulaci transportního kódu MCNP6.1 byly vytvořeny matice odezev pro různé bodové nuklidy a letové výšky od 5 m do 50 m. V současné době jsou připraveny matice odezev pro bodové zdroje u detektoru NaI(Tl): Co-60, Cs-137, Eu-152, I-131, Ir-192, Mo-99, Se-75 a u detektoru CeBr₃ Co-60, Cs-137, Eu-152. S využitím metody nejmenších čtverců s nezápornými koeficienty (NN-LSQ) lze pak odhadnout v programu AGAMA aktivity uvedených bodových zdrojů. Dávkový příkon v místě detektoru v případě bodových zdrojů rovněž počítá program AGAMA metodou tzv. powerspektra. Přepočet na výšku 1m se v případě bodových zdrojů neprovádí, přepočet se provádí pouze v případě plošné kontaminace. K dispozici byly zdroje ionizujícího záření o následujících referenčních aktivitách: Eu-152 (370 MBq), Co-60 (3,7GBq) a Cs-137 (3,145 GBq). Před vlastním měřením byla funkčnost a kalibrace každého detektoru ještě ověřena pomocí bodového zdroje EG-3 Cs-137 o aktivitě 185 kBq.

Byl vytvořen polygon, nad kterým byl proveden letecký radiační průzkum pomocí dronů. Polygon byl nejprve proměřen bez zdrojů IZ za účelem zjištění dávkového příkonu přírodního pozadí (nelze stanovit, hluboce pod MDA). Následně do polygonu byly umístěny všechny 3 výše uvedené zdroje IZ. Tento polygon v různých letových výškách proměřily drony vybavené radiačními podvěsy se všemi třemi typy detektorů. Naměřená data byla poté zpracována pro stanovení hodnot dávkových příkonů, odhad aktivit bodových zdrojů a výpočet MDA pro jednotlivé radionuklidy.



Obrázek 3 Polygon vytvořený pro měření bodových zdrojů IZ

2.2. Pracovní postup měření plošného zdroje ionizujícího záření

Plošný zdroj ionizujícího záření byl vytvořen rovnoměrným rozptýlením vodného roztoku radionuklidu La-140 o aktivitě $17,5 \pm 0,9 \text{ MBq}$ na plochu o rozměrech 20×20 metrů. Původně se počítalo s celkovou aktivitou La-140 okolo 200 MBq , technické možnosti výroby radionuklidu (ozařování v reaktoru) však umožnily vyrobit radionuklid pouze s výše uvedenou aktivitou. Před vlastním měřením byly provedeny simulace výpočtů dávkových příkonů v různých výškách v kódu MCNP6.1 nad středem kontaminované plochy. Vycházelo se z následujících informací. Předpokládaná aktuální aktivita La-140 v době měření cca $(12,0 \pm 0,9) \text{ MBq}$, tedy 30 kBq.m^{-2} . ICRU 53 1994 uvádí hodnotu dávkového příkonu ve výšce 1 m nad zemí $9.27 \text{ E-3 nGy.h}^{-1}$ na 1 kBq.m^{-2} pro nekonečně veliký plošný zdroj. By připraven kontrolní kód v MCNP standardním postupem, zdroj měl poloměr $r = 700 \text{ m}$ a Tally6 bylo přepočteno pro plošnou aktivitu 1 kBq.m^{-2} , což v 1 m nad zemí dalo dávkový příkon $8.85 \text{ E-3 nGy.h}^{-1}$ na 1 kBq.m^{-2} . Rozdíl mezi literárním údajem v ICRU 53 a výpočtem v simulaci je -4.6% . Tento úbytek může být způsoben nezapočtením příspěvku ze vzdáleností $> 700 \text{ m}$. I tak lze považovat vypočtenou hodnotu za velmi dobrý výsledek a verifikaci kódu.

Před vlastním měřením byla funkčnost a kalibrace každého detektoru ještě ověřena pomocí bodového zdroje EG-3 Cs-137 o aktivitě 185 kBq . Kontaminovanou plochu proměřily drony, vybavené radiačními podvěsy se všemi třemi typy detektorů, v různých letových výškách. Naměřená data byla poté zpracována pro stanovení hodnot dávkových příkonů v 1 metru nad terénem, odhad plošné aktivity a výpočet MDA.



Obrázek 4 Polygon vytvořený pro měření plošného zdroje IZ

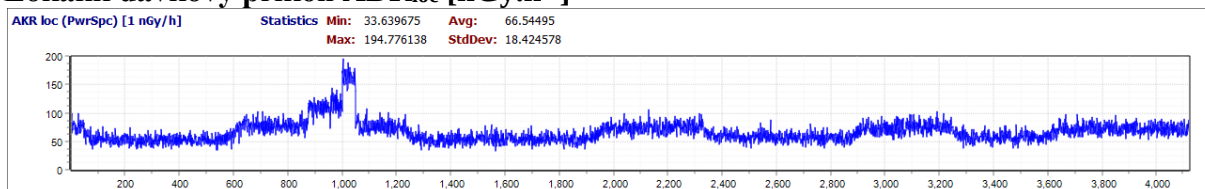
3 VÝSLEDKY A DISKUSE

3.1. Měření bodových zdrojů ionizujícího záření

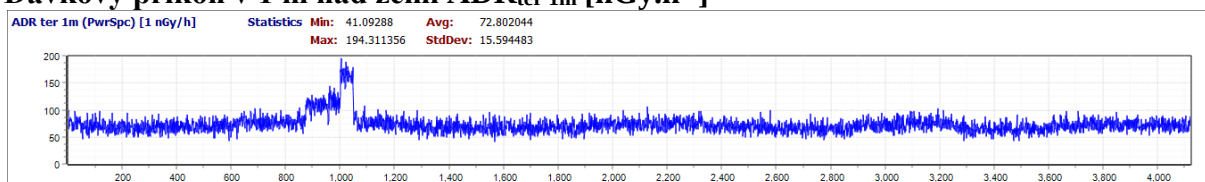
3.1.1. Měření bodových zdrojů IZ s detektorem NaI(Tl) 2"x2" (SÚRO, v.v.i.)

Měření bodových zdrojů IZ s detektorem NaI(Tl) 2"x2" bylo provedeno ve vymezeném polygonu. Nejprve byly změřeny a stanoveny dávkové příkony od přírodního pozadí přepočítané na výšku 1 metr nad zemí, viz. obr.5.

Lokální dávkový příkon ADR_{loc} [$nGy \cdot h^{-1}$]



Dávkový příkon v 1 m nad zemí $ADR_{ter 1m}$ [$nGy \cdot h^{-1}$]



LAlt [m]

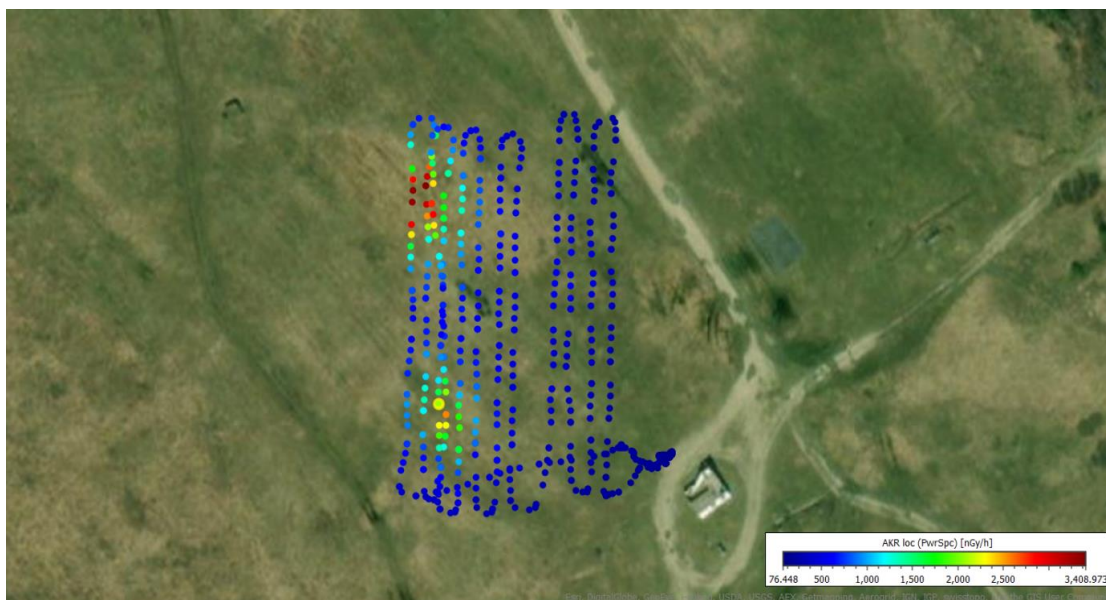


Obrázek 5 Hodnoty lokálního dávkového příkonu ADR_{loc} (v místě detektoru) a ve výšce 1 m nad zemí $ADR_{ter 1m}$ (v 1 m nad zemí) v $nGy \cdot h^{-1}$ a letová výška LAlt v metrech

Průměrná hodnota přírodního pozadí v 1 metru nad zemí se ve vymezeném polygonu pohybovala okolo 80 nGy.h^{-1} . Zároveň byla ověřena správnost přepočtu dávkového příkonu na 1 metr tím, že se drony při měření pohybovaly v různých výškách od 0 do 25 metrů a tato hodnota se výrazně neměnila. Zvýšená hodnota dávkového příkonu přibližně u záznamů 850 až 1050 byla způsobena manipulací se zdrojem v blízkosti detektoru, když byl dron na zemi.

Dále byly vypočteny programem AGAMA u detektoru NaI(Tl) 2“ x 2“ (SÚRO,v.v.i.) minimální detekovatelné aktivity (MDA) pro přírodní radionuklidy a jednotlivé letové výšky a byly porovnány s pozemním in-situ měřením HPGe polovodičovým gamaspektrometrem v roce 2018. Hodnoty aktivit z pozemního měření přírodních nuklidů jsou hluboce pod MDA u detektoru NaI(Tl) 2“ x 2“.

Pro letové výšky 10 metrů a 20 metrů byly naměřeny a spočítány lokální dávkové příkony jednotlivých bodových zdrojů umístěných v určeném polygonu. Dále byly provedeny odhady aktivit těchto zdrojů. Výsledky měření jsou prezentovány v následujících obrázcích a tabulkách.



Obrázek 6 Stanovení lokálního dávkového příkonu ADR_{loc} pro letovou výšku $LAlt = 10 \text{ m}$ se zdroji IZ

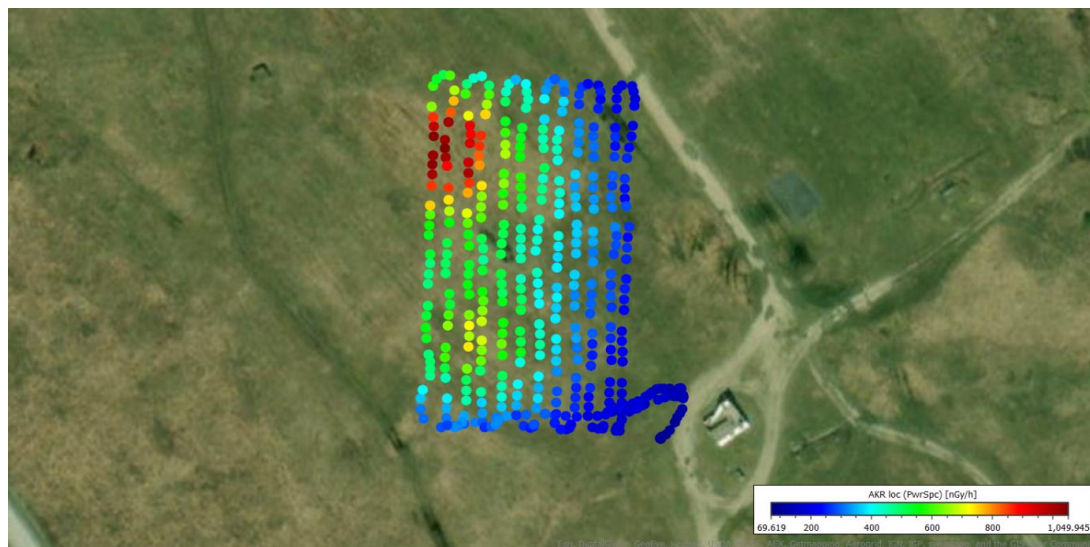
Tabulka1 Dávkové příkony nad zdroji IZ (ve výšce 10 m)

Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[nGy.h ⁻¹]	[nGy.h ⁻¹]
⁶⁰ Co	11.0	3783	3400
¹³⁷ Cs	8.1	2614	2572
¹⁵² Eu	10.0	284	Nedetekován

Tabulka 2 Odhad aktivit bodových zdrojů pro $LAlt = 10 \text{ m}$

Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[MBq]	[MBq]
⁶⁰ Co	11.0	1486	1275
¹³⁷ Cs	8.1	2230	1574
¹⁵² Eu	10.0	189	<MDA

Z uvedených dat je zřejmá velmi dobrá shoda vypočtených a naměřených hodnot dávkových příkonů a poměrně dobrý odhad aktivit bodových zdrojů pro letovou výšku 10 metrů. Radionuklid Eu-152 nebyl vzhledem k jeho nízké aktivitě, nacházející se pod úrovní MDA, detekován.



Obrázek 7 Stanovení lokálního dávkového příkonu ADR_{loc} pro $LAlt = 20$ m nad zdroji IZ

Tabulka 3 Dávkové příkony nad zdroji IZ (20 m)

	Zdroj	Letová výška	Výpočet	AGAMA
		[m]	[nGy.h ⁻¹]	[nGy.h ⁻¹]
1	⁶⁰ Co	20.8	1058	1050
2	¹³⁷ Cs	18.5	501	737
3	¹⁵² Eu	20.0	71	Nedetekován

Tabulka 4 Odhad aktivit bodových zdrojů pro $LAlt$ (20 m)

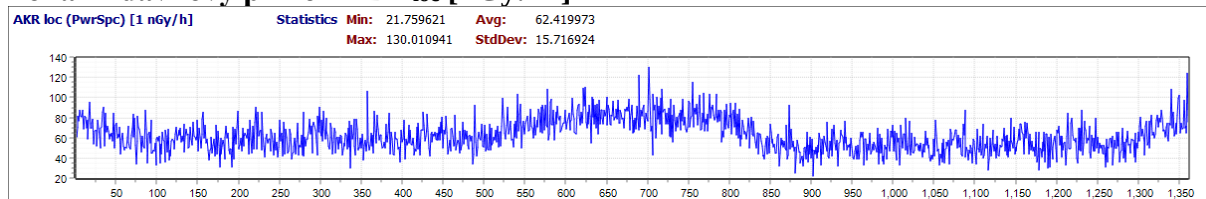
Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[MBq]	[MBq]
⁶⁰ Co	20.8	1486	1540
¹³⁷ Cs	18.5	2230	2040
¹⁵² Eu	20.0	189	<MDA

Velmi podobná shoda vypočtených a naměřených hodnot dávkových příkonů a poměrně dobrý odhad aktivit bodových zdrojů byl zaznamenán i pro letovou výšku 20 metrů. Radionuklid Eu-152 nebyl detekován, opět vzhledem k jeho nízké aktivitě nacházející se v úrovni pod MDA.

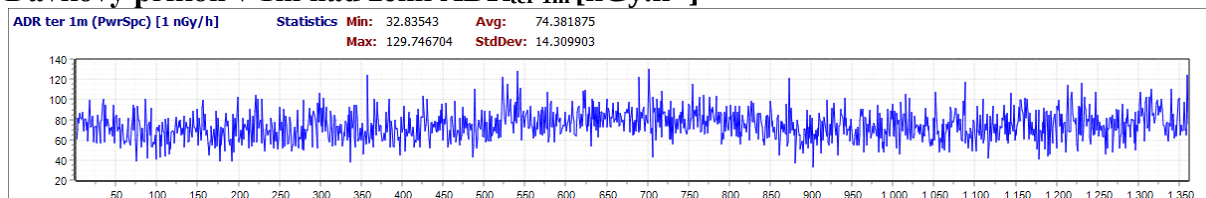
3.1.2. Měření bodových zdrojů IZ s detektorem CeBr₃ 1,5“x1,5“ (SÚRO, v.v.i.)

Měření bodových zdrojů IZ s detektorem CeBr₃ 1,5“x1,5“ bylo provedeno ve vymezeném polygonu. Nejprve byly změřeny a stanoveny dávkové příkony od přírodního pozadí přepočítané na výšku 1 metr nad zemí, stejně jako v předchozím případě s detektorem NaI(Tl) 2“ x 2“, viz. obr.8

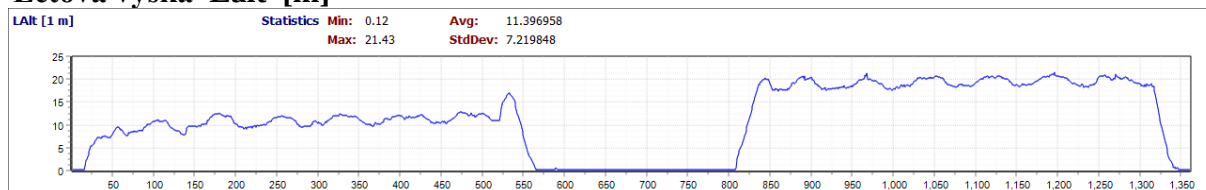
Lokální dávkový příkon ADR_{loc} [$nGy \cdot h^{-1}$]



Dávkový příkon v 1 m nad zemí $ADR_{ter 1m}$ [$nGy \cdot h^{-1}$]



Letová výška L_{alt} [m]



Obrázek 8 Hodnoty lokálního dávkového příkonu ADR_{loc} [$nGy \cdot h^{-1}$] a dávkového příkonu v 1 m nad zemí $ADR_{ter 1m}$ [$nGy \cdot h^{-1}$] stanovené detektorem $CeBr_3$ 1.5" x 1.5"

Průměrná hodnota přírodního pozadí v 1 metru nad zemí se ve vymezeném polygonu pohybovala okolo $80 nGy \cdot h^{-1}$. I u tohoto typu detektoru byla ověřena správnost přepočtu dávkového příkonu na 1 metr tím, že se drony při měření pohybovaly v různých výškách od 0 do 25 metrů a tato hodnota výrazně se neměnila. V programu AGAMA byly opět vypočteny minimální detekovatelné aktivity (MDA) pro přírodní radionuklidy a jednotlivé letové výšky.

Pro letové výšky 10 metrů a 20 metrů byly naměřeny a spočítány lokální dávkové příkony jednotlivých bodových zdrojů umístěných v určeném polygonu. Dále byly provedeny odhady aktivit těchto zdrojů. Výsledky měření jsou uvedeny v následujících obrázcích a tabulkách.

Tabulka 5 Dávkové příkony nad zdroji IZ (10 m)

Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[$nGy \cdot h^{-1}$]	[$nGy \cdot h^{-1}$]
^{60}Co	9.96	4600	4300
^{137}Cs	8.15	2580	3000
^{152}Eu	11.2	226	655

Tabulka 6 Odhad aktivit bodových zdrojů pro $L_{Alt} = 10 m$

Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[MBq]	[MBq]
^{60}Co	9.96	1486	1200
^{137}Cs	8.15	2230	1900
^{152}Eu	10.0	189	<MDA

Tabulka 7 Dávkové příkony nad zdroji IZ (20 m)

Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[nGy.h ⁻¹]	[nGy.h ⁻¹]
⁶⁰ Co	20.1	1132	1250
¹³⁷ Cs	19.1	470	707
¹⁵² Eu	20.0	71	Nedetekován

Tabulka 8 Odhad aktivit bodových zdrojů pro LAlt (20 m)

Zdroj IZ	Letová výška	Výpočet	AGAMA
	[m]	[MBq]	[MBq]
⁶⁰ Co	20.1	1486	1400
¹³⁷ Cs	19.1	2230	2400
¹⁵² Eu	20.0	189	<MDA

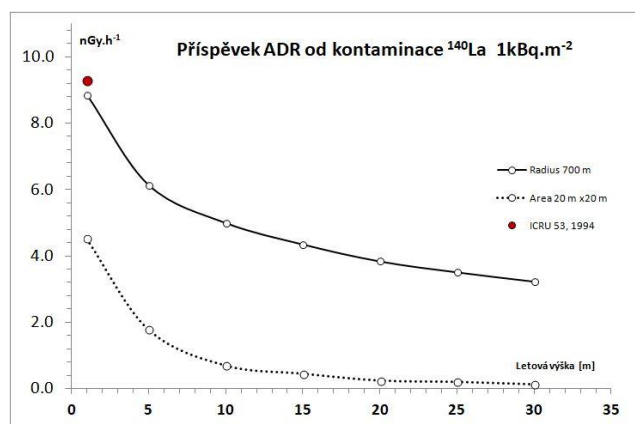
Na základě naměřených dat byly spočítány průměrné hodnoty MDA pro jednotlivé použité radionuklidy v letových výškách 10 a 20 metrů. Z uvedených hodnot je zřejmé, že pro potřeby radiačního průzkumu je vhodnější detektor CeBr₃ 1,5“ x 1,5“, který vykazuje podstatně nižší MDA v porovnání s detektorem NaI(Tl) 2“ x 2“.

Tabulka 9 Průměrné hodnoty MDA

Letová výška [m]	Detektor	MDA ⁶⁰ Co [MBq]	MDA ¹³⁷ Cs [MBq]	MDA ¹⁵² Eu [MBq]
10 m	NaI(Tl) 2“ x 2“	110	180	170
20 m	NaI(Tl) 2“ x 2“	220	250	nestanovena
10 m	CeBr ₃ 1.5“ x 1.5“	50	50	150
20 m	CeBr ₃ 1.5“ x 1.5“	230	230	620

3.2. Měření plošného zdroje IZ

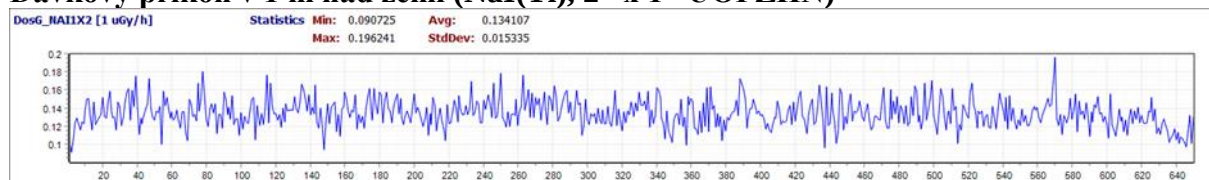
Měření plošného zdroje IZ s detektory NaI(Tl) 2“x 1“ (ÚOPZHN, IOO), NaI(Tl) 2“x 2“ (SÚRO) a CeBr₃ 1.5“x 1.5“ (SÚRO), bylo provedeno ve vymezeném polygonu.



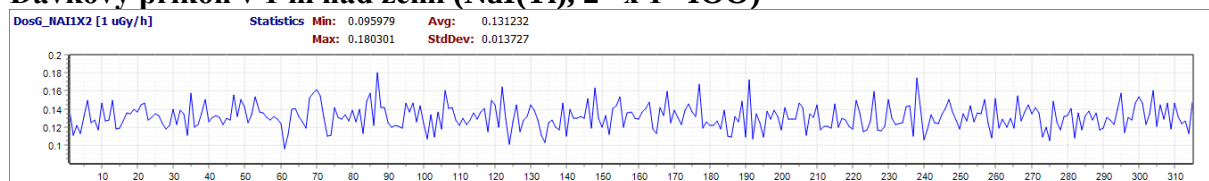
Obrázek 8 Příspěvek dávkového příkonu v 1 m nad zemí způsobený kontaminací La-140 o aktivitě 1 kBq.m⁻² z nekonečné plochy (podle ICRU 53), z plochy s poloměrem r=700 m; a plochy 20m x 20m

Očekávaná hodnota příspěvku dávkového příkonu od radioizotopu La-140 pro danou plošnou aktivitu 30 kBq.m^{-2} by měla být cca 130 nGy.h^{-1} . Všechny 4 různé detektory ukazovaly nad kontaminovanou plochou dávkový příkon v rozsahu mezi 80 až 130 nGy.h^{-1} ve výšce 1m. Tedy spíše mírně vyšší hodnotu přírodního pozadí a celkový dávkový příkon nižší než bylo očekáváno. Výsledky měření jsou uvedeny v následujících obrázcích.

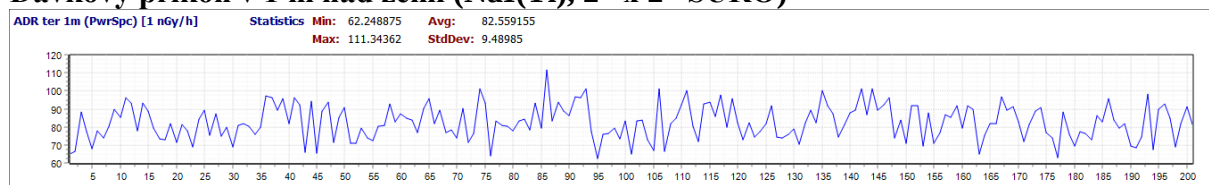
Dávkový příkon v 1 m nad zemí (NaI(Tl), 2“ x 1“ ÚOPZHN)



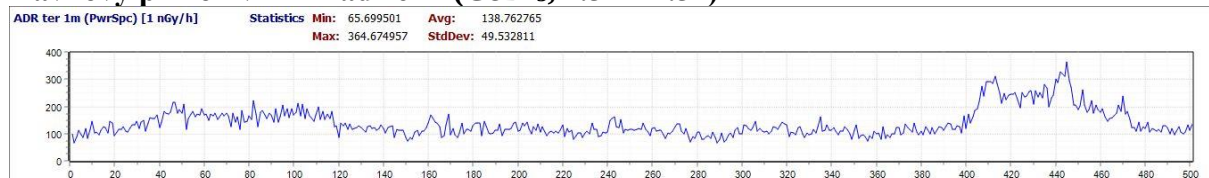
Dávkový příkon v 1 m nad zemí (NaI(Tl), 2“ x 1“ IOO)



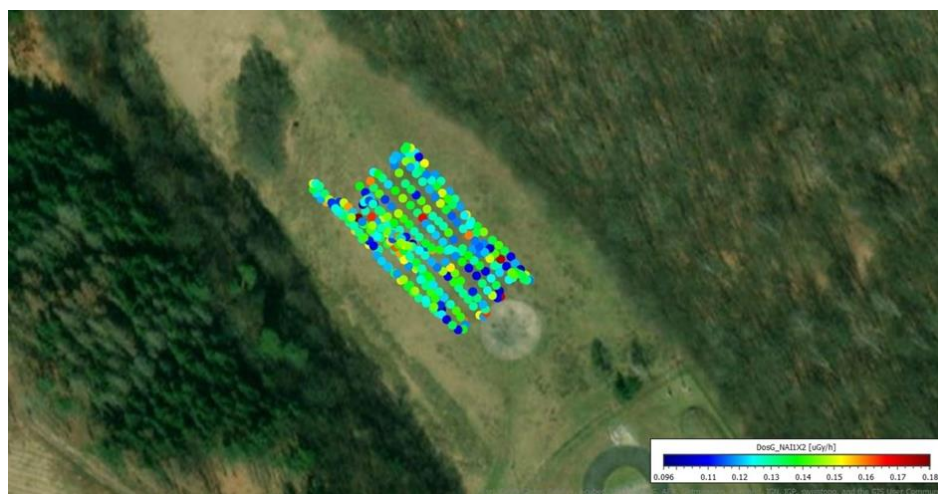
Dávkový příkon v 1 m nad zemí (NaI(Tl), 2“ x 2“ SÚRO)



Dávkový příkon v 1 m nad zemí (CeBr3, 1.5“ x 1.5“)

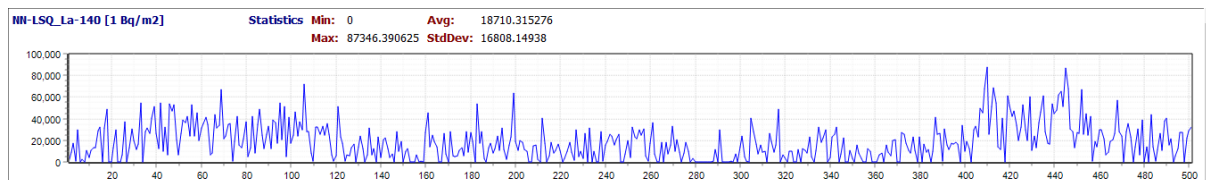


Obrázek 9 Hodnoty dávkového příkonu v 1m nad zemí v nGy.h^{-1} a $\mu\text{Gy.h}^{-1}$ pro různé typy detektorů



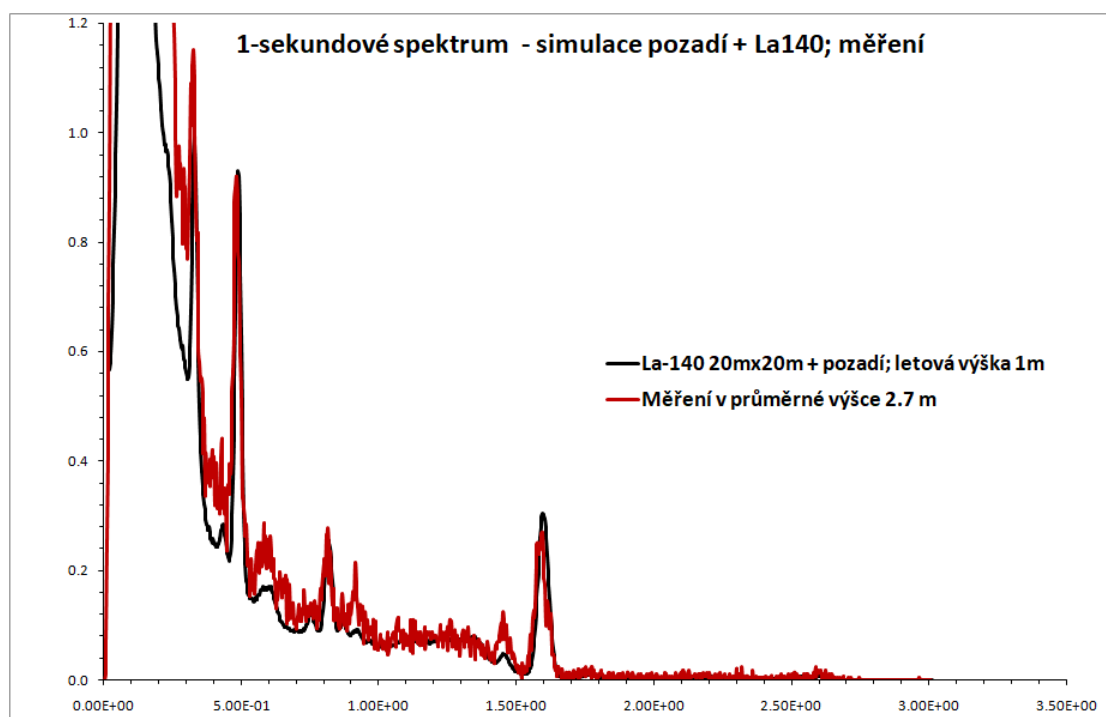
Obrázek10 Stanovení dávkového příkonu v 1 metru nad kontaminovanou plochou, detektor NaI(Tl) 2“x 1“ (ÚOPZHN, IOO)

Spektra použitého radionuklidu La-140 byla detekována pouze detektorem CeBr 1,5“ x 1,5“ při letové výšce v rozmezí 1 m až 5 m (průměrná výška 2.7 m). Nad kontaminovanou plochou byla stanovena u tohoto detektoru průměrná hodnota plošné aktivity cca 20 kBq.m². Údaje byly vypočteny v programu AGAMA metodou NN-LSQ s maticemi odezev La-140 pro plochu 20 m x 20 m, tedy reálnou kontaminovanou plochu.



Obrázek 11 Hodnoty plošné aktivity La-140 v Bq.m⁻²; naměřeno detektorem CeBr₃, vypočteno programem AGAMA

Bylo provedeno porovnání průměrného sekundového spektra simulovaného pro radionuklid La-140 s aktivitou 30 kBq.m⁻² a naměřeného průměrného spektra detektoru CeBr₃ 1.5“ x 1.5“ (vypočtená průměrná hodnota 20 kBq.m⁻²). V sumárním spektru (500 sekund) z průměrné výšky měření 2.5 metru s detektorem CeBr₃ jsou vidět slabé píky použitého radionuklidu La-140 o energiích 487 keV a 1596 keV. Veškerá data z měření plošného zdroje kontaminace nebyla ještě ke dni zpracování článku, z tohoto důvodu jsou uvedena a prezentována pouze dílčí vyhodnocení.



Obrázek 12: Porovnání průměrného 1 sekundového spektra naměřeného detektorem CeBr₃ v průměrné výšce 2.7 m nad plochou v porovnání se simulovaným spektrem s plošnou aktivitou cca 30 kBq.m⁻².

ZÁVĚR

Výsledky získané při experimentálních měřeních v terénních podmínkách s bodovými a plošnými zdroji ionizujícího záření lze shrnout do několika poznatků. Mezi nejdůležitější patří následující. Drony s radiačními podvěsy jsou pro plnění úkolů radiačního průzkumu a monitorování radiační situace v podmínkách AČR vyhovující. Mají však své limity, které jsou dány především jejich fyzickou použitelností – doba provozu silně závisí na druhu a velikosti

použité baterie a spotřebě dronu, použitelnost dronu je také velmi závislá na meteorologických podmínkách, zejména na rychlosti větru a dešti. Nejsou tedy univerzálním řešením pro výše uvedené způsoby použití, lze však s nimi počítat jako s doplňkem vhodným k rozšíření schopností stávajících ručních, mobilních a leteckých radiačních systémů k provádění radiačního průzkumu a monitorování radiační situace.

Z hlediska jejich detekčních vlastností lze říci, že v závislosti na typu použitého detektoru, umožňují kvantitativní i kvalitativní stanovení radioaktivní kontaminace terénu. Jednotlivé typy použitých detektorů se vyznačují různými vlastnostmi pro detekci a analýzu radioaktivní kontaminace. Všechny testované typy velmi dobře zvládají stanovení dávkového příkonu a jeho přepočít na výšku 1 metr nad zemí. V oblasti detekce a identifikace radioaktivní kontaminace se ukázal jako nejvhodnější detektor CeBr_3 1,5“ x 1,5“, který byl jako jediný schopen načíst spektrum a identifikovat radionuklid použitý pro vytvoření plošné kontaminace, přičemž jeho plošná aktivita byla velmi nízká a pohybovala se na úrovni MDA pro tento detektor. Ostatní použité typy detektorů plošnou kontaminaci těsně nad úrovní přírodního pozadí pouze detekovaly, bez možnosti její spektrometrické analýzy a následné identifikace. Jako zásadní se pro takto nízké aktivity radionuklidů ukázalo poletové vyhodnocení naměřených dat, kde by bez potřebného sofistikovaného software AGAMA nebylo možné spoustu dat správně vyhodnotit a interpretovat.

V dalším období budeme pokračovat v experimentech s radiačními podvěsy dronu s cílem mít co nejvíce praktických zkušeností s tímto typem detekčních systémů, naměřit a vyhodnotit co nejvíce dat a širokou škálu vojensky významných radionuklidů s co největším rozsahem aktivit, abychom reálně zjistili možnosti použití těchto systému a jejich hranice pro provádění radiačního průzkumu a monitorování radiační situace v podmínkách AČR.

Použitá literatura

- [1] DRONES-G MINI. *NUVIATech Instruments* [online]. [cit.2025-09-12]. Dostupné z: <https://www.nuviatech-instruments.com/cz/Produkt/drones-g-mini/>.
- [2] DRONES-G. *NUVIATech Instruments* [online]. [cit.2025-09-08]. Dostupné z: <https://www.nuviatech-instruments.com/cz/Produkt/drones/>
- [3] GRISA T.; FIŠEROVÁ L.; BOHUSLAV P.; BRACHNA R.; GRYC L.; NOVÁKOVÁ M.: Vývoj kompaktního podvěsu pod dron s integrovaným detektorem radiace. In *CBRN Protect*. pp. 69 -70, 2023.
- [4] INDREI J.; PIPAL V.: Poznatky z výcviku s otevřeným zdrojem ionizujícího záření. In *CBRN Protect*, pp.114.,2023.
- [5] KAREŠ J; FIŠERA O.: Rozvoj systému detekce a monitorování ionizujícího záření “DEMONIZ”. Souhrnná výzkumná zpráva obsahující dostupné aktuální informace o typech a počtech a organizačním začlenění používaných měřidel IZ v AČR, komplexní návrh nového systému měřidel IZ v AČR zohledňující aktuální a predikované radiační hrozby a návrhy adekvátních změn směrnic a předpisů. Vojenský výzkumný ústav, s.p., pp.35, 2019.
- [6] OHERA, Marcel, GRYC, Lubomír, NOVÁKOVÁ, Martina, ČEŠPÍROVÁ, Irena, SAS, Daniel. Application of unmanned aerial vehicles in emergency radiation monitoring. *Radiation Measurements*, 2024(174), 107111. ISSN 1350-4487. IF 2,200. doi:10.1016/j.radmeas.2024.107111

Poděkování – podpora

Na tomto místě bychom rádi poděkovali našim partnerům za spolupráci. Konkrétně kolegům ze Státního ústavu radiační ochrany paní Mgr. Martině Novákové a Ing. Lubomíru Grycovi, pánům Ing. Tomáši Grísovi, Ph.D. a Ing. Radku Nezvalovi z firmy NUVIA, a.s., a dále pak pánům pplk. Ing. Renému Markovi a kpt. Ing. Michalu Setníčkovi z Institutu ochrany obyvatelstva Lázně Bohdaneč, Vojenskému výzkumnému ústavu, s.p., a Velitelství výcviku Vojenské akademii ve Vyškově.

Tato stat' byla podpořena projektem Ministerstva obrany České republiky v rámci Dlouhodobého plánu rozvoje organizace - Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany "Výzkum metod a technologií ochrany před účinky zbraní hromadného ničení a průmyslových nebezpečných látek II" (DZRO-UOPZHN22-PROTECT II).

VYUŽITÍ SOFTWARE GEOMETRY COMPOSER PRO ÚČINNOSTNÍ KALIBRACE NECHARAKTERIZOVANÝCH HPGE DETEKTORŮ

APPLICATION OF GEOMETRY COMPOSER SOFTWARE FOR EFFICIENCY CALIBRATION OF UNCHARACTERIZED HPGE DETECTORS

Tereza Tomanová*, Jiří Janda

Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, Univerzita obrany, Sídliště Váta Nejedlého, 682 01 Vyškov, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: tereza.tomanova@unob.cz, tel.: +420 736 615 864

Abstrakt

Príspevek shrnuje výsledky výzkumu zaměřeného na využití softwaru Geometry Composer, který je součástí balíku Genie 2000, pro účinnostní kalibrace necharakterizovaných germaniových detektorů (HPGe). Kalibrace založené na obecné charakterizaci detektoru vytvořené s využitím modelovacího kódu MCNP byly porovnány s kalibracemi z plně charakterizovaných detektorů. Byl hodnocen vliv různých měřicích geometrií na přesnost kalibrace.

Klíčová slova: *Geometry Composer, gamaspektrometrie, HPGe detektor, účinnostní kalibrace, MCNP*

Abstract

The paper summarizes research focused on the use of the Geometry Composer software, a component of the Genie 2000 suite, for efficiency calibration of uncharacterized HPGe detectors. Calibrations based on a generic detector characterization created using the MCNP modeling code were compared with calibrations from fully characterized detectors. The influence of different measurement geometries on calibration accuracy was evaluated.

Key words: *Geometry Composer, gamma-ray spectrometry, HPGe detector, efficiency calibration, MCNP*

ÚVOD

Účinnostní kalibrace germaniových (HPGe) detektorů představuje nezbytný krok pro kvantitativní vyhodnocení gamaspektrometrických měření. Tradičně se provádí experimentální cestou s využitím certifikovaných etalonových zdrojů a standardních měřicích geometrií. Tento postup je sice přesný, avšak časově i finančně náročný a v případě specifických nebo nestandardních vzorků často obtížně realizovatelný. [1,2]

Alternativou se v posledních letech stává využívání modelovacích a simulačních metod, které umožňují provádět účinnostní kalibrace i pro složité geometrie vzorků. Mezi nejrozšířenější patří Monte Carlo simulace, zejména s využitím kódu MCNP, které umožňují detailní popis transportu záření v různých prostředích a konfiguracích. [3]

Jedním z přístupů, který kombinuje flexibilitu modelování s uživatelskou dostupností, je software Geometry Composer (GC) integrovaný do balíku Genie 2000. Tento nástroj umožňuje generovat účinnostní kalibrační křivky na základě modelů vytvořených buď pro konkrétně charakterizované detektory, nebo pomocí obecných (generic) šablon. Právě možnost využití

obecných charakterizací je perspektivní pro situace, kdy není k dispozici detailní parametrizace konkrétního detektoru. [4-6]

Následující text hodnotí využitelnost softwaru Geometry Composer pro účinnostní kalibrace necharakterizovaných HPGe detektorů a porovnává výsledky kalibrací založených na obecných charakterizacích s výsledky získanými pomocí plně charakterizovaného detektoru. Současně je analyzován vliv různých měřicích geometrií na přesnost kalibrace.

1 MATERIÁL A METODY

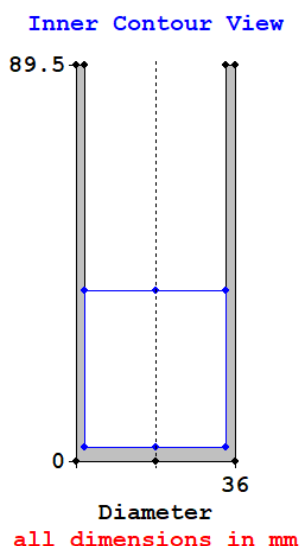
1.1. Použité detektory

Pro experimentální měření byly využity germaniové (HPGe) detektory typu GC3020, BE5030 a GC3019 (CANBERRA), s různými rozměry aktivních krystalů a koncovými úpravami. Tyto detektory pokrývají běžné spektrum používané v laboratorní i terénní gamaspektrometrii a umožňují srovnání přesnosti kalibrace mezi plně charakterizovanými a necharakterizovanými (generic) konfiguracemi. Kalibrace byly prováděny s využitím balíku Genie 2000 (Advanced Spectroscopy Software, CANBERRA), konkrétně modulu Geometry Composer.

1.2. Radionuklidy a geometrie

K experimentálním kalibracím byly využity etalonové zdroje obsahující radionuklidy: Am-241 (59,5 keV), Ba-133 (356 keV), Cs-137 (661 keV), Co-57 (122 keV), Co-60 (1173 a 1332 keV), Y-88 (898 a 1836 keV). Tento soubor zářičů pokrývá široký energetický rozsah gama fotonů od desítek do téměř dvou tisíc keV, což umožňuje posoudit účinnostní kalibrace napříč celým spektrem.

Byly testovány různé laboratorní geometrie, které reprezentují běžně používané způsoby přípravy vzorků pro gamaspektrometrii. Jako standardní byla zvolena Marinelliho nádoba o objemu 1 l. Dále byly využity nádoby s kulatou i hranatou podstavou a vialky o objemu 30 ml, které se běžně používají pro kapalné a nízko objemové vzorky.



Obrázek 1 Vialka o objemu 30 ml vymodelovaná v prostředí Geometry Composer

1.3. Postup měření

Vzorky byly měřeny v takových časových intervalech, aby bylo možné získat spektra vhodná pro následné vyhodnocení. Získaná spektra byla přiřazena jednotlivým geometriím, jejichž rozměry byly následně přesně změřeny a v prostředí Geometry Composer vytvořeny modely. Na jejich základě byly vygenerovány účinnostní kalibrační křivky. Vyhodnocení výsledků a posouzení shody probíhalo dle metodiky používané Českým hydrometeorologickým ústavem pro zkoušky k ověření stanoveného měřidla. Kritérium úspěšnosti bylo u všech radionuklidů posuzováno podle vzorce $|\Delta| \leq (10 + \varepsilon) \%$ [7], kde odchylka Δ byla počítána jako [7]:

$$\Delta = \frac{A - A^0}{A^0} \cdot 100\%$$

kde

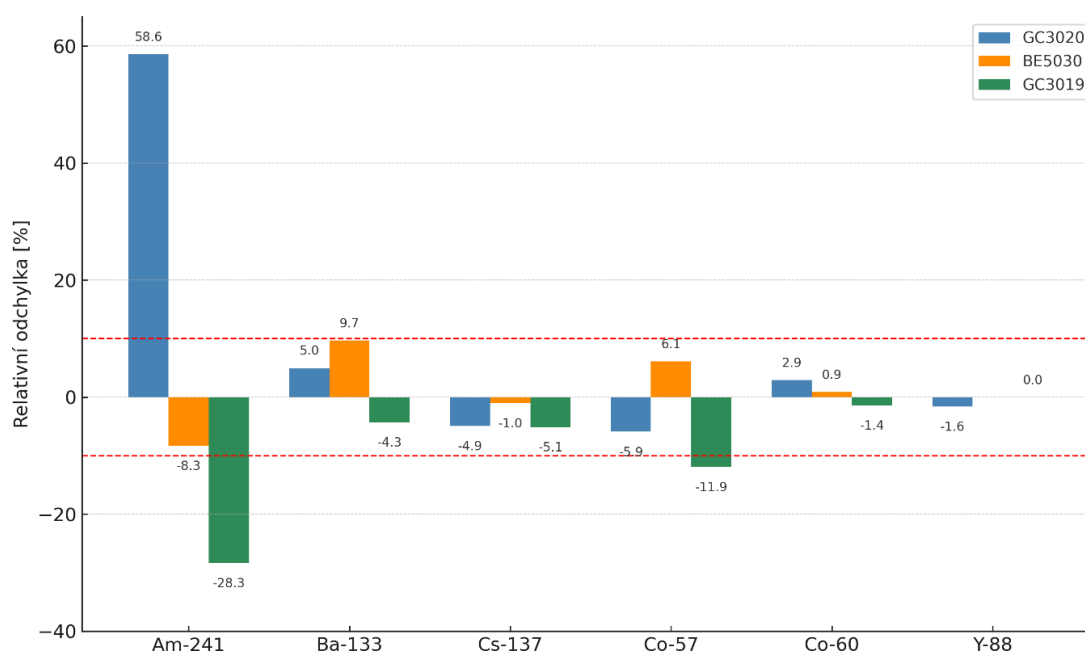
- A^0 deklarovaná aktivita etalonu (konvenční pravá hodnota) [Bq];
- A aktivita etalonu, stanovená pomocí ověřovaného měřidla [Bq];
- ε kombinovaná rozšířená nejistota stanovení aktivity etalonu ($k = 3$)

Validace metodiky byla provedena na reálných vzorcích, u kterých byly stanoveny aktivity vybraných radionuklidů. Odchyly mezi deklarovanými a vypočtenými hodnotami sloužily k posouzení přesnosti Geometry Composeru i v praktických podmínkách.

2 VÝSLEDKY A DISKUZE

2.1 Porovnání výsledků účinnostní kalibrace pro charakterizovaný a necharakterizovaný detektor

Při vyhodnocení účinnostní kalibrace pro vialku o objemu 30 ml byly porovnány výsledky získané pomocí dvou obecných (generic) charakterizací detektorů GC3020 a GC3019 s výsledky charakterizovaného detektoru BE5030.

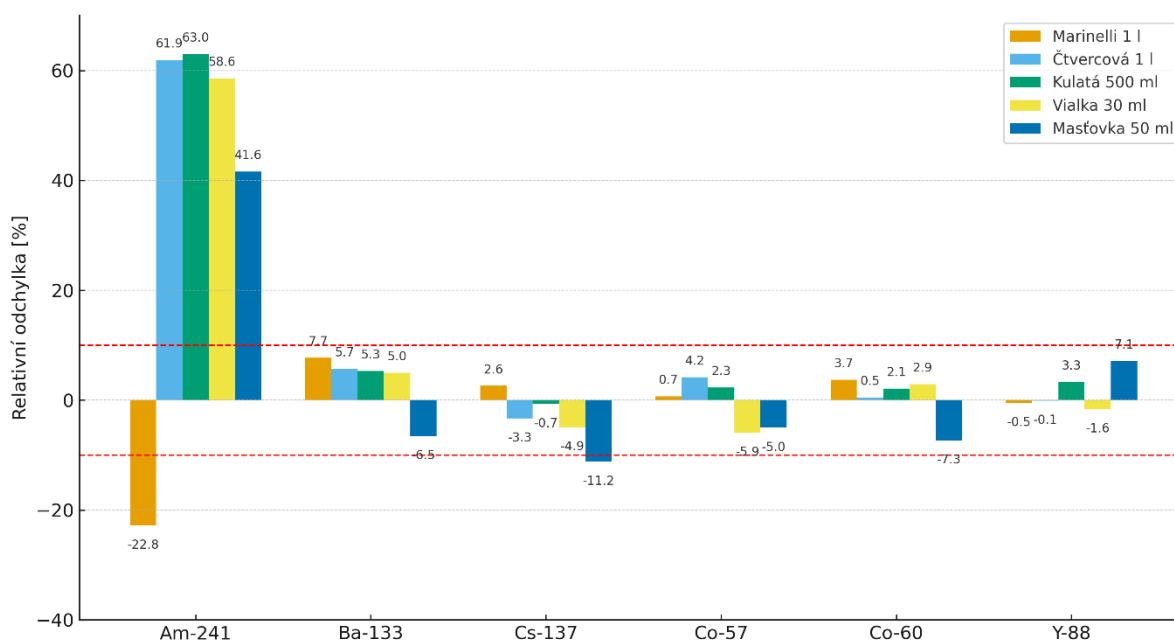


Obrázek 2 Relativní odchylky výsledků účinnostních kalibrací detektorů pro vialku o objemu 30 ml; červeně je vyznačeno toleranční pásmo $\pm 10\%$.

Z grafu je patrné, že relativní odchylky u většiny radionuklidů se pohybují v rozmezí $\pm 10\%$, tedy splňují kritérium úspěšnosti. Nejvýraznější rozdíly byly zaznamenány u nízkoenergetického radionuklidu Am-241, kde obecná charakterizace detektoru GC3020 nadhodnotila výsledek o 58,6 %, zatímco GC3019 vykázal podhodnocení $-28,3\%$. Pro ostatní radionuklidy (Ba-133, Cs-137, Co-57, Co-60, Y-88) se výsledky obou obecných charakterizací i charakterizovaného detektoru BE5030 pohybovaly v akceptovatelných mezích. Celkově lze konstatovat, že Geometry Composer umožňuje využití obecných charakterizací i u malých objemových geometrií, avšak u nízkoenergetických zářičů je nutná zvýšená opatrnost.

2.2 Vliv různých měřicích geometrií

Pro ověření vlivu různých laboratorních geometrií na přesnost účinnostní kalibrace byly vyhodnoceny relativní odchylky stanovené aktivity pro šest vybraných radionuklidů. Do porovnání byly zahrnuty jak standardní nádoby (Marinelliho nádoba o objemu 1 l), tak i alternativní měřicí geometrie (nádoba s čtvercovou podstavou, nádoba s kulatou podstavou, vialka o objemu 30 ml a masťovka o objemu 50 ml).

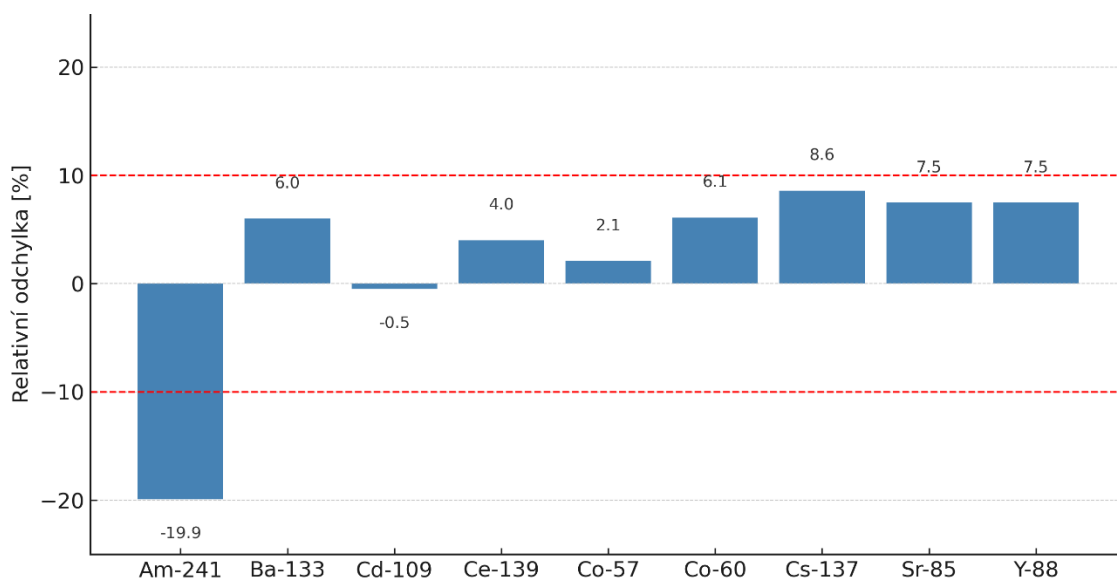


Obrázek 3 Porovnání relativních odchylek účinnostní kalibrace pro různé laboratorní geometrie. Červeně je vyznačeno toleranční pásmo $\pm 10\%$.

Výsledky porovnání účinnostní kalibrace vytvořené pomocí Geometry Composeru pro různé laboratorní geometrie ukázaly, že u většiny radionuklidů (Ba-133, Cs-137, Co-57, Co-60, Y-88) se relativní odchylky pohybují v rozmezí stanoveného kritéria $\pm 10\%$. To potvrzuje vhodnost využití programu Geometry Composer i pro méně standardní měřicí nádoby. Největší odchylky byly zaznamenány u nízkoenergetického radionuklidu Am-241, kde se hodnoty pro všechny geometrie výrazně lišily a v některých případech přesahovaly 60 %. Tento výsledek potvrzuje vyšší citlivost nízkoenergetických fotonů na přesnost modelu a na drobné rozdíly ve tvaru a tloušťce stěn nádoby. U standardních geometrií (např. Marinelliho nádoba 1 l) byla shoda obecně lepší než u menších a nestandardních nádob (např. masťovky 50 ml), kde se projevuje výraznější vliv přesnosti modelu na vypočtenou účinnost.

2.3 Validace

Pro ověření správnosti účinnostních kalibračních křivek byl využit etalonový mix MBSS 2, který obsahuje širší spektrum radionuklidů. Tento mix nebyl použit při samotném vytváření kalibrace, což umožnilo nezávislé ověření metodiky. Při vyhodnocení byly zahrnuty i radionuklidy, které nebyly součástí původního kalibračního souboru, čímž byla posouzena obecná použitelnost programu Geometry Composer pro praktická měření.



Obrázek 4 Ověření spolehlivosti účinnostní kalibrace pomocí MBSS 2. Červeně je vyznačeno toleranční pásmo $\pm 10\%$.

Výsledky ukázaly, že u většiny radionuklidů (Ba-133, Cd-109, Ce-139, Co-57, Co-60, Cs-137, Sr-85 a Y-88) se relativní odchylky mezi skutečnou a vypočtenou aktivitou pohybovaly v rozmezí $\pm 10\%$, a tedy splnily stanovené kritérium úspěšnosti. Největší odchylka byla zaznamenána u nízkoenergetického radionuklidu Am-241, kde relativní rozdíl dosáhl $-19,9\%$, což potvrzuje omezenou přesnost kalibrace v oblasti nízkých energií. Celkově lze konstatovat, že Geometry Composer poskytuje spolehlivé výsledky i pro radionuklidy, které nebyly součástí původního kalibračního souboru, a je proto vhodný i pro širší praktické využití.

ZÁVĚR

Výsledky ukazují, že software Geometry Composer je schopen za určitých podmínek poskytnout dostatečně přesné účinnostní kalibrace i pro necharakterizované detektory. U většiny radionuklidů (Ba-133, Cs-137, Co-57, Co-60, Y-88) se odchylky mezi experimentální a vypočtenou účinností pohybovaly v tolerančním pásmu $\pm 10\%$, což lze v rámci běžné gamaspektrometrické praxe považovat za přijatelné.

Výraznější rozdíly byly zaznamenány u nízkoenergetického radionuklidu Am-241. Tento jev je v souladu s předpokladem, vyšší citlivosti nízkoenergetických fotonů na absorpci v materiálu nádoby i na přesnost geometrického modelu. I malé rozdíly v tloušťce stěny či poloze vzorku mohou vést k odchylkám v řádu desítek procent.

Dosažené výsledky potvrzují, že Geometry Composer je vhodným nástrojem zejména pro energie nad 100–200 keV, kde geometrické odchylky nehrají tak zásadní roli. Jeho hlavní výhodou je rychlost a jednoduchost použití, které umožňují kalibraci i v případech, kdy není k dispozici plná charakterizace detektoru. To má zásadní význam například v mobilních laboratořích, kde není čas ani prostředky k provedení klasických experimentálních kalibrací.

Použitá literatura

1. OHERA, Marcel a Petr DVOŘÁK. *Využití polovodičové gamaspektrometrie ve veterinární praxi*. Brno: EnviMO, 2005.
2. GILMORE, Gordon. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2. vyd. Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-86196-7.
3. LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY. *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*. [online]. Los Alamos: 2025 [cit. 2025-09-22]. Dostupné z: <https://mcnp.lanl.gov/>
4. MIRION TECHNOLOGIES. *ISOCS Calibration Software (S573)* [online]. Mirion Technologies, 2025 [cit. 2025-09-22]. Dostupné z: <https://www.mirion.com/products/s573-isocs-calibration-software>
5. CANBERRA INDUSTRIES, INC. *Geometry Composer User's Manual*. Meriden (CT): Canberra Industries, 2009
6. JANDA, Jiří. *Gama spektrometrický kurz s návazností na SW Genie 2000*. Vyškov: Univerzita obrany, 2016
7. ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Protokol o měření*. 2024, č. 1054-PT-40032-24.

Poděkování – podpora

Tato stať byla podpořena projektem Ministerstva obrany České republiky v rámci Dlouhodobého plánu rozvoje organizace - Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany "Výzkum metod a technologií ochrany před účinky zbraní hromadného ničení a průmyslových nebezpečných látek II" (DZRO-UOPZHN22-PROTECT II).

VYHODNOCENÍ ÚČINNOSTI REAKTIVÁTORŮ NERVOVĚ PARALYTICKÝCH LÁTEK TYPU „G“, „V“ A NA ZÁKLADĚ KINETIKY BAREVNÝCH ZMĚN BIOSENZORU DETEHIT A STROJOVÉHO UČENÍ S VYUŽITÍM NEURONOVÝCH SÍTÍ

MACHINE LEARNING-BASED EVALUATION OF REACTIVATORS AGAINST NERVE AGENTS „G“, „V“ AND A TYPE AGENTS USING COLOR KINETICS OF THE DETEHIT BIOSENSOR

Dušan Trefilík*, Monika Hoskocová

Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení, Univerzita obrany, Sídliště Váta Nejedlého, 68201 Vyškov, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: dusan.trefilik@unob.cz, tel.: +420 973 452 332

Abstrakt

Pro hodnocení účinnosti reaktivátorů enzymu byly sledovány barevné změny biosenzoru Detehit, převedené do trichromatického barevného prostoru RGB. V prostředí Matlab byla vytvořena neuronová síť, která na základě naučených vzorců barevné odezvy sloužila k simulaci a obrazové vizualizaci časového průběhu reakce senzoru pro různé kombinace bojových chemických látek a reaktivátorů. Tyto vygenerované vizualizace byly následně zpracovány specializovanými skripty Matlabu, které převedly obrazová data zpět do časových řad RGB a umožnily stanovit kinetické parametry reaktivace enzymu, zejména rychlost změny signálu v čase. Na základě těchto výsledků byl vyhodnocen funkční potenciál jednotlivých reaktivátorů z hlediska jejich schopnosti urychlit a podpořit obnovení enzymové aktivity.

Klíčová slova: *biochemická reakce, reaktivátory acetylcholinesterázy, nervově paralytické látky, methoxim, neuronové sítě*

Abstract

For the evaluation of enzyme reactivator efficacy, color changes of the Detehit biosensor, converted into the RGB trichromatic color space, were monitored. A neural network was created in the Matlab environment, which, based on learned patterns of color response, served to simulate and visually represent the time course of the sensor's reaction for various combinations of chemical warfare agents and reactivators. These generated visualizations were subsequently processed by specialized Matlab scripts that converted the image data back into RGB time series, allowing for the determination of kinetic parameters of enzyme reactivation, particularly the rate of signal change over time. Based on these results, the functional potential of individual reactivators was evaluated in terms of their ability to accelerate and support the restoration of enzyme activity.

Key words: *biochemical reaction, acetylcholinesterase reactivators, nerve agents, methoxim, neuronal network*

ÚVOD

Ellmanova reakce je využívána k biochemické detekci skupiny látek schopných inhibovat esterázy, zejména acetylcholinesterázu. (1, 2) Díky své citlivosti je využívána v klinické praxi i v dalších odvětvích, jako jsou například vojenské detekční prostředky. Svým založením je metodou skupinovou, při které nelze odlišit jednotlivé inhibitory. Ale předchází experimentální studie tuto možnost naznačují a ve své podstatě mění tuto dosavadní skutečnost. (3-5) S využitím silných nukleofilních činidel, tzv. reaktivátorů acetylcholinesterázy může být tato dlouho známá reakce modifikována, a to ještě před vznikem tzv. nereaktivovatelné formy fosforylovaného enzymu. Reaktivátory obnovují funkci enzymu vyvázáním inhibitoru

z jeho aktivního centra a proto jsou v klinické praxi využívány pro léčbu otrav nervově paralytickými látkami (NPL). Nejčastěji jsou využívány sloučeniny na bázi mono nebo bispyridiniových aldoximů. (6) Jejich účinnost při reaktivaci inhibovaného enzymu je rozdílná, v závislosti na struktuře reaktivátoru a inhibitoru. Reaktivací účinnost je dána počtem a umístěním funkčních skupin a kationických míst, počtem pyridiniových jader, délkou alkylového nebo alkylénového řetězce, atd. (7) Díky těmto rozmanitým vlivům neexistuje reaktivátor, který by byl schopen účinně působit na enzym inhibovaný kteroukoli z NPL. A právě rozdílná účinnost těchto nukleofilních činidel vůči specifickému enzym-inhibitorovému komplexu může být určující pro identifikaci jednotlivých inhibitorů.

Mezi nejúčinnější reaktivátory patří mono- a bispyridiniové aldoximy. Dodnes jsou syntetizovány nové sloučeniny, založené na jejich základě, ale také mnoho nových struktur. Reaktivátory mohou obsahovat jeden, dva nebo tři pyridiniové kruhy nebo také žádný. Kvartérní pyridiniový kruh interaguje s periferním anionickým místem enzymu a díky tomu dochází ke stabilizaci reaktivátoru v aktivním centru a napomáhá tak nukleofilnímu útoku, jehož výsledkem je odštěpení inhibitoru a obnovení funkce enzymu. Struktura obsahující dva pyridiny a s tím i dva kladné náboje na atomu dusíku, se ukázala jako vysoce účinná. Vývoj reaktivátorů založených na této primární struktuře probíhá dodnes. Tyto sloučeniny se liší nejen délkou alkylénového řetězce, ale i jeho strukturou, dále pozicí nebo počtem oximových skupin a dalších substituentů na pyridinech. Struktura je volena tak, aby byla optimální pro svoje umístění v aktivním centru enzymu a zároveň mohlo dojít k nukleofilní reakci.

První bispyridiniový reaktivátor, tzv. trimedoxin (TMB-4), byl vyvinutý v roce 1957. Ve své struktuře obsahuje dvě aldoximové skupiny. (8, 9) Trimedoxim byl v experimentálních a teoretických studiích označen jako nejslibnější ze všech komerčně dostupných oximů. (10) Ještě v padesátých letech vyvinuli Hobbinger a Sadler strukturně velmi podobný methoxim (označovaný jako MMB-4 nebo MMC-4). Od trimedoximu se liší pouze v délce alkylénového můstku oběma pyridiny. (11) Tyto homology byly připravovány ve formě různých solí, jako jsou jednotlivé halogenidy nebo dimethylsulfát. Vedle zmíněných sloučenin byly připraveny i další s různou délkou můstku a byla tak doplněna celá homologická řada s prodlužujícím se alkylénovým řetězcem. (12, 13) Umožnilo to studium účinnosti reaktivace v závislosti na struktuře reaktivátoru. Například sloučenina se čtyřmi uhlíky v alkylénovém řetězci byla poměrně účinná při reaktivaci tabunem inhibované mozkové AChE a to více než z 50 %. (14)

Pravděpodobně neužívanějším reaktivátorem je TMB-4. Ve vodných roztocích je stálý a může být v této formě i připravován. Je to výhodné pro použití například v autoinjektorech, které slouží pro rychlou aplikaci antidota v případě náhlé otravy. (15)

Na Ústavu OPZHN byl vytvořen matematický model, ze který umožňuje identifikovat jednotlivé zástupce NPL původní skupinovou metodou. Ze skupinové reakce, která je využívána desítky let se jednoduchou modifikací stává metoda selektivní. Z reaktivátorů jsme se zaměřili na homologickou řadu methoximu. Dále byla použita acetylcholinestráza (AChE) imobilizovaná na celulóзовé textili, která je součástí biosenzoru Detehit. K hodnocení obnovené aktivity AChE byla využita klasická Ellmanova metoda využívající acetylthiocholin jodid a 5,5'-dithiobis(2-nitrobenzoovou) kyselinu. (1, 2) Principem metody je hydrolýza thiocholinu, při které vzniká příslušná kyselina (v závislosti na použitém substrátu) a thiocholin. Thiocholin je následně detekován kyselinou 5,5'-dithiobis(2-nitrobenzoovou), se kterou tvoří produkt se žlutým zabarvením. Je to důsledek vzniku redukované formy použitého činidla. Barevnou změnu lze detekovat spektrofotometricky. Metoda je využívána dlouhodobě a byla využita pro konstrukci jednoduchých detekčních prostředků nebo byla jinak modifikována. (16-19).

1 POPIS EXPERIMENTU

1.1 Chemikálie

Nervově paralytické látky: (GA) ethyl-dimethylfosforamidokyanidát, látka VX (VX) [S-[2-(diisopropylamino)ethyl]-O-ethylmethylfosfonothioát byly připraveny ve VOZ 072, Zemianské Kostolany, Slovenská republika. Sarin (GB) [isopropyl-methylfosfonofluoridát], soman (GD) [(3,3-dimethylbut-2-yl)-methylfosfonofluoridát], cyklosarin (GF) [cyklohexyl-methylfosfono-fluoridát], Látka R-33 S-[2-(diethylamino)ethyl]-O-isobutylmethylfosfonothioát a A-234 [O-ethyl-N-diethylaminoethylidenamidofluorofosfát] byly syntetizovány ve VVÚ, s. p. Brno (Česká republika). Čistota látek byla ověřena metodou GC-MS.

Reaktivátory: *N,N'*-monomethylenebis(4-pyridiniumaldoxim) dibromid (MMB-4), [*N,N'*-dimethylenebis(4-pyridiniumaldoxim) dibromid] (DMB-4); *N,N'*-trimethylenebis(4-pyridiniumaldoxim) dibromid (TMB-4); *N,N'*-tetramethylenebis(4-pyridiniumaldoxim) dibromid (TeMB-4); *N,N'*-pentamethylenebis(4-pyridinium aldoxim) dibromid (PMB-4); *N,N'*-hexamethylenebis(4-pyridiniumaldoxim) dibromid (HMB-4); bis(4-hydroxy iminomethylpyridinium-1-methyl)-ether dichlorid (obidoxim) byly připraveny firmou Kroupa-Balex, s.r.o., Pardubice, Česká republika.

1.2 Přístroje a pomůcky

Spektrofotometrický přístroj UltraScan XE od firmy HunterLab, Reston, Virginia, USA. Vyhodnocení dat bylo realizováno pomocí tabulkového procesoru Excel. Poloautomatické pipety od firmy BRAND GMBH + CO. KG, Wertheim, Německo.

Textilie s imobilizovanou AChE [EC 3.1.1.7] byla dodána společností ORITEST s r.o., Praha, Česká republika. Jako nosič pro AChE je použita tkanina z čisté přírodní bavlny. Indikační papír s acetylthiocholin jodidem a 5,5'-dithiobis-2-nitrobenzoovou kyselinou (CAS 69-78-3) od stejného dodavatele.

1.3 Pracovní postup

Pro získání experimentálních dat byly používány přířezy detekční tkaniny biosenzoru s imobilizovanou AChE o velikosti 2 cm², které byly ponořeny do roztoku NPL na dobu dvou minut. Poté byla textilie exponována po reakční dobu 10, 15 nebo 20 minut v roztoku reaktivátoru. Po následném opláchnutí byl na textilií, na dobu jedné minuty, přitisknut indikační papír obsahující substrát a chromogenní činidlo. Na spektrofotometru UltraScan XE byla provedeno měření změny zabarvení povrchu tkaniny v čase. Každé měření bylo opakováno sedmkrát.

Veškeré materiály, které přišly do kontaktu s nervově paralytickými látkami byly odmořeny ve speciálně připravených odmořovacích roztocích. Látky typu „G“ v 10% roztoku hydroxidu sodného s ethanolem smíchaném v poměru 1 : 1. Látky typu „V“ a „A“ v chlornanové odmořovací směsi.

2 VÝSLEDKY A DISKUZE

2.1 Popis struktury naměřených dat

Výstupem sledovaným v rámci této studie byla změna barevnosti detekční části systému DETEHIT v čase. Tato změna byla kvantitativně popsána v barevném prostoru CIE Lab, v němž je barva charakterizována třemi parametry. Klíčovým parametrem je světelnost *L*, ke které se vztahují dva chromatické parametry *a*, *b*. Tento model umožňuje efektivní

a komplexní popis barevného vjemu i při různých úrovních světelnosti. Neutrální šedá (resp. neutrální barva představující vyváženou bílou) má například hodnoty $L = 50$, $a = 0$ a $b = 0$. (20)

V rámci experimentu byly v časové závislosti sledovány všechny tři výstupní parametry CIE Lab, čímž byla zachycena tzv. *barevnostní kinetika*. Vstupními proměnnými (deskriptory) bylo šest parametrů: typ bojové chemické látky a její koncentrace, typ reaktivátoru a jeho koncentrace, čas reaktivity a čas odečtu barevnosti. Struktura dat je uvedena v tabulce 1.

Tabulka 1 Struktura datového souboru. NOX – druh látky, C_NOX – její koncentrace, REAKT – typ reaktivátoru, C_REAKT – koncentrace reaktivátoru, T_REAKT – čas reaktivity, t – čas odečtení barevnosti, CIE Lab – barevnostní charakteristiky.

1	NOX	C_NOX	REAKT	C_REAKT	T_REAKT	t	L	a	b
2	1	2,00E-02	1	0,5	10	300	90,43	-4,89	24,51
3	1	2,00E-02	1	0,5	10	290	90,46	-4,87	24,25
4	1	2,00E-02	1	0,5	10	280	90,49	-4,81	23,91
5	1	2,00E-02	1	0,5	10	270	90,52	-4,78	23,65
6	1	2,00E-02	1	0,5	10	260	90,54	-4,74	23,33
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
33970	5	5,00E-03	2	0,01	10	40	92,73	-3,87	7,28
33971	5	5,00E-03	2	0,01	10	30	92,82	-3,63	6,2
33972	5	5,00E-03	2	0,01	10	20	92,91	-3,33	5,03
33973	5	5,00E-03	2	0,01	10	10	93	-3,02	3,89
33974	5	5,00E-03	2	0,01	10	0	93,1	-2,68	2,64

Vzhledem k tomu, že tato tabulka obsahovala hrubá data, a jednotlivá měření byla opakována nesourodě, byla všechna konzistentní opakovaná měření zprůměrována a proveden test variability dat. Dílčí soubor měření, který vykazoval variabilitu chromatických charakteristik vyšší jak 5 %, byl pro další zpracování vyloučen, neboť nebyla zajištěna reprodukovatelnost a tím i věrohodnost těchto dat. Dále bylo vyhodnoceno, že zásadní chromatická změna se děje v prvních 100 sekundách vyhodnocování. Data tak byla v celém datovém souboru omezena horní mezí 190 s, neboť změna barevnosti se nad touto hranicí dělá již zpravidla lineárně s velmi podobnou směrnici vzhledem k ostatním měřením, což naznačuje, že pro identifikační potenciál této metody byla tato data zbytečná.

2.2 Využití neuronových sítí pro zpracování dat

Na základě již prováděného výzkumu (21-24) byla připravena neuronová síť, která byla schopna generovat chromatická data ze zadaných deskriptorů, kterými byly následující hodnoty z tabulky 2.

Takto navržená neuronová síť je schopna pro zadané deskriptory generovat chromatické CIE Lab parametry s přesností dosahující 99 % původního datového souboru. Výhodou tvorby neuronové sítě je zejména rychlá odpověď, neboť systém nehledá data v rozsáhlém datovém souboru, ale generuje je aritmetickými operacemi uvnitř neuronové sítě. Neuronová síť je navíc schopná interpolačně odhadovat i data nenaměřená, např. při dotazech obsahující jiná C_NOX a C_REAKT, než byla v původním datovém souboru, ze kterého se neuronová síť učila. Neuronová síť tak vykazuje inteligenci, tj. schopnost sledovat logiku v hluboké struktuře dat a okamžitě odhadovat nenaměřené výsledky.

Tabulka 2 Deskriptory použité při učení neuronové sítě.

Deskriptor	Popis deskriptoru
NOXA	Druh bojové chemické látky
C_NOX	Koncentrace bojové chemické látky
TYP_REAKT	Druh použitého reaktivátoru
C_REAKT	Koncentrace použitého reaktivátoru

2.3 Grafické vyhodnocení rychlosti reaktivace

Byl hledán ideální model zhodnocení rychlosti reaktivace. V publikaci autorů Hoskovcová a Trefilík, 2024 (20) byl navržen model, který by graficky vyjadřoval rychlost změny barevnosti v čase, jako měřitelný projev průběhu reaktivace. Jako vhodným grafickým vyjádřením se ukázala kumulativní změna rychlosti zabarvení v čase. Vzhledem k tomu, že hodnotit absolutní změnu barevnosti by nevytvářelo obecně platný hodnotící systém pro celý soubor dat, byl předchozí matematický model modifikován tak, aby dospěl vždy do stejné kumulativní hodnoty barevnosti rovné 1, čímž se celý model normalizoval a stal se vhodný pro hodnocení rychlosti reaktivace v celém datovém souboru. Tento nový model tak popisuje, jak rychle se daná normalizovaná veličina mění, ale nepopisuje, jakým směrem. Ztrácí se zde tedy analytická informace o průběhu konkrétní barevnosti. Model následně spočítá veličinu nAUC, kterou lze vyjádřit jako:

$$nAUC = \frac{1}{T} \int_0^T c(t) dt$$

kde T je čas měření reaktivace a c(t) je průběh kumulativní změny barevnosti v tomto čase.

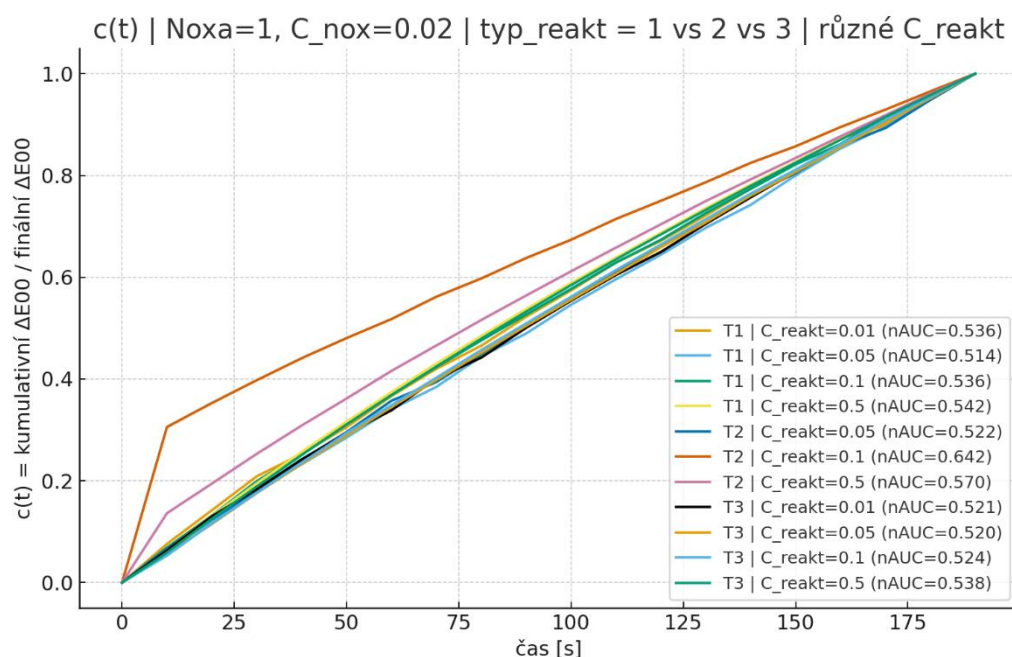
Výsledkem je pak hodnota nAUC, která má následující interpretaci:

Tabulka 4 Interpretace hodnoty nAUC.

Hodnota nAUC	Interpretace
< 0,5	Rychlostní změna zrychlovala ke konci.
= 0,5	Rychlostní změna je s časem konstantní = nezrychluje.
> 0.5	Rychlostní změna zrychlovala na začátku.

Byl tak sepsán skript v softwarovém prostředí MATLAB, který pomocí neuronové sítě podle zadání deskriptorů generuje příslušná chromatická data a vykresluje již popisovanou grafickou závislost. Výsledný graf doplňuje o hodnotu nAUC.

Z grafu lze jak opticky, tak podle hodnotitele nAUC vyhodnotit, že nejrychleji u bojové chemické látky označené jako “1” probíhala reaktivace s typem reaktivátoru označeným jako “T2” o koncentraci 0,1 mg/ml. Tato metoda se tak hodí zejména na hodnocení účinnosti reaktivace (Obrázek 1).



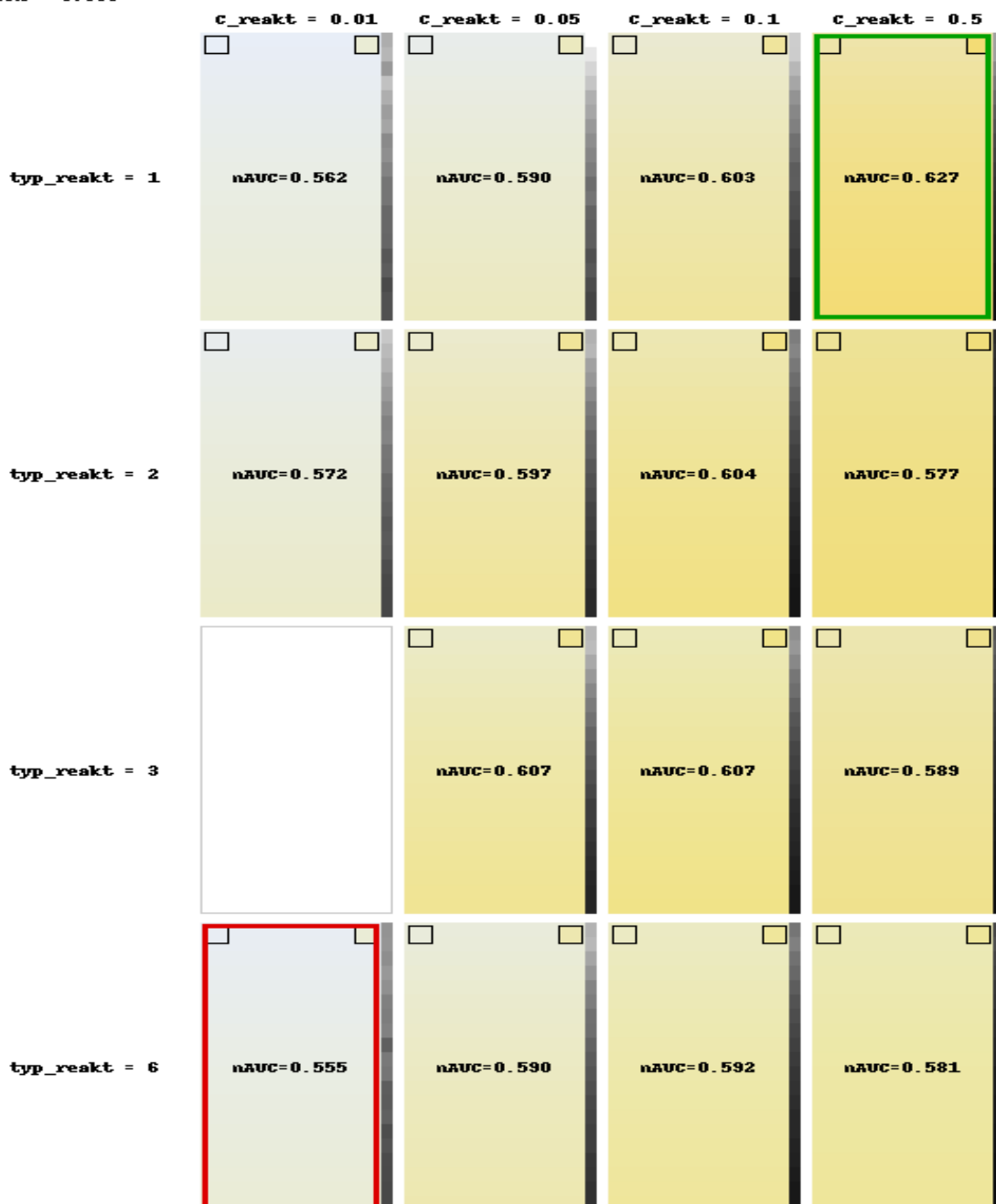
Obrázek 1 Normalizovaný časový průběh reaktivace (Tx – Typ reaktivátoru, C_reakt – jeho koncentrace [mg/ml], nAUC = hodnotitel rychlosti reaktivace).

2.4 Vizualizace barevných změn a jejich srovnání

Výše bylo popsáno, že normalizací barevných změn dojde ke ztrátě vizuálně důležitých dat využitelných pro hodnocení barevnosti. Skript generující předchozí data byl tak dále optimalizován, aby přehledně propojil jak hodnoty nAUC, tak proběhnuvší barevnou změnu. Výsledkem je přehledná vizualizace, která pro danou bojovou chemickou látku obsáhne všechny proměřené typy reaktivátorů o jejich koncentracích:

Noxa = 2
c_nox = 0.003

Frames (no speed bar): min nAUC = red, max nAUC = green



Obrázek 2 Vizualizace reaktivace a vyhodnocení její rychlosti u bojové chemické látky označované jako “2” a všech typů naměřených reaktivátorů různých koncentrací.

ZÁVĚR

Na obrázku 2 je již dobře vidět, jaký vliv na odstín barevnosti má typ reaktivátoru a jeho koncentrace. Skript navíc nejlepší a nejhorší výsledek zarámuje do patřičných barev (zelená = nejrychlejší start, červená = nejpomalejší start). Dokazuje, že neuronová síť je schopná vizualizovat průběh žloutnutí DETEHITu a označit nejlepší výsledek. Tyto grafické výstupy jsou de facto praktických výstupem potvrzujícím hypotézu, že lze snadno tuto metodu překlomit do automatizovaného módu, který je schopný automaticky vyhodnocovat probíhající barevnostní změny a již během tohoto procesu je objektivizovat do jednoho čísla. V případě aplikace této automatizace ve formě čtecího zařízení vyhodnocující barevné změny na více

stripech, je zde patrná možnost využití rozdílné kinetiky reaktivace u různých typů reaktivátorů pro identifikaci bojové chemické látky, která byla použita.

Použitá literatura

1. ELLMAN, G. L. Tissue sulfhydryl groups. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1959, 82, 70-77.
2. ELLMAN, G. I., COURTNEY, K. D., ANDRES, V. jr. a R. M. FEATHERSTONE. A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochemical Pharmacology*, 1961, 7, 88-95.
3. HOSKOVCOVÁ, M. Analysis of Nerve Agents Through a Modified Method of Cholinesterase Assessment using Artificial Neuronal Networks. *Military Medical Science Letters*, 2017, 86(3), 96-103. ISSN 0372-7025
4. HOSKOVCOVÁ, M., DUBINA, P., HALÁMEK, E. a Z. KOBLIHA. Identification of Pairs of Organophosphorus Warfare Agents through Cholinesterase Reaction. *Analytical Letters*, 2011, 44(15), 2521-2529. ISSN 0003-2719. Doi:10.1080/00032719.2011.551860
5. HOSKOVCOVÁ, M. Diferenciace nervově paralytických bojových chemických látek pomocí biochemické metody. *The Science for Population Protection*, 2018, 10(1), 101-108. ISSN 1803-635X
6. MILATOVIĆ, D. a M. JOKANOVIĆ. Pyridinium Oximes as Cholinesterase Reactivators in the Treatment of OP Poisoning. In: GUPTA R. C. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. Elsevier, U. K., 2009, 985-996. ISBN 9780123744845
7. WHITELEY C. G. a D. S. NGWENYA. Protein ligand interactions 7 halogenated pyridinium salts as inhibitors of acetylcholinesterase from *Electrophorus electricus*. *Biochemistry and Molecular Biology International*, 1995, 36(5), 1107-1116.
8. POZIOMEK, E. J., HACKLEY Jr., B. E. a G. M. STEINBERG. Pyridinium Aldoximes. *The Journal of Organic Chemistry*, 1958, 23(5), 714-717. Doi: 10.1021/jo01099a019
9. WILSON, I. B. a S. GINSBURG. A powerful reactivator of alkylphosphate-inhibited acetylcholinesterase. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1955, 18, 168-170. Doi: 10.1016/0006-3002(55)90040-8
10. SANTOS, M. C., BOTELHO, F. D., GONÇALVES, A. S., KITAGAWA, D. A. S., BORGES, C. V. N., CARVALHO-SILVA, T., BERNARDO, L. B., FERREIRA, C. N., RODRIGUES, R. B., FERREIRA NETO, D. C., NEPOVIMOVÁ, E., KUČA, K., LAPLANTE, S. R., LIMA, A. L. S., FRANÇA, T. C. C. a S. F. A. CAVALCANTE. Are the current commercially available oximes capable of reactivating acetylcholinesterase inhibited by the nerve agents of the A-series? *Archives of Toxicology*, 2022, 96(9), 2559-2572. Doi: 10.1007/s00204-022-03316-z
11. HOBINGER, F. a P. W. SADLER. Protection against lethal organophosphate poisoning by quaternary pyridine aldoximes. *British Journal of Pharmacology*, 1959, 14, 192-201.
12. DOHNAL, V., KUČA, K. a D. JUN. Prediction of a new broad-spectrum reactivator capable of reactivating acetylcholinesterase inhibited by nerve agents. *Journal of Applied Biomedicine*, 2005, 3, 139-145. Doi: 10.32725/jab.2005.018

13. HOSKOVCOVÁ, M., HALÁMEK, E., KOBLIHA, Z. a I. TUŠAROVÁ. Reactivation of Immobilized Acetylcholinesterase-Tabun Complex by Methoxime and Its Homologues. *Drug and Chemical Toxicology*, 2007, 30, 1–7, ISSN: 0148-0545. Doi: 10.1080/01480540601186614
14. ATANASOV, V. N., PETROVA, I. a C. DISHOVSKY. In vitro investigation of efficacy of new reactivators on OPC inhibited rat brain acetylcholinesterase. *Chemico-Biological Interactions*, 2013, 203(1), 139-43. Doi: 10.1016/j.cbi.2012.11.020
15. BENTUR, Y., LAYISH, I., KRIVOY, A., BERKOVITCH, M., ROTMAN, E., BAR HAIM, S., YEHEZKELLI, Y. a E. KOZER. Civilian Adult Self Injections of Atropine – Trimedoxime (TMB-4) Autoinjectors. *Clinical Toxicology*, 2006, 44(3), 301-306. Doi:10.1080/15563650600584519
16. TUŠAROVÁ, I. a E. HALÁMEK. Biosenzor pro detekci a rozlišení inhibitorů cholinesteráz, způsob přípravy zóny biosenzoru s imobilizovanou cholinesterázou, způsob detekce cholinesteráz a způsob rozlišení inhibitorů esteráz. Patent CZ 288576, 2001.
17. HOSKOVCOVÁ, M. Analysis of Nerve Agents Through a Modified Method of Cholinesterase Assessment using Artificial Neuronal Networks. *Military Medical Science Letters*, 2017, 86, 3, 96-103. ISSN 0372-7025
18. HOSKOVCOVÁ, M., DUBINA, P., HALÁMEK, E. a Z. KOBLIHA. Identification of Pairs of Organophosphorus Warfare Agents through Cholinesterase Reaction. *Analytical Letters*, 2011, 44, 15, 2521-2529. ISSN 0003-2719. Doi:10.1080/00032719.2011.551860
19. HOSKOVCOVÁ, M. Diferenciace nervově paralytických bojových chemických látek pomocí biochemické metody. *The Science for Population Protection*, 2018, 10(1), 101-108. ISSN 1803-635X
20. VIK, M. a M. VIKOVÁ, Transformation of tolerance limits for cotton colour grading into the new CIECAM16 colorimetric systém. *The 49th Textile research symposium 2022, Kyoto*. Kyoto Institute of Technology, 2022, p. 34-35.
21. HOSKOVCOVÁ, M. a D. TREFILÍK. Využití trichromatických hodnot pro identifikaci látek typu „G“ a „V“ s využitím neuronových sítí. *Sborník článků CBRN Protect 2023*. Univerzita obrany, Ústav ochrany proti ZHN, Vyškov, 2023, s. 91-99.
22. HOSKOVCOVÁ, M. a D. TREFILÍK. Identifikace nervově paralytických látek s využitím neuronových sítí založená na klasické Ellmanově metodě. *Sborník článků Hazmat Protect 2024*. SÚJCHBO, v. v. i., Kamenná, Česká republika, 2024, 31-42. ISBN 978-80-909301-2-4
23. TREFILÍK, D., LC/MS/MS analýza nových vojensky významných organofosforových sloučenin. Vyškov, 2023. Disertační práce. Univerzita obrany.
24. TREFILÍK, D. Use of Modern Computational Methods and Neural Networks to Optimize Methods for LC/MS/MS Analysis of Military-Relevant Organophosphorus Compounds. *Chemické listy*, 2024, 118(2), 103-110. ISSN 1213-7103. Doi:10.54779/chl20240103

Poděkování - podpora

Tato stat' byla finančně podpořena projektem Ministerstva obrany České republiky v rámci Dlouhodobého plánu rozvoje organizace - Ústav ochrany proti zbraním hromadného ničení Univerzity obrany "Výzkum metod a technologií ochrany před účinky zbraní hromadného ničení a průmyslových nebezpečných látek II" (DZRO-UOPZHN22-PROTECT II).

POUŽITÍ PŘENOSNÉHO KAPALINOVÉHO CHROMATOGRAFU PRO ANALÝZU NEBEZPEČNÝCH LÁTEK V MOBILNÍCH LABORATOŘÍCH

APPLICATION OF PORTABLE LIQUID CHROMATOGRAPH FOR ANALYSIS OF HAZARDOUS SUBSTANCES IN MOBILE LABORATORIES

Jakub Vaněk^{a*}, Kamila Lunerová^a, Jozef Šesták^b, Ivan Hamerník^c

^a Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., Kamenná 71, 262 31 Milín, Česká republika

^b Ústav analytické chemie AV ČR, v.v.i., Veveří 967/97, 602 00 Brno, Česká republika

^c INGOS s.r.o., K Nouzovu 2090/6, 143 00 Praha 4 – Komořany, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: vanek@sujchbo.cz, tel.: +420 545 218 278

Abstrakt

Přenosný HPLC systém (mini-LC) je zmenšenou verzí laboratorního kapalinového chromatografu a je určen pro analýzu vzorků přímo na místě událostí s rizikem chemické kontaminace (např. nelegální laboratoře, ekologické havárie). Vzhledem ke komplexitě terénních vzorků, nízké koncentraci analytu či přítomnosti rozpouštědel je pro spolehlivou identifikaci látek často nezbytná chromatografická separace. Představujeme miniaturizované zařízení s kapilárním LC schématem, umožňující gradientovou eluci při pracovním tlaku v systému až 100 MPa a využívající běžně komerčně dostupné mikrokolony 0.3×50 mm. Součástí systému je jedinečný kompaktní optický detektor s kapilární detekční celou a CCD spektrometrem, který umožňuje sledovat současně UV-Vis absorbanci (200–400 nm) i fluorescenci (excitační LED 365 nm anebo 250 nm). Mini-LC bylo úspěšně testováno při analýze toxinů (aflatoxiny, mikrocystiny), drog, kanabinoidů, výbušnin, PAH, POPs, reálných ekologických vzorků i náhrad chemických bojových látek. Výsledky prokázaly rychlou (do 7 min) a opakovatelnou separaci cílových látek i v náročných matricích, což činí toto zařízení použitelným i v mobilních laboratořích.

Klíčová slova: přenosný kapalinový chromatograf, nebezpečné látky, mobilní laboratoř

Abstract

The portable HPLC system (mini-LC) is a compact version of a laboratory liquid chromatograph designed for analyzing samples directly at sites with a risk of chemical contamination (e.g., illegal laboratories, environmental accidents). Due to the complexity of field samples, low analyte concentrations, or the presence of solvents, chromatographic separation is often necessary for reliable identification of substances. We present a miniaturized device with a capillary LC scheme, enabling gradient elution at a working pressure of up to 100 MPa in the system and using commercially available 0.3×50 mm microcolumns. The system includes a unique compact optical detector with a capillary detection cell and a CCD spectrometer, which allows simultaneous measurement of UV-Vis absorbance (200–400 nm) and fluorescence (excitation LED 365 nm or 250 nm). Mini-LC has been successfully tested in the analysis of toxins (aflatoxins, microcystins), drugs, cannabinoids, explosives, PAHs, POPs, real environmental samples, and chemical warfare agent surrogates. The results demonstrated rapid (within 7 minutes) and repeatable separation of target substances even in challenging matrices, making this device suitable for use in mobile laboratories.

Keywords: portable liquid chromatograph, hazardous substances, mobile laboratory

Poděkování - podpora

Tento příspěvek byl vypracován s využitím výsledků výzkumného projektu VB02000015 „Přenosný kapalinový chromatograf – zvýšení technologické úrovně systému, adaptace pokročilé optické detekce a nové aplikace“ realizovaného v rámci Programu bezpečnostního výzkumu ČR SECTECH.

Uvedená stat' byla prezentována na jednání konference. Autoři neposkytli souhlas se zveřejněním jejího znění ve Sborníku statí MVK CBRN PROTECT 2025. Tato skutečnost byla vědeckým a organizačním výborem konference respektována.

SOUČASNÉ HROZBY V OBLASTI OCHRANY PROTI CHEMICKÝM, RADIOAKTIVNÍM A JADERNÝM LÁTKÁM A MATERIÁLŮM

CURRENT CHEMICAL, RADIOLOGICAL AND NUCLEAR THREADS

Karel Vydra*

Joint Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Defence Centre of Excellence (JCBRN Defence COE),
Sídliště Vítá Nejedlého, 68201 Vyškov, Česká republika

*Korespondující autor; e-mail: vydrak@jcbrncoe.org, tel.: +420 973 499 108

Abstrakt

Autor se zabývá přetrvávajícími problémy v oblasti šíření otravných látek (OL) a radioaktivních a jaderných materiálů, a vlivem nových technologií na ochranu proti zbraním hromadného ničení (ZHN). V první části se věnuje použití chemických zbraní v současnosti a boji proti jejich šíření. Druhá část popisuje trendy v modernizaci jaderných zbraní (JZ) a události z druhé poloviny roku 2025, které ovlivňují jaderné odzbrojení. Závěrem se autor pokouší objasnit, jak disruptivní technologie mohou ovlivnit šíření i nešíření jak otravných látek těchto nebezpečných látek a materiálů.

Klíčová slova: *proliferace (šíření) ZHN, nově nastupující a disruptivní technologie*

Abstract

The author addresses ongoing challenges in the proliferation of chemical warfare agents (CWAs) and radioactive/nuclear materials, and the impact of emerging technologies on weapons of mass destruction (WMD). The first part discusses current use of chemical weapons and efforts to counter their proliferation. The second part outlines modernization trends in nuclear arsenals and key developments affecting nuclear disarmament in late 2025. Finally, the author explores how emerging and disruptive technologies may influence both proliferation and non-proliferation of hazardous substances and materials. **Key words:** *Active carbon, Protective clothing, Toxic chemical compounds*

Key words: *proliferation of weapons of mass destruction (WMD), emerging and disruptive technologies*

Pozn. Uvedená stať byla prezentována na jednání konference. Autoři neposkytli souhlas se zveřejněním jejího znění ve Sborníku statí MVK CBRN PROTECT 2025. Tato skutečnost byla vědeckým a organizačním výborem konference respektována.



Modulární multisenzorický profesní oděv pro členy IZS s implementací metod umělé inteligence



Michal Mašín, Veronika Kalousková, Tomáš Veselý

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v.v.i., Kamenná 71, Milín 262 31

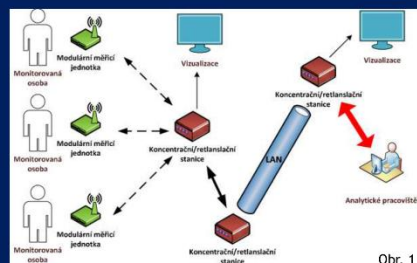
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno 2, Česká republika

Úvod

Ochranné oděvy chrání nositele před škodlivými vnějšími vlivy jako teplo, chemické látky, mechanická nebezpečí a před dalšími klimatickými vlivy. Komplexnost ochrany je vykoupena vyšší hmotností oděvu a sníženou schopností odvádět metabolické teplo uživatele v situaci, kdy je jeho produkce zvýšena kombinací vysoké fyzické aktivity a vysoké hmotnosti nesených osobních ochranných pomůcek. Uživatel se proto zrychleně zahřívá a je vystaven tepelnému stresu a nebezpečí přehřátí organismu, zrychlení nástupu únavy, dehydrataci, poklesu pozornosti a může vyústit až v srdeční zástavu. Uživatel si často sám není vědom dosažení nebezpečného stavu organismu, proto je potřebné ochranné prostředky doplnit dohledovými systémy monitorujícími aktuální zdravotní stav. Konsorcium ČVUT, SÚJCHBO, TUL a ZČU si klade za cíl navrhnout unikátní monitorovací systém založený na umělé inteligenci. Po konzultacích s vybranými složkami IZS (zejména HZS a PČR) jsou postupně implementovány do pracovního oděvu klíčové senzorní moduly, které detekují přítomnost nebezpečných látek v okolí nositele a nepřetržitě monitorují jeho zdravotní stav. Vestavěný software používá kombinaci klasické signálové techniky a algoritmů umělé inteligence k automatickému odhadu fyziologického stavu nositele, například ke zpřesnění odhadu okamžitého energetického výdeje nebo k robustní extrakci srdeční a dechové aktivity za pohybu nositele.

Koncept ochranného oděvu modulární uspořádání

Projekt, zaměřený na vývoj ochranného oděvu, který předpokládá využití metod umělé inteligence se plným názvem nazývá Modulární multisenzorický oděv k řízení rizika, ochrany zdraví a bezpečnosti členů IZS pomocí metod umělé inteligence (MOSENZ). Celý systém je koncipován modulárním způsobem a bude umožňovat konfiguraci podle požadavků a potřeb konkrétních složek IZS a dalších uživatelů. Ochranný oděv se koncepčně skládá ze dvou vrstev: vnější vrstvy a vnitřní vrstvy. Ve vnější vrstvě budou integrovány senzory pro monitorování parametrů prostředí, zatímco ve vnitřní vrstvě, která je v kontaktu s tělem uživatele, budou integrovány senzory monitorující fyziologický stav uživatele. Data získaná z každého subsystému jsou individuálně předpracována a následně odeslána do nadřazeného systému, kde jsou dále zpracována a vyhodnocena pomocí metod umělé inteligence. Organizačně může být několik uživatelů v ochranných jednotkách podřízeno jednomu monitorovacímu stanovišti. Schematicky naznačuje nadřazenou architekturu systému Obr. č. 1.



Obr. 1 Architektura systému modulárního multisenzorického ochranného oděvu.

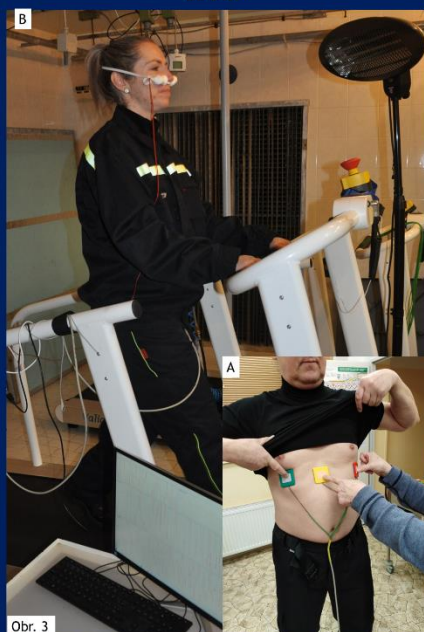
Úprava konstrukce podvlekového prádla pro zvýšení přitlaku senzorů

Pro správnou funkci senzorů fyziologických funkcí je potřebný správný kontakt s tělem sledované osoby. Z těchto důvodů bylo tričko z ovčího merina doplněno o elastický pruh, který zajišťuje zvýšení přitlaku v oblasti spodní části hrudníku, kde se předpokládá umístění senzorů srdeční frekvence, dechové frekvence a vlhkosti pod oděvem.



Orálky 2A a B zobrazují vývojové fáze podvlekového prádla určeného pro nošení se senzory monitorujícími fyziologické funkce. Na obrázku B je podvlekové tričko doplněno o stabilizační popruhy, které umožňují zvýšit přitlak senzorů, poté co se např. díky opakovanému praní snižuje elasticita vláken podvlekového prádla. Funkčnost senzorů byla zkoušena za podmínek střední fyzické zátěže testovaných osob v obtížných klimatických podmínkách (35 °C), kdy pod svrchním oděvem dochází ke kumulaci potu a senzory se tak nacházejí v prostředí s až 100% vlhkostí.

Sběr dat pro učení AI v tepelné komoře LSOEP



Obr. 3

Obr. 3A a B. Obrázek zobrazuje získávání datových podkladů pro trénink umělé inteligence (AI) - konvoluční neuronové sítě (CNN). (A) Zobrazuje umístění elektrod jedno svodového EKG s integrovanými tlakovými FSR senzory pro měření dechové frekvence. (B) Proband při tělesné aktivitě. Termistorový oro-nazální (tepelný) senzor pod nosem slouží jako referenční měření pro anotaci signálu z FSR tlakových senzorů pro učení umělé inteligence odstranit pohybové artefakty u tlakových senzorů umístěných na hrudi.

Finální řešení EKG elektrod s FSR tlakovými senzory

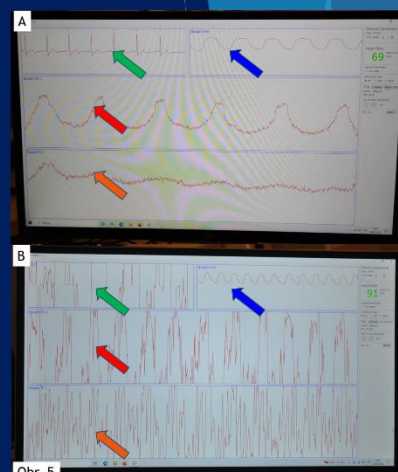


Obr. 4

Obr. 4 Zobrazuje finální řešení elektrod jednosvodového EKG modulu v s tlakovými senzory pro monitoraci dechové frekvence uživatele. Jako nejvhodnější materiál pro elektrody EKG se ukázala být nerezová ocel. Toto řešení umožňuje vnechat aplikaci vodivého gelu, což urychluje aplikaci na tělo. Na správném místě jsou po aplikaci elektrody udržovány přitlakem elastického pásu integrovaného do podvlekového trika v kombinaci se suchým zipem. V další fázi bude přímé spojení EKG modulu s monitorem nahrazeno připojením na lokální rozhraní nesené u pasu, což umožní bezdrátový přenos dat.

Měření při pohybové aktivitě vs klidová měření a pohybové artefakty

Při monitorování fyziologických hodnot je velkou výzvou schopnost monitorace fyziologických funkcí při aktivním pohybu. Aktivní pohyb vnáší do měření některých fyziologických parametrů řadu artefaktů, které je nutné odfiltrvat. Obr. 5A a B zobrazují rozdíl mezi klidovým režimem (odpočinek sezením na židli) a aktivním pohybem reprezentovaným chůzí na pásovém ergometru.

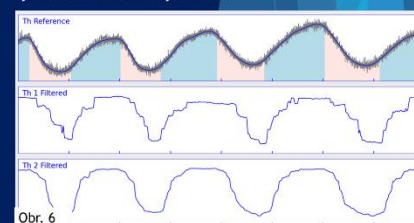


Obr. 5

Obr. 5A a B Vizualizace monitorace srdeční frekvence a dechové frekvence při aktivním pohybu (B) a v klidovém režimu (A). Obrázek zobrazuje srdeční frekvenci (zelená šipka), dechovou frekvenci měřenou tepelným senzorem (modrá šipka) a dechovou frekvenci měřenou tlakovým senzorem na levé a pravé straně hrudníku (červená a oranžová šipka). Na první pohled záznam při aktivním pohybu obsahuje množství poruch a falešných signálů, které je třeba odfiltrvat.

Filterace signálu (dechová aktivita)

Dechová aktivita je jedním z důležitých ukazatelů zdravotního stavu, který je měřitelný pomocí nositelné elektroniky a na který, jsme se v rámci projektu zaměřili. Dva tlakové senzory FSR byly integrovány do jedné struktury s elektrodami jedno svodového EKG. S prototypem zařízení byla provedena série ověřovacích experimentů v tepelné komoře LSOEP SÚJCHBO. Výstupem experimentů je signál, který je zobrazen na obr. 6. Tento signál byl následně automaticky anotován.



Obr. 6

Obr. 6 Postupná filterace a vyhlazení dat pro dechovou aktivitu s asistencí umělé inteligence.

Závěr

V průběhu projektu se podařilo vyvinout základ jednoduchého nositelného a přitom robustního, uživateli přátelského systému pro monitoraci základních fyziologických funkcí člověka při aktivním pohybu. Tato monitorace nabývá na významu z hlediska rostoucí pozornosti a nároků na monitoraci zdravotního stavu pracovníků pracujících v extrémních podmínkách. Práce na dalším vývoji systému budou pokračovat...

Prezentované výsledky byly podpořeny rozvojovým projektem VJ02010031 - Modulární multisenzorický profesní oděv



CBRN PROTECT 2025, 15. – 16. 30. 2025, Věstec, Česká republika
https://conference.unioi.cz/cbrn-2025/

CBRN PROTECT 2025

Sborník statí mezinárodní vědecké konference konané ve dnech 15. – 16. října 2025

Editoři: Petr ŽUJA, Erik RAJCHL

Vydavatel: Univerzita obrany, Brno

Rok vydání: 2025

Vydání: první

Publikace neprošla jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7582-583-4 (online; pdf)

ISBN 978-80-7582-586-5 (CD-ROM)