Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.
Oddělení dozimetrie, Oddělení spektrometrie
Bartoškova 28, 140 00 Praha 4

Metodika M9

Certifikovaná metodika

Stanovení osobní neutronové dávky s využitím indukované aktivity ze vzorku krve

Vypracovali

Funkce	**Jméno**	**Datum**	**Podpis**
Vedoucí oddělení dozimetrie	Ing. Daniela Ekendahl	21.6.2019	
Vedoucí oddělení spektrometrie	Ing. Miroslav Hýža	21.6.2019	

Přezkoumal a schválil

Funkce	**Jméno**	**Datum**	**Podpis**
Náměstek pro radiační ochranu	Mgr. Aleš Froňka, PhD.	12.7.2019	
Archivní označení	**SÚRO 261-M9-0**	**Číslo revize**	**0**
Výtisk číslo	**1**	**Datum účinnosti**	**1.1.2020**

Rozdělovník

Výtisk	**Převzal**	**Datum**	**Podpis**
č. 1	Síťový disk S:\Certifikované metodiky\ M9.pdf Ing. Daniela Ekendahl		
č. 2	Síťový disk P:\akreditace-laboratore\ Metodiky -SÚRO\ Certifikované metodiky\ M9.pdf Ing. Miroslav Hýža		
č. 3			

Vypracováno v rámci projektu VI20152020033
Bezpečnostního výzkumu:
Metodiky pro stanovení radiačních dávek osob v kontextu hrozby jaderného a radiologického terorismu

Rok uplatnění **2019**

Přehled revizí

Číslo revise	Důvod revize	Účinnost revize od

OBSAH

1. Účel a cíl metodiky 4
2. Důležité veličiny 5
2.1. Aktivita a specifická aktivita 5
2.2. Dávka 5
3. Princip metody a postup 7
3.1. Princip metody 7
3.2. Postup 9
3.2.1. Příprava vzorku krve 9
3.2.2. Záznam vstupních údajů 9
3.2.3. Měření aktivity vzorku 9
3.2.4. Stanovení frakce ^{24}Na zadrženého v krvi 11
3.2.5. Výpočet aktivity v 1 ml krve pro čas expozice 11
3.2.6. Výpočet specifické aktivity pro čas expozice 11
3.2.7. Záznam výsledků měření aktivity 12
3.2.8. Odhad spektra neutronů 12
3.2.9. Stanovení pravděpodobnosti záchytu neutronů v těle 12
3.2.10. Stanovení dávkového konverzního koeficientu 12
3.2.11. Výpočet fluence neutronů 13
3.2.12. Stanovení neutronové dávky 13
3.2.13. Stanovení neutronové dávky vážené RBE 13
3.2.14. Záznam výsledků stanovení dávky 14
3.3. Verifikace a zabezpečení jakosti 14
3.4. Záznamy a výstupní dokumentace 14
4. Uplatnění metodiky a novost postupů 15
Reference 16
Seznam příloh 17
Příloha 1: Protokol vstupních údajů 18
Příloha 2: Protokol o měření aktivity ^{24}Na 19

Příloha 3: Hodnoty pravděpodobnosti záchytu neutronů v lidském těle 20

Příloha 4: Hodnoty dávkových konverzních koeficientů pro štěpné spektrum 22

Příloha 3: Protokol o stanovení neutronové dávky 23

1. ÚČEL A CÍL METODIKY

Mezi nejzávažnější jaderné nehody a incidenty patří situace, kdy dojde ať už záměrně nebo nezáměrně k dosažení kritické konfigurace štěpného materiálu, která je bezprostředně následována nekontrolovanou štěpnou reakcí. Následně jsou produkovány vysoké toky neutronů a fotonů gama, což může vést k závažnému ozáření osob v místě a okolí události. Stanovení dávek těchto osob patří mezi nejnáročnější dozimetrické úlohy vůbec. Výsledky z klasických osobních dozimetrů – jsou-li k dispozici, resp. z dozimetrů prostředí, představují pouze část z potřebných informací a jako takové samy o sobě nepostačují pro komplexní dozimetrickou analýzu. V takové situaci je většinou nutné současně využít různé metody retrospektivní dozimetrie – biologické, fyzikální i výpočetní, které ve vzájemné kombinaci mohou poskytnout komplexní obraz o dávkové distribuci neutronů i fotonů.

Jednou z nejdůležitějších metod neutronové retrospektivní dozimetrie je **metoda založená na neutronové aktivaci izotopu sodíku ^{23}Na** prostřednictvím jaderné reakce **^{23}Na(n,γ)^{24}Na**. Stabilní izotop ^{23}Na a následně po ozáření i radioaktivní produkt reakce ^{24}Na se v lidském těle vyskytuje téměř rovnoměrně. Naměřenou aktivitu produktu reakce ^{24}Na lze korelovat s průměrnou celotělovou neutronovou dávkou.

Cílem této metodiky je podat praktický postup pro stanovení neutronové dávky ze vzorku krve odebrané ozářené osobě.

2. DŮLEŽITÉ VELIČINY

2.1. AKTIVITA A SPECIFICKÁ AKTIVITA

Aktivita, **A**, je obecně definována jako podíl středního počtu radioaktivních přeměn $\mathrm{d}N$ v určitém množství radionuklidu za časový interval $\mathrm{d}t$ a tohoto časového intervalu, tj.

$$A = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}$$

Jednotkou aktivity v soustavě SI je s^{-1} a její zvláštní název je becquerel [Bq].

V rámci této metodiky je aktivita vztahována k 1 ml krve a její jednotkou je tedy Bq/ml.

Pro účely metody neutronové aktivace na základě reakce $^{23}Na(n,\gamma)^{24}Na$ se používá tzv. **specifická aktivita**, **S**, definovaná jako **aktivita ^{24}Na na 1 gram stabilního ^{23}Na**, vyjádřená v jednotkách $Bq_{Na\text{-}24}/g_{Na}$.

Uvažujeme-li referenční osobu, jejíž obsah ^{23}Na v 1 ml krve je 1,91 mg, pak vztah mezi aktivitou krve A [Bq/ml] a specifickou aktivitou S ($Bq_{Na\text{-}24}$ /g_{Na}) je: S = A/0,00191.

2.2. DÁVKA

Absorbovaná dávka **D** je obecně definována jako podíl $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$ a $\mathrm{d}m$, kde $\mathrm{d}\bar{\varepsilon}$ je střední energie ionizujícího záření sdělená látce o hmotnosti $\mathrm{d}m$, tj.

$$D = \frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}}{\mathrm{d}m}$$

Jednotkou absorbované dávky v soustavě SI je $J \cdot kg^{-1}$ a její zvláštní název je gray (Gy).

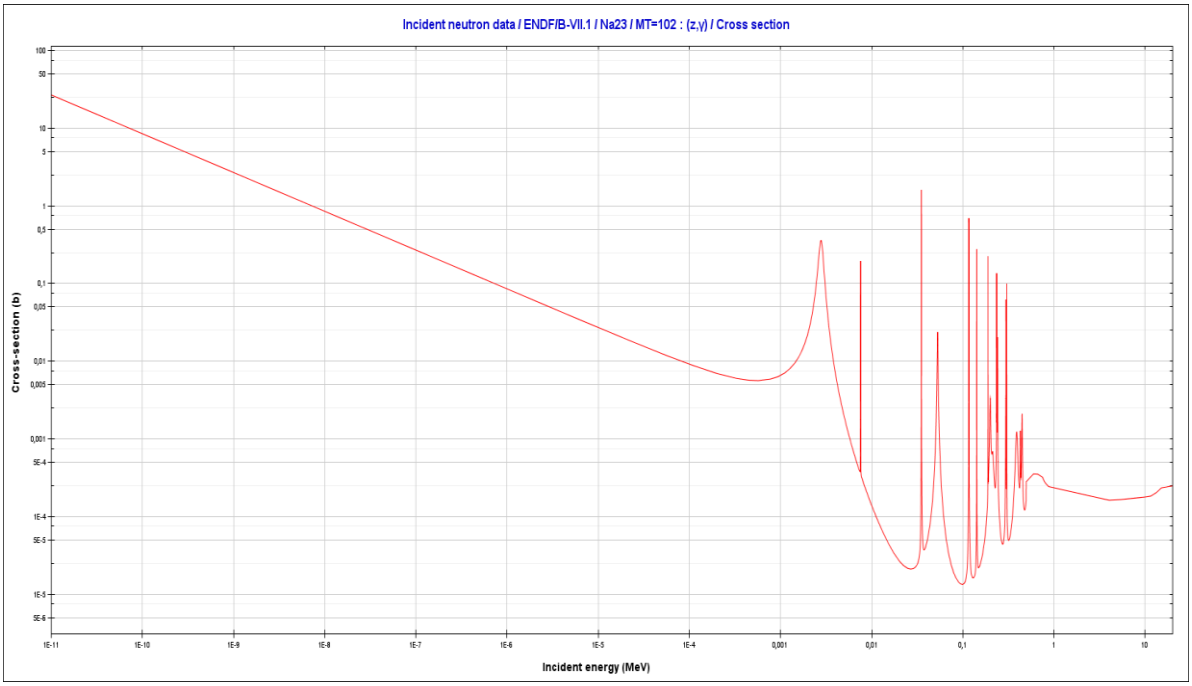
V rámci neutronové havarijní dozimetrie se obvykle používá **koncept neutronové dávky absorbované při povrchu těla**, kam dopadají neutrony [IAEA,1982]. Tato dávka D je dána jako součet neutronové částicové dávky D_p z rozptylu na biogenních prvcích H, C, N, O a jaderných reakcí (např. $^{14}N(n,p)^{14}C$) a dávky D_γ od záření gama - zejména z reakce $^{1}H(n,\gamma)^{2}D$. Pro zjednodušený model lidského těla (tzv. Snyderův válec) a předozadní expozici byly metodou Monte Carlo napočítány v závislosti na energii neutronů E hodnoty dávkových konverzních koeficientů $d(E) = D/\Phi(E)$ [$pGy \cdot cm^2$], které umožňují navázání neutronové dávky D na fluenci neutronů $\Phi(E)$. Konverzní koeficienty pro neutronovou částicovou dávku, $d_p(E)$, a pro dávku z reakce $^{1}H(n,\gamma)^{2}D$, $d_\gamma(E)$, jsou pro monoenergetické neutrony o energii E tabelovány [IAEA,1982], případně je lze spočítat s využitím empirických vztahů uvedených v [IAEA,1982]. Je-li možné považovat ozáření těla za rovnoměrné, pak D reprezentuje celotělovou

neutronovou dávku. V případě různých geometrií ozáření (AP, PA, RLAT, LLAT, ROT, ISO) lze využít konverzní koeficienty $d(E)_T = D_T/\Phi(E)$ [pGy·cm^2] stanovené pro různé orgány a tkáně uvedené v publikaci ICRP 74 [ICRP, 1997], které navazují střední absorbovanou dávku v tkáni nebo orgánu D_T s fluencí Φ v závislosti na energii neutronů a geometrii ozáření. Dle doporučení IAEA [IAEA,2005] by měly být stanoveny neutronové dávky pro tyto tkáně a orgány: červená kostní dřeň, tračník, plíce a štítná žláza. S ohledem na deterministické účinky musí být následně stanovené neutronové váženy relativní biologickou účinností pro neutrony [IAEA,2005].

3. PRINCIP METODY A POSTUP

3.1. PRINCIP METODY

Je-li lidské tělo ozářeno neutrony o energiích až do 15 MeV, pak 15 až 35% z těchto neutronů je lidským tělem zpomaleno až na tepelné energie a následně zachyceno [Cross a Ing, 1985], což vede k indukování aktivity. ^{23}Na(n, γ)^{24}Na je jednou z aktivačních jaderných reakcí, ke kterým v těle dochází v celém rozsahu energií neutronů s energií klesajícím účinným průřezem (viz obr. 1). Význam této reakce spočívá v tom, že po několika hodinách téměř všechna indukovaná aktivita v lidském těle pochází z radioaktivní přeměny ^{24}Na, který má poločas přeměny 15 hodin a rozpadá se za emise záření β (E_{max} = 1,39 MeV) a γ (1,369 MeV a 2,754 MeV). V případě, že se měření aktivity provádí s odstupem několika dní po ozáření, musí se do výpočtu zahrnout i určité vyloučení sodíku z těla, ke kterému mezitím došlo. Biologický poločas sodíku je 11 dní [Cross a Ing, 1985].



Obr. 1. *Účinný průřez reakce* ^{23}Na(n,γ)^{24}Na [Soppera et al., 2014]

Množství stabilního ^{23}Na v 1 ml krve se mezi osobami může vzájemně lišit. Není-li k dispozici individuální údaj, lze použít hodnotu pro referenční osobu **1,91 mg/ml**. Individuální hodnota množství ^{23}Na v krvi může být stanovena pomocí metody atomové emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (IPC-AES) [IAEA,2005].

Uvažujeme-li expozici lidského těla v radiačním poli neutronů, pak vztah mezi specifickou aktivitou S [$Bq_{Na\text{-}24}/g_{Na}$] a celkovou fluencí neutronů Φ [cm^{-2}] lze vyjádřit následovně [IAEA, 2005]:

$$\Phi = \frac{V \cdot M_{Na} \cdot \Sigma_{th}}{\lambda \cdot \sigma \cdot N_{av} \cdot B \cdot \bar{\xi}} \cdot S$$

kde jednotlivé symboly znamenají:

V - objem lidského těla (pro referenční osobu V = 68280 cm^3)

B - projekční plocha lidského těla ve směru dopadu neutronů (pro referenční osobu B = 5690 cm^2)

λ - přeměnová konstanta pro ^{24}Na ($\lambda = 1{,}28 \cdot 10^{-5}\ s^{-1} = 7{,}7 \cdot 10^{-4}\ min^{-1}$)

σ - absorpční účinný průřez ^{23}Na pro termální neutrony ($\sigma = 5{,}34 \cdot 10^{-25}\ cm^2 = 0{,}534$ b)

Σ_{th} - makroskopický celkový účinný průřez lidského těla pro termální neutrony (Σ_{th} = 0,02339 cm^{-1})

N_{av} - Avogadrova konstanta ($N_{av} = 6{,}03 \cdot 10^{23}/mol$)

M_{Na} - molární hmotnost ^{23}Na ($M_{Na} = 23\ g \cdot mol^{-1}$)

$\bar{\xi}$ - střední hodnota pravděpodobnosti záchytu neutronů v lidském těle pro dané spektrum neutronů.

Z předchozího vztahu po dosazení uvedených hodnot vyplývá zjednodušený vztah mezi celkovou fluencí neutronů Φ [cm^{-2}] a specifickou aktivitou S [$Bq_{Na\text{-}24}/g_{Na}$]:

$$\Phi = 1{,}31 \cdot 10^5 \cdot \frac{V}{B \cdot \bar{\xi}} \cdot S \cong 1{,}57 \cdot 10^6 \cdot \frac{S}{\bar{\xi}}$$

Neutronovou dávku D [Gy] lze z fluence Φ [cm^{-2}] stanovit pomocí střední hodnoty konverzního koeficientu $\bar{d}$ [$pGy \cdot cm^2$] pro dané spektrum neutronů:

$$\boldsymbol{D = 1 \cdot 10^{-12} \cdot \bar{d} \cdot \Phi}$$

Vztah mezi neutronovou dávkou D [Gy] a specifickou aktivitou S [$Bq_{Na\text{-}24}/g_{Na}$] tedy je:

$$D = 1{,}31 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{V}{B} \cdot \frac{\bar{d}}{\bar{\xi}} \cdot S \cong 1{,}57 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\bar{d}}{\bar{\xi}} \cdot S$$

3.2. POSTUP

Postup v rámci stanovení neutronové dávky na základě měření aktivity vzorku odebrané krve sestává z níže uvedených navazujících procedur a kroků.

3.2.1. PŘÍPRAVA VZORKU KRVE

Vzorek krve o objemu 10 až 20 cm^3 by měl být odebrán pacientovi co nejdříve po ozáření. Odběr krve provádí zdravotnické pracoviště. Odebraná krev by následně měla být neprodleně přemístěna do pevně uzavíratelné zkumavky spolu s malým množstvím heparinu, aby se zabránilo koagulaci. Zkumavku je poté třeba protřepat. Vzorek musí být následně co nejrychleji transportován do laboratoře radiochemie SÚRO, kde se stanoví objem připraveného vzorku krve. Vzorek je poté předán do oddělení spektrometrie k měření aktivity.

3.2.2. ZÁZNAM VSTUPNÍCH ÚDAJŮ

Ve spolupráci se zdravotnickým pracovištěm případně Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) je třeba zajistit základní informace o pacientovi, individuálním množství sodíku v krvi, podmínkách expozice, času expozice, času odběru krve a objemu krve. Tyto údaje je třeba zaznamenat do protokolu v **Příloze 1**.

3.2.3. MĚŘENÍ AKTIVITY VZORKU

Stanovení aktivity ozářených vzorků krve se provádí metodou polovodičové spektrometrie záření gama pomocí HPGe detektorů.
Spektrometrická trasa je zpravidla nakalibrována pro energetický rozsah 40 – 3000 keV. Pro stanovení aktivity ^{24}Na se použijí dobře měřitelné gama linky s energiemi 1 368,5 a 2 754,1 keV se zastoupením 99.99 % resp. 99.86 %.
Pro měření a analýzu spekter se používá spektrometrický software (např. GENIE^{TM}2000, GAMWIN, Maestro a další). Vzhledem k rozměrům měřených vzorků (ne větší než 2cm) lze kvantitativní analýzu provést s využitím účinnostních kalibrací detektoru pro bodovou geometrii v různých vzdálenostech od detektoru (20cm až 100cm; podle v laboratoři zavedených kalibrací). Pro vzdálenost větší než 20 cm lze zanedbat vliv koincidencí na výslednou aktivitu, korekce na absorpci ve vzorku je rovněž zanedbatelná.
Do výpočtu aktivity ^{24}Na z důvodu krátkého poločasu přeměny (15 h) se zahrnou korekce na přeměnu během doby mezi koncem odběru a začátkem měření a korekce na přeměnu během

doby měření (součást vyhodnocení v GENIE). Stanovení aktivity se provede jako vážený průměr aktivit na jednotlivých energetických linkách A_i s jejich nejistotami σ_{A_i} podle vztahu:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{A_i}{{\sigma_{A_i}}^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sigma_{A_i}^2}} \quad (Bq)$$

Nejistota aktivity se určí jako nejistota váženého průměru:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\sigma_{A_i}^2}}} \quad (Bq)$$

Nejistoty naměřených aktivit se konzervativně rozšíří metodou šíření chyb:

$$\sigma_A = A\sqrt{(\frac{\sigma_R}{100})^2 + {\sigma_1}^2 + {\sigma_2}^2 + {\sigma_3}^2} \quad (Bq)$$

kde jsou vyjádřeny vlivy dalších nepřesností

σ_A výsledná kombinovaná standardní nejistota

σ_R relativní nejistota vypočtená programem GENIE

σ_1 nejistota umístění vzorku – do 6 %

σ_2 nejistota daná tvarem měřeného vzorku – do 6 %

σ_3 nejistota zahrnující neprovedení koincidencí - pro vzdálenost vzorku od detektoru **≥** 20cm představuje 0 %

Poznámka: V případě nedodržení vzdálené geometrie z důvodu nízké aktivity vzorku je zapotřebí korekce pro výpočet výsledné aktivity použít.

Ve výsledcích se uvádí aktivita v jednotkách Bq spolu s kombinovanou standardní nejistotou (pro hladinu spolehlivosti 68%).

Je-li stanovená hodnota aktivity menší než nejmenší významná aktivita NVA (vypočtená programem GENIE), uvede se jako výsledek stanovení hodnota NVA se znakem „ < “ před hodnotou NVA v jednotkách Bq (pro hladinu spolehlivosti 95%).

3.2.4. STANOVENÍ FRAKCE ^{24}Na ZADRŽENÉHO V KRVI

Frakce sodíku zadrženého v krvi po čase t vyjádřeném ve dnech uplynulých od ozáření do odběru vzorku krve se stanoví dle vztahu [Miele a Lebaron-Jacobs, 2008; Feng, 1993]:

$$R_t = 0{,}487 \cdot e^{-0{,}0815t} + 0{,}510 \cdot e^{-0{,}0513t} + 0{,}0027 \cdot e^{-0{,}0015t}$$

3.2.5. VÝPOČET AKTIVITY V 1 ML KRVE PRO ČAS EXPOZICE

Aktivita ^{24}Na vztažená k 1 ml krve v času ozáření se vypočte dle vztahu [Miele a Lebaron-Jacobs, 2008]:

$$A = \frac{\lambda \cdot C \cdot F_a}{60 \cdot E_f \cdot V \cdot R_t \cdot (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})} \quad (\frac{Bq}{ml})$$

Jednotlivé parametry v rovnici jsou:

λ – přeměnová konstanta (^{24}Na) = 0,00077 min^{-1}

t_1 – čas uplynulý od ozáření do začátku měření aktivity vzorku v minutách

t_2 – čas uplynulý od ozáření do konce měření aktivity vzorku v minutách

C – počet pulsů za minutu z měření ^{24}Na po korekci na pozaďový signál

F_a – korekční faktor na dobu trvání ozáření t_3 v minutách

$$F_a = \frac{\lambda t_3}{1 - e^{-\lambda t_3}}$$

Jedná-li se jednorázové krátké ozáření, aplikuje se $F_a = 1$.

E_f – účinnost detektoru v oblasti zájmu energetického spektra (1,369 MeV)

V – objem krve (ml)

R_t – frakce ^{24}Na zadrženého v krvi

3.2.6. VÝPOČET SPECIFICKÉ AKTIVITY PRO ČAS EXPOZICE

Specifická aktivita S pro ^{24}Na v krvi a čas ozáření se vypočte podle vztahu:

$$S = \frac{A}{\rho_{Na}} \quad (\frac{Bq_{Na-24}}{g_{Na}})$$

kde A představuje aktivitu vypočtenou v části 3.2.5. a ρ_{Na} je koncentrace sodíku v krvi stanovená individuálně metodou atomové emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem. Není-li tato individuální hodnota k dispozici, použije se ρ_{Na} = 1,91 mg/ml.

3.2.7. ZÁZNAM VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ AKTIVITY

Data týkající se měření aktivity a výpočtu specifické aktivity se zaznamenávají do protokolu v **Příloze 2**.

3.2.8. ODHAD SPEKTRA NEUTRONŮ

Odhad fluenčního spektra neutronů lze získat pomocí transportních výpočetních programů na principu metody Monte Carlo, například MCNP nebo Geant4. Podmínkou využití této možnosti je znalost expozičních podmínek. Není-li možné provést výpočetní odhad spektra, je možné využít kompendium neutronových spekter [IAEA, 1978], kde jsou uvedena fluenční spektra pro různé zdroje neutronů a stínění.

3.2.9. STANOVENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI ZÁCHYTU NEUTRONŮ V TĚLE

Pro konkrétní neutronové spektrum lze stanovit střední hodnotu $\bar{\xi}$ dle vztahu:

$$\bar{\xi} = \frac{\int_0^\infty \xi(E)\phi(E)dE}{\int_0^\infty \phi(E)dE}$$

Hodnoty ξ(E) jsou závislé na energii neutronů a na hmotnosti lidského těla. Pro monoenergetické neutrony a pro různé fantomy lidského těla jsou uvedeny v **Příloze 3**. Jsou zde rovněž uvedeny výsledné střední hodnoty $\bar{\xi}$ pro štěpné spektrum, termální neutrony a neutrony oblasti spektra 1/E.

3.2.10. STANOVENÍ DÁVKOVÉHO KONVERZNÍHO KOEFICIENTU

Střední hodnota dávkového konverzního koeficientu pro dané spektrum neutronů se vypočítá podle vztahu:

$$\bar{d} = \frac{\int_0^\infty d(E)\phi(E)dE}{\int_0^\infty \phi(E)dE}$$

přičemž hodnoty $d_p(E)$ a $d_\gamma(E)$ pro monoenergetické neutrony jsou uvedeny v publikaci IAEA [IAEA, 1982]. Vypočtené střední hodnoty $\bar{d}$ pro různá spektra neutronů lze nalézt v kompendiu neutronových spekter [IAEA, 1978].

Analogickým způsobem lze stanovit střední hodnotu dávkového konverzního koeficientu pro dané spektrum neutronů a vybrané orgány a tkáně T (červená kostní dřeň, tračník, plíce, štítná žláza) na základě dat pro monoenergetické neutrony a vybrané geometrie ozáření [ICRP, 1997]:

$$\overline{d_T} = \frac{\int_0^\infty d_T(E)\phi(E)dE}{\int_0^\infty \phi(E)dE}$$

Vypočtené hodnoty $\bar{d}$ **a** $\overline{d_T}$ **pro štěpné spektrum neutronů** jsou uvedeny **v Příloze 4**. Tyto hodnoty se použijí pro první odhad, není-li spektrum neutronů známo.

3.2.11. VÝPOČET FLUENCE NEUTRONŮ

Neutronová fluence Φ (cm^{-2}) se stanoví pomocí hodnot specifické aktivity S (viz 3.2.6.) a pravděpodobnosti záchytu neutronů $\bar{\xi}$ (viz 3.2.8.) ze vztahu:

$$\Phi = 1{,}57 \cdot 10^6 \cdot \frac{S}{\bar{\xi}}$$

3.2.12. STANOVENÍ NEUTRONOVÉ DÁVKY

Neutronová povrchová dávka D, případně orgánová neutronová dávka D_T se stanoví ze vztahu:

$$D = 1 \cdot 10^{-12} \cdot \bar{d} \cdot \Phi$$

$$D_T = 1 \cdot 10^{-12} \cdot \overline{d_T} \cdot \Phi$$

kde Φ (cm^{-2}) je fluence neutronů vypočtená postupem v části 3.2.9. a $\bar{d}$ (pGy·cm^2), resp. $\overline{d_T}$ (pGy·cm^2), je střední dávkový konverzní koeficient stanovený pro dané spektrum neutronů postupem dle 3.2.8.

3.2.13. STANOVENÍ NEUTRONOVÉ DÁVKY VÁŽENÉ RBE

Pro osoby s rizikem deterministických účinků je třeba stanovit dávku váženou vzhledem k relativní biologické účinnosti neutronů v jednotkách Gy-Eq [IAEA, 2005] :

$$D_{RBE} = 3 \cdot D$$

$$D_{TRBE} = 3 \cdot D_T$$

3.2.14. ZÁZNAM VÝSLEDKŮ STANOVENÍ DÁVKY

Výsledky stanovení neutronové dávky se zaznamenávají do protokolu uvedeného v **Příloze 5**.

3.3. VERIFIKACE A ZABEZPEČENÍ JAKOSTI

Metodika stanovení neutronové dávky na základě měření indukované aktivity krve byla otestována pomocí experimentů, kde byly vzorky krve ozařovány ve směsných reaktorových polích neutronů a fotonů [Ekendahl et al., 2016; Ekendahl et al., 2019a].

Pro účely havarijní připravenosti bude metodika aplikována minimálně jednou za 3 roky, a to formou experimentu.

3.4. ZÁZNAMY A VÝSTUPNÍ DOKUMENTACE

Záznamy vztažené k měření a vyhodnocení dávky pomocí solných dozimetrů jsou uchovávány v těchto formách:

- Deníky měření
- Elektronické záznamy o měření a výpočtech v rámci použitých laboratorních SW aplikací
- Protokoly (vzor viz **Přílohy 1, 2 a 5**)

4. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ

Tato metodika umožňuje stanovení osobní neutronové dávky na základě měření aktivity ^{24}Na ze vzorku krve odebraného ozářené osobě. Mez použitelnosti metodiky z hlediska minimální detekovatelné dávky je závislá na spektru neutronů, fluenci neutronů, objemu vzorku krve, vzdálenosti vzorku od detektoru, času uplynulému od ozáření a délce doby měření. Pro reaktorová spektra neutronů v závislosti na výše uvedených parametrech vychází hodnoty minimální detekovatelné aktivity v řádu tisícin až desítek Bq/ml. Tomu odpovídají hodnoty minimální detekovatelné dávky v řádu desítek µGy až desetin Gy [Ekendahl et al., 2016].
Uplatnění metodiky v praxi se tedy předpokládá především v krizových situacích závažných jaderných incidentů a nehod, kdy stanovení osobní dávky je základním předpokladem pro efektivní triáž a lékařskou péči. Společně s metodikou pro stanovení osobní dávky od rychlých neutronů na základě aktivace vlasů [Ekendahl et al., 2019b] tato metodika rozšiřuje možnosti současného systému havarijní připravenosti v oblasti retrospektivních dozimetrických metod. Metodiky retrospektivní neutronové dozimetrie nebyly dosud k dispozici.

REFERENCE

Cross, W.G. a Ing, H., 1985. Sodium activation in the human body. Radiat. Prot. Dosim. 10, 265-276

Ekendahl et al., 2016. Dozimetrie neutronů s využitím vzorků vlasů, krve a soli. Zpráva SÚRO č. 9/2016. SÚRO.

Ekendahl et al., 2019a. Neutron dose assessment using samples of human blood and hair. Radiat. Prot. Dosim. (*přijato k publikaci*)

Ekendahl a Hupka, 2019b. Metodika M10. Stanovení osobní neutronové dávky s využitím indukované aktivity ze vzorku vlasů. SÚRO.

Feng, Y. et al., 1993. Determination of neutron dose from criticality accidents with bioassays for sodium-24 in blood and phosphorus-32 in hair. ORNL/TM-12028, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA.

ICRP, 1997. ICRP Publication 74. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. Annals of the ICRP.

IAEA, 1978. Compendium of neutron spectra in criticality accident dosimetry. IAEA Technical Reports Series No 180. IAEA, Vienna.

IAEA, 1982. Dosimetry for criticality accidents – a manual. IAEA Technical Reports Series No 211. IAEA, Vienna.

IAEA, 2005. Generic procedures for medical response during a nuclear or radiological emergency. IAEA, Vienna.

Miele, A., Lebaron-Jacobs, L., 2008. What to do when faced with victims of a criticality accident. Radioprotection Vol 43, No 6

Soppera, N. et al., 2014. "JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System", Nuclear Data Sheets, Volume 120, 294-296

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Protokol vstupních údajů

Příloha 2: Protokol o měření aktivity ^{24}Na

Příloha 3: Hodnoty pravděpodobnosti záchytu neutronů v lidském těle

Příloha 4: Hodnoty dávkových konverzních koeficientů pro štěpné spektrum neutronů

Příloha 5: Protokol o stanovení neutronové dávky

PŘÍLOHA 1: PROTOKOL VSTUPNÍCH ÚDAJŮ

Identifikační údaje pacienta

Jméno	
Datum narození	
Váha	
Výška	

Popis expozice

Datum a čas, doba expozice	
Vzdálenost od zdroje záření (m)	
Pozice osoby vzhledem ke zdroji záření	
Typ zdroje záření	
Informace o spektru záření	
Další informace	

Odebraný vzorek krve

Datum a čas odběru	
Zdravotnické pracoviště - kontakt	
Individuální koncentrace Na v krvi (mg/ml)	
Datum a čas převzetí vzorku	
Objem vzorku (ml)	

Vyplnili: Datum:

PŘÍLOHA 2: PROTOKOL O MĚŘENÍ AKTIVITY ^{24}Na

Informace o vzorku a časové údaje

Jméno pacienta	
Objem vzorku krve (ml)	
Koncentrace sodíku v krvi (mg/ml)	
Datum a čas ozáření, doba trvání ozáření	
Datum a čas odběru krve	
Doba uplynulá mezi časem odběru a časem ozáření (d)	
Frakce sodíku zadrženého v krvi	
Datum a čas začátku měření	
Čas uplynulý od ozáření do začátku měření, t_1 (min)	
Datum a čas konce měření	
Čas uplynulý od ozáření do konce měření, t_2 (min)	
Korekční faktor na dobu trvání ozáření, F_a	

Údaje o měření

Detektor	
Účinnost detektoru, E_f	
Počet pulsů za minutu měření po korekci na pozadí, C	

Výsledky

Aktivita v 1 ml krve čase ozáření, A (Bq/ml)	
Specifická aktivita, S ($Bq_{Na\text{-}24}$ /g_{Na})	
Počet pulsů za minutu měření po korekci na pozadí, C	

Vyplnili: Datum:

PŘÍLOHA 3: HODNOTY PRAVDĚPODOBNOSTI ZÁCHYTU NEUTRONŮ V LIDSKÉM TĚLE

V tabulce 1 jsou uvedeny vypočtené hodnoty ξ(E) pro monoenergetické neutrony a pro různé fantomy lišící se hmotností. V tabulce 2 jsou pak střední hodnoty $\bar{\xi}$ vypočtené štěpné spektrum, oblast spektra 1/E a termální neutrony. Hodnoty byly vypočteny pro model, kdy je fantom ozařován širokým svazkem neutronů kolmo dopadajícím na trup fantomu. V části spektra 1/E se jedná o průměrnou hodnotu pro energie od 0,4 eV do 0,4 MeV [Cross a Ing, 1985].

Tab. 1. Hodnoty ξ(E) pro monoenergetické neutrony a pro různé fantomy [Cross a Ing, 1985]

Energie (MeV)	Fantom McGuire (62 kg)	Fantom BOMAB (68 kg)
$1 \cdot 10^{-6}$	0,301	0,305
$1 \cdot 10^{-5}$	0,338	0,348
$1 \cdot 10^{-4}$	0,335	0,345
$1 \cdot 10^{-3}$	0,313	0,320
$1 \cdot 10^{-2}$	0,296	0,299
$1 \cdot 10^{-1}$	0,292	0,302
0,3	0,294	0,309
0,44	0,251	0,258
0,5	0,303	0,305
0,6	0,302	0,302
0,8	0,288	0,300
1,0	0,244	0,249
1,2	0,270	0,273
2,0	0,242	0,253
2,3		0,248
2,5	0,229	0,242
3,5	0,198	0,206
4,5	0,178	0,197
6,25	0,144	0,156
10	0,140	0,147
14,1		0,133

Tab. 2. Hodnoty $\bar{\xi}$ pro vybraná spektra neutronů a pro různé fantomy [Cross a Ing, 1985]

Spektrum	Fantom McGuire (62 kg)	Fantom BOMAB (68 kg)	Fantom Sturdyman (91 kg)
Termální	0,186	0,181	0,188
1/E	0,311	0,319	0,343
Štěpné	0,246	0,254	0,297

PŘÍLOHA 4: HODNOTY DÁVKOVÝCH KONVERZNÍCH KOEFICIENTŮ PRO ŠTĚPNÉ SPEKTRUM

V tabulce 3 jsou uvedeny střední hodnoty konverzního koeficientu pro povrchovou neutronovou dávku a pro orgánové neutronové dávky pro štěpné spektrum neutronů.

Tab. 3. Hodnoty $\overline{d}$ a $\overline{d_T}$ vypočtené pro štěpné spektrum

$\overline{d}$ (pGy·cm^2)		35
$\overline{d_T}$ (pGy·cm^2)	červená kostní dřeň	12
	tračník	16
	plíce	17
	štítná žláza	28

PŘÍLOHA 5: PROTOKOL O STANOVENÍ NEUTRONOVÉ DÁVKY

Vstupní údaje

Jméno pacienta	
Specifická aktivita, S (Bq_{Na-24} /g_{Na})	
Informace o podmínkách ozáření	
Metoda stanovení spektra	

Vypočtené údaje závislé na spektru

Střední pravděpodobnost záchytu neutronů		
Střední dávkový konverzní koeficient pro povrchovou dávku, $\bar{d}$ (pGy·cm^2)		
Střední dávkový konverzní koeficient pro orgánovou dávku, $\overline{d_T}$ (pGy·cm^2)	červená kostní dřeň	
	tračník	
	plíce	
	štítná žláza	
Fluence (cm^{-2})		

Výsledky stanovení neutronové dávky

Neutronová povrchová dávka, D (Gy)		
Neutronová orgánová dávka, D_T (Gy)	červená kostní dřeň	
	tračník	
	plíce	
	štítná žláza	

Výsledky stanovení neutronové dávky vážené RBE

Neutronová povrchová dávka vážená RBE, D_{RBE} (Gy-Eq)		
Neutronová orgánová dávka vážená RBE, D_{TRBE} (Gy-Eq)	červená kostní dřeň	
	tračník	
	plíce	
	štítná žláza	

Poznámky:

Vyplnili: Datum: