



Dozimetrické veličiny a jednotky používané v radiačnej ochrane

doc. Ing. Róbert HINCA, PhD

10. mája 2019

1

Ožiarenie človeka ionizujúcim žiarením

Môže spôsobiť

- krátkodobé zdravotné následky
- dlhodobé zdravotné následky

Vysoké dávky žiarenia spravidla spôsobujú okamžité poškodenie orgánov a tkanív, ako následok úmrtia veľkého počtu buniek, ktoré môžu napokon viesť k úmrtiu ožiareného jedinca. Takému typu poškodenia hovoríme tkanivové reakcie (predtým nestochastické alebo deterministické efekty).

Nízke dávky žiarenia nespôsobujú tkanivové reakcie, avšak poškodenie genetickej informácie v bunkách môže neskôr spôsobiť vznik rakoviny alebo dedičné poškodenia či ochorenia u potomstva. Tieto poškodenia sa nazývajú stochastické.

10. mája 2019

2

Špecifiká veličín radiačnej ochrany

Úlohou je kvantifikovať rozsah ožiarenia ionizujúcim žiarením **celého tela** a **jednotlivých častí** tela vplyvom **externého** a **interného** ožiarenia.

Vplyv ožiarenia závisí od energie pohltenej v orgánoch alebo tkanivách a je vyjadrený dávkou.

Stanovená dávka sa následne porovnáva s limitom, ktorý má zabezpečiť, že tkanivové reakcie nenastanú a pravdepodobnosť stochastických následkov bude na prijateľnej úrovni.

10. mája 2019

3

Efektívna dávka - základná veličina radiačnej ochrany

predtým aj efektívny dávkový ekvivalent (1977)

Navrhnutá ako **univerzálna dozimetrická veličina** použiteľná na preukázanie splnenia limitov ožiarenia. Musí brať do úvahy rôzne aspekty ožiarenia

- všetkými typmi ožiarenia, (α , β , γ , n , p , ...)
- externé a interné ožiarenie,
- ožiarenie rôznych častí tela, (ruky, oko, pľúca...)
- orgánov a tkanív (s rôznou radiosenzitivitou),
- rôzne individuality (v zmysle zdravotného stavu, telesnej zdatnosti, veku, pohlavia a individuálnej senzitivity resp. predispozícií)
- profesionálne ožiarenie aj obyvateľstvo

10. mája 2019

4

Veličiny a jednotky charakterizujúce zdroje ionizujúceho žiarenia

- Aktivita, A (Bq)
- Konštanta premeny, λ (s^{-1})
- Stredná doba života rádioaktívnych jadier, τ (s)
- Doba polpremeny (polčas premeny), $T_{1/2}$ (s)
- Energia emitovaných častíc (eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J, 10^{-15} – femto)
 - pre ^{137}Cs predstavuje 661 keV asi 10^6 fJ)
- Maximálna a stredná energia spojitého β spektra (eV)
- Zastúpenie v diskretnom spektre α , γ (%) príslušnej čiary
- Emisia zdroja
- Uhlová emisia zdroja

$$\dot{N}_z = \frac{dN_z}{dt}$$

$$\dot{N}_{\Omega,z} = \frac{d\dot{N}_z}{d\Omega}$$

10. mája 2019

5

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc (m^{-2})
- Príkon fluencie častíc ($m^{-2}s^{-1}$) – hustota toku
- Radiancia častíc ($m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$)
- Fluencia energie ($J \cdot m^{-2}$)
- Príkon fluencie energie ($J \cdot m^{-2}s^{-1}$)
- Radiancia energie ($J \cdot m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$)
- Hustota **prúdu** častíc J ($m^{-2}s^{-1}$)
 - vektorová veličina, ostatné sú skalárne

10. mája 2019

6

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Účinný prierez interakcie (celkový σ_v , uhlový σ_{Ω} , spektrálny σ_E), ($1b = 10^{-28} m^2$)
- Makroskopický účinný prierez interakcie Σ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie μ_E (m^{-1})
- Lineárna brzdná schopnosť S (Jm^{-1})
- Lineárny prenos energie L resp. LET (Jm^{-1})
- Celková ionizačná schopnosť častice
- Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie W(eV)

10. mája 2019

7

Veličiny dozimetrie ionizujúceho žiarenia

- Charakterizujú energiu absorbovanú v látke alebo jej ionizačné prejavy.
- Dajú sa odvodiť od z veličín popisujúcich pole žiarenia a koeficientov interakcie.
- Môžeme ich definovať priamo a priamo ich aj merať.
- **Dozimetrické veličiny pre meranie a výpočty:**
 - odovzdaná energia,
 - absorbovaná dávka,
 - príkon absorbovanej dávky,
 - lineárny prenos energie,
 - dávkový ekvivalent, príkon DE,
 - osobný, priestorový a smerový DE

10. mája 2019

8

Veličiny radiačnej ochrany

• veličiny na účely limitovania:

- stredná absorbovaná dávka v orgáne,
- ekvivalentná dávka,
- efektívna dávka,
- úväzok ekvivalentnej dávky,
- úväzok efektívnej dávky,
- kolektívna ekvivalentná dávka,
- kolektívna efektívna dávka.

10. mája 2019

9

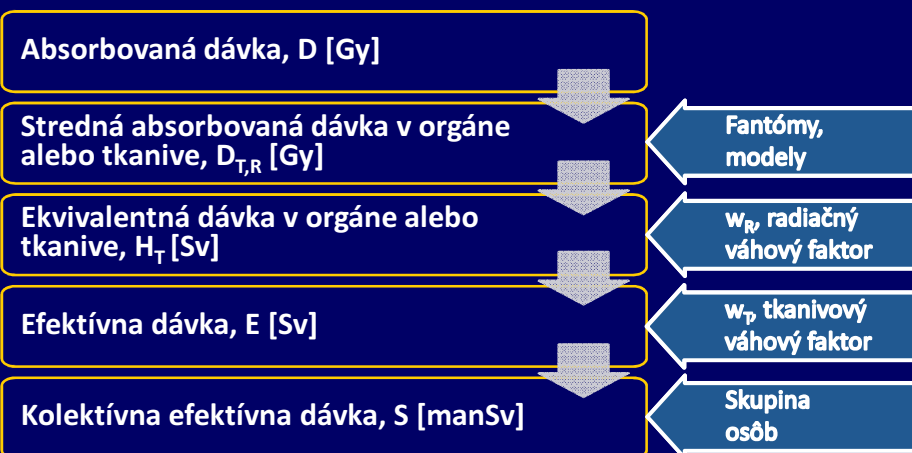
Veličiny používané pri hodnotení ožiarenia

- Príjem rádionuklidu – aktivita (Bq)
- Absorbovaná dávka ($Gy=J/kg$)
- Ekvivalentná dávka (Sv), radiačný váhový faktor (1)
- Efektívna dávka (Sv), tkanivový váhový faktor (1)
- Úväzok ekvivalentnej dávky (Sv)
- Úväzok efektívnej dávky (Sv)
- Dávkový ekvivalent, osobný, priestorový, smerový (Sv)
- Kolektívna efektívna dávka (manSv)

10. mája 2019

10

Systém dávkových veličín v radiačnej ochrane



10. mája 2019

11

Aktivita, zákon rádioaktívnej premeny

- **Rádioaktívna premena** predstavuje spontánnu premenu jadier, pričom vznikajú nové jadrá alebo sa mení ich energetický stav
- Pri rádioaktívnej premene jadro emituje najmenej jednu časticu.
- Rádioaktívna premena je vlastnosťou jadra atómu a závisí len od jeho vnútorného stavu. Vonkajšími vplyvmi sa rádioaktívna premena nedá nijak ovplyvniť.

10. mája 2019

12

Zákon rádioaktívnej premeny

- Množstvo premenených jadier dN za čas dt je priamo úmerný pôvodnému počtu rádioaktívnych jadier.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- Konštanta proporcionality λ sa nazýva konštanta premeny a charakterizuje danú RAL. Predstavuje vlastne intenzitu premeny.

10. mája 2019

13

Zákon rádioaktívnej premeny

- Integrovaním v časovom intervale $0-t$ za predpokladu, že v čase $t = 0$, $N = N_0$, dostaneme zákon rádioaktívnej premeny:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- N_0 - je počet rádioaktívnych jadier v čase $t = 0$,
- N - stredný počet ešte nerozpadnutých jadier v čase t ,
- λ - konštanta premeny (rozpadová konštanta).
- Rádioaktívna premena je náhodný proces, ktorý sa riadi exponenciálnym rozdelením.
 - Náhodnou veličinou je čas, za ktorý sa jadro rozpadne od začiatku jeho pozorovania – exponenciálne rozdelenie nemá pamäť.

10. mája 2019

14

Stredná doba života

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- Stredná hodnota τ náhodnej veličiny s exponenciálnym rozdelením $N = N_0 e^{-\lambda t}$ sa nazýva **stredná doba života**.
- Stredná doba života udáva čas za ktorý klesne počet rádioaktívnych jadier e-krát, čo vyplýva zo zákona rozpadu.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \tau} = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e} \cong 0,368 N_0$$

10. mája 2019

15

Konštanta premeny λ [s⁻¹]

- Vyjadruje intenzitu rádioaktívnej premeny.
- Pre daný rádionuklid v danom energetickom stave ju definujeme ako podiel pravdepodobnosti dP , že jadro tohoto rádionuklidu podľahne za malý časový interval dt rádioaktívnej premene a tohoto časového intervalu.

$$\lambda = \frac{dP}{dt} = \frac{dN}{N} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{A}{N} \quad \lambda = \sum_i \lambda_i$$

10. mája 2019

16

Doba polpremeny $T_{1/2}$ (STN ISO 31-9)

- Doba polpremeny $T_{1/2}$, vyjadruje priemerný časový interval, za ktorý sa premení polovica rádionuklidu.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2$$

10. mája 2019

17

Aktivita

- Aktivita - charakterizuje okamžité množstvo rádioaktívnej látky.
- Je to podiel strednej hodnoty počtu spontánných jadrových premien z daného energetického stavu dN vyskytujúcich sa v množstve rádionuklidu, za malý časový interval dt a tohto časového intervalu. (Definícia STN ISO 31-10)

$$A = - \frac{dN}{dt}$$

$$A = \lambda N$$

10. mája 2019

18

Becquerel

- Jednotkou aktivity je reciproká sekunda [s^{-1}], ktorá dostala názov po objaviteľovi rádioaktivity: Becquerel [Bq].
- Jeden becquerel zodpovedá jednej jadrovej premene za sekundu: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

je aktivita 1 g rádia ^{226}Ra

10. mája 2019

19

Veličiny odvodené od aktivity

Veličina			Jednotka		
Názov	Značka	Definícia	Názov	Značka	Rozmer
molárna aktivita	a_n	$a_n = \frac{A}{n}$	becquerel na mol	Bq mol^{-1}	$\text{s}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
hmotnostná aktivita	a_m	$a_m = \frac{A}{m}$	becquerel na kilogram	Bq kg^{-1}	$\text{kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$
objemová aktivita	a_V	$a_V = \frac{A}{V}$	becquerel na meter kubický	Bq m^{-3}	$\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1}$
plošná aktivita	a_S	$a_S = \frac{A}{S}$	becquerel na meter štvorcový	Bq m^{-2}	$\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
dĺžková aktivita	a_l	$a_l = \frac{A}{l}$	becquerel na meter	Bq m^{-1}	$\text{m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
rýchlosť emisie (emanácia) aktivity	\dot{A}	$\dot{A} = \frac{A}{t}$	becquerel za sekundu	Bq s^{-1}	s^{-2}

n - látkové množstvo rádioaktívnej látky o aktivite A

m - hmotnosť rádioaktívnej látky o aktivite A

V - objem rádioaktívnej látky o aktivite A

S - plocha na ktorej je aktivita A rozložená

l - dĺžka na ktorej je aktivita A rozložená

t - časový interval, za ktorý sa rovnomerne uvoľňuje aktivita A

10. mája 2019

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

Využívajú spojité funkcie v priestore a čase, ktoré vyjadrujú:

- počty častíc prechádzajúce daným miestom za dané časové **obdobie**
- počty častíc prechádzajúce daným miestom v danom časovom **okamžiku**
- sumárnu energiu častíc prechádzajúcich daným miestom za dané časové **obdobie**
- sumárnu energiu častíc prechádzajúcich daným miestom v danom časovom **okamžiku**

10. mája 2019

21

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc (m^{-2})
- Príkon fluencie častíc ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Radiancia častíc ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
- Fluencia energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
- Príkon fluencie energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Radiancia energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
- Hustota prúdu častíc J ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

10. mája 2019

22

Fluencia častíc

- **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dN dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule dS .

$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

10. mája 2019

23

Príkon fluencie

- **Príkon fluencie (hustota toku častíc)** φ [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] popisuje okamžitú situáciu v danom bode. Definuje ju pomer fluencie častíc $d\Phi$ za časový interval dt .

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt}$$

10. mája 2019

24

Radiancia častíc, Radiancia energie

- **Radiancia častíc** p [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$] vyjadruje uhlové rozdelenie častíc na danom mieste.

$$p = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

- **Radiancia energie** r [$\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$]

$$r = \frac{d\psi}{d\Omega}$$

10. mája 2019

25

Fluencia energie častíc, Príkon fluencie energie častíc

- **Fluencia energie častíc** Ψ [J m^{-2}] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavého rezu dS a tejto plochy.

$$\Psi = \frac{dR}{dS}$$

- **Príkon fluencie energie častíc** (hustota toku energie) ψ [$\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt}$$

10. mája 2019

26

Hustota prúdu častíc

- **Hustota prúdu častíc** J [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] je definovaná ako vektorová veličina, ktorej integrál normálovej zložky cez určitú plochu sa rovná celkovému počtu častíc I prechádzajúcich cez element plochy $e_n dA$ za malý časový interval dt , delený týmto intervalom.

- Je mierou šírenia častíc určitým smerom. V izotropnom poli je hustota prúdu častíc nulová, v rovnobežnom zväzku sa v smere zväzku rovná hustote toku častíc a v opačnom smere zápornej hodnote hustoty toku častíc.

$$J e_n dA = \frac{dI}{dt}$$

10. mája 2019

27

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Účinný prierez interakcie (celkový σ_t , uhlový σ_Ω , spektrálny σ_E), ($1\text{b} = 10^{-28} \text{ m}^2$)
- Makroskopický účinný prierez interakcie Σ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie μ_E (m^{-1})
- Lineárna brzdná schopnosť S (Jm^{-1})
- Lineárny prenos energie L resp. LET (Jm^{-1})
- Celková ionizačná schopnosť častice
- Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie $W(\text{eV})$

10. mája 2019

28

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})

- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})

sa používa na popis prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárnu časticu

N je počet častíc s energiou E dopadajúcich kolmo na vrstvu dx pričom vznikajú nabitú časticu so sumárnou kinetickou energiou dE_K

- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie

μ_E (m^{-1}) zohľadňuje tú časť odovzdanej energie, ktorá sa odnesie mimo uvažovaného objemu.

$\mu_E = \mu_{tr}(1-G)$, kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

$$\mu = -\frac{1}{J} \frac{dJ}{dx}$$

$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE} \frac{dE_K}{dx}$$

$$\mu_E = \mu_{tr}(1-G)$$

10. mája 2019

29

Koeficient prenosu energie Koeficient absorpcie energie

Σ_K - koherentný rozptyl

Σ_f - fotoefekt

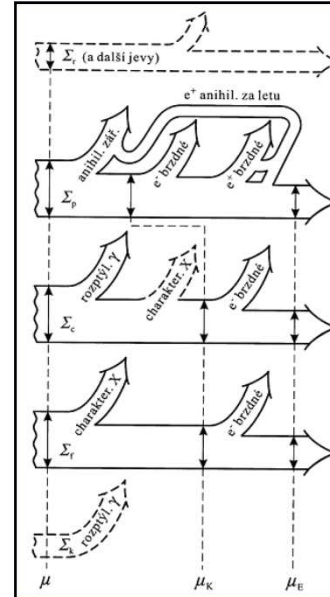
Σ_C - Comptonov rozptyl

Σ_p - tvorba párov

Σ_r - fotojadrové reakcie

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárnu časticu sa preto používa **koeficient prenosu energie** μ_{tr} (m^{-1}) (μ_K).

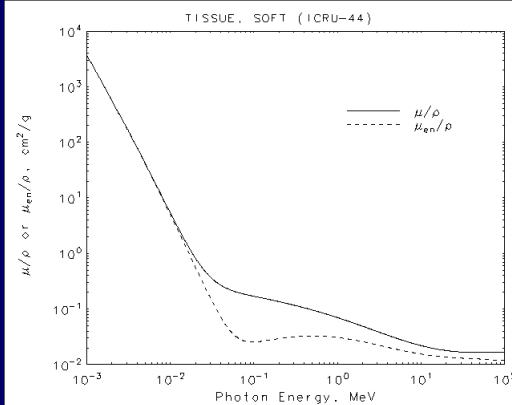
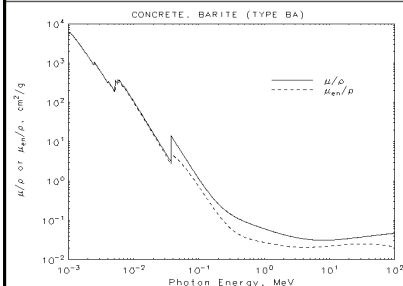
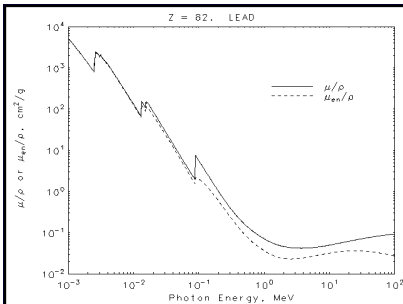
Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr}(1-G)$ (m^{-1}), kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.



30

Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>



Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Lineárna brzdná schopnosť S** ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$) aj [$\text{eV} \cdot \text{m}^{-1}$] - vyjadruje mieru energetických strát pozdĺž dráhy nabitých častíc v danom materiáli.
- Nabitú časticu strácajú energiu hlavne zrážkami s elektrónmi, pri ktorých dochádza k ionizácii a excitácii atómov (ionizačné resp. **zrážkové straty**) a **radiačnými stratami** prejavujúcimi sa emisiou brzdného žiarenia

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

$$S = S_{col} + S_{rad}$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Total} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{nuclear} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{electron} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{photon}$$

10. mája 2019

LET

Bremsstrahlung

32

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Lineárny prenos energie L (LET)** [MeV·cm⁻¹] je mierou energie **odovzdanej** pri prechode ionizujúceho žiarenia elektrónom látky **v danom mieste**.
Niekedy je preto LET ohraničená energiou Δ , ktorá ohraničuje maximálnu energiu elektrónov ktoré berieme do úvahy. Elektróny s vyššou energiou uletia preč. Bežne sa energia ohraničuje hodnotou 100 eV.
- **Pre $\Delta = \infty$ platí LET=S.**
Neznamená to samozrejme, že odovzdaná energia môže byť nekonečná!
- **Lineárna ionizácia J** (m⁻¹) vyjadruje počet vytvorených iónových párov na jednotku dráhy vyjadruje veličina
- **Stredná energia ionizácie W_i** (eV)

$$L = W_x \cdot J = \frac{\text{energia}}{1 \text{ iónový pár}} \cdot \frac{\text{počet iónových párov}}{\text{jednotka dráhy}} = \frac{\text{energia}}{\text{jednotka dráhy}}$$

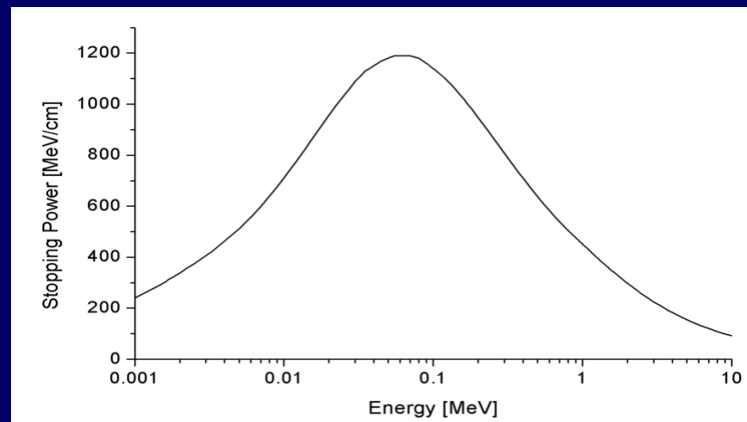
Range and Approximate LET Values for Various Charged-Particle Radiations in Water in Order of Decreasing Mass and Charge

Nuclide	Radiation, energy (MeV)	Range in water (mm)	Average LET in water (keV/μm)
Th-232	α, 4.0	0.029	138
Am-241	α, 5.5	0.048	114
Th-227	α, 6.0	0.055	109
Po-211	α, 7.4	0.075	98
.....	d, 4.0	0.219	18.3
.....	d, 5.5	0.377	14.6
.....	d, 6.0	0.440	13.6
.....	d, 7.4	0.611	12.1
.....	p, 4.0	0.355	11.3
.....	p, 5.5	0.613	9.0
.....	p, 6.0	0.699	8.6
.....	p, 7.4	1.009	7.3
Tritium	β ⁻ , 0.0186 (E _{max})	0.00575	3.2
C-14	β ⁻ , 0.156 (E _{max})	0.280	0.56
P-32	β ⁻ , 1.710 (E _{max})	7.92	0.22
Yt-90	β ⁻ , 2.280 (E _{max})	10.99	0.21

10. mája 2019

34

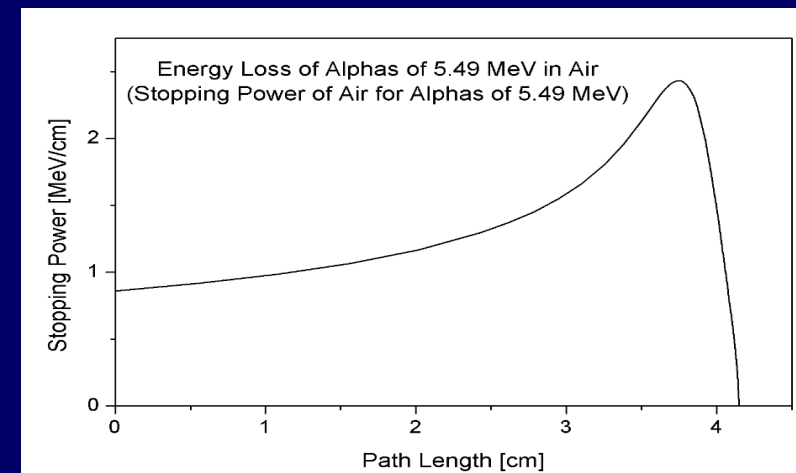
Brzdná schopnosť hliníka pre protóny



10. mája 2019

35

Brzdná schopnosť vzduchu pre alfa častice



10. mája 2019

36

Intenzita ionizácie vzduchu α časticami



10. mája 2019

37

Veličiny dozimetrie ionizujúceho žiarenia

- Charakterizujú energiu absorbovanú v látke alebo jej ionizačné prejavy.
- Dajú sa odvodiť z veličín popisujúcich pole žiarenia a koeficientov interakcie.
- **Dozimetrické veličiny pre meranie a výpočty:**
 - odovzdaná energia, absorbovaná dávka, príkon absorbovanej dávky, lineárny prenos energie, dávkový ekvivalent, príkon DE, osobný, priestorový a smerový DE
- **Dozimetrické veličiny na účely limitovania:**
 - stredná absorbovaná dávka v orgáne, ekvivalentná dávka, efektívna dávka, úväzok ekvivalentnej dávky, úväzok efektívnej dávky, kolektívna ekvivalentná dávka, kolektívna efektívna dávka.

10. mája 2019

38

Odovzdaná energia

$$E = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

- Ionizujúce žiarenie odovzdá v určitom objeme látke energiu E , ktorá sa nazýva odovzdaná energia alebo tiež integrálna absorbovaná dávka. Jednotkou je [J] alebo [MeV]
- R_{in} (R_{out}) vyjadruje sumárnu energiu všetkých častíc iž vstupujúcich do uvažovaného objemu (vychádzajúcich z objemu)
- $\sum Q$ - vyjadruje sumu všetkých energetických ekvivalentov zmien pokojových hmotností jadier a elementárnych častíc v danom objeme pri akýchkoľvek jadrových premenách. Pokles vyjadruje kladné znamienko, nárast záporné.

10. mája 2019

39

Hmotnostná odovzdaná energia

- **Hmotnostná odovzdaná energia z** [$\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] je podiel odovzdanej energie látky v uvažovanom objeme a hmotnosti tejto látky.
- Limitná hodnota strednej hmotnostnej odovzdanej energie pre $m \rightarrow 0$ sa blíži k absorbovanej dávke v bode.

$$z = \frac{E}{m}$$

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \bar{z}$$

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

10. mája 2019

40

Absorbovaná dávka

- Absorbovaná dávka [$\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] v danom bode pre každé IŽ je podiel strednej odovzdanej energie dE látky v objemovom elemente dV a jeho hmotnosti dm .
- Dávka závisí od ožarovaneho materiálu, preto sa pre presnosť uvádza aj látka, ku ktorej sa vzťahuje, napr. D_{vzd} - vzduch, D_{tk} - tkanivo...
- Dávka popisuje odovzdávanie energie za určitý časový úsek. Okamžitú situáciu popisuje dávkový príkon.
- Príkon absorbovanej dávky (dávkový príkon) vyjadruje prírastok dávky dD v časovom intervale dt delený časovým intervalom dt .

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

10. mája 2019

41

Lineárny prenos energie

Lineárna zrážková brzdná schopnosť

$$L = \frac{dE}{dl}$$

dE je energia odovzdaná v danom mieste látky pri prechode malej vzdialenosti cez látku

dl je vzdialenosť v látke

L [$\text{eV} \cdot \text{m}^{-1}$, $\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]

LET - Linear Energy Transfer
S - Stopping power

10. mája 2019

42

KERMA K [$\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

- Dávka sa vzťahuje k odovzdávaniu energie v danom mieste (t.j. z nabitých častíc na častice látky). Ak sú primárne častice nenabité, prvým krokom je interakcia s látkou a odovzdanie energie nabitým časticiam. Tento krok popisuje **kerma** (Kinetic Energy Released in Matter).
- Kerma sa vzťahuje len na nenabité žiarenie a pre danú látku.
- dE_K je sumárna počiatočná kinetická energia všetkých nabitých častíc v uvažovanom objeme dV uvoľnených nenabitými časticami žiarenia.

$$K = \frac{dE_K}{dm}$$

Okamžitú situáciu popisuje kermový príkon.

10. mája 2019

43

Vzťah medzi kermou a fluenciou častíc

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{tr,m} = F_K \cdot \Phi$$

$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

$$\Psi = \frac{dR}{dS}$$

$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE} \frac{dE_K}{dx}$$

- Fluencia častíc Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.
- F_K - kermový faktor, tabelovaná veličina
- Fluencia energie častíc Ψ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavného rezu dS a tejto plochy.
- Koeficient prenosu energie μ_{tr} [m^{-1}] (μ_K)
- N je počet častíc s energiou E dopadajúcich kolmo na vrstvu dx pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou dE_K .

10. mája 2019

44

Koeficient prenosu energie
Koeficient absorpcie energie

Σ_K - koherentný rozptyl
 Σ_f - fotoefekt
 Σ_C - Comptonov rozptyl
 Σ_p - tvorba párov
 Σ_r - fotojadrové reakcie

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárne častice sa preto používa **koeficient prenosu energie** μ_{tr} [m^{-1}] (μ_K).

Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr} (1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

45

Vzťah medzi dávkou a fluenciou častíc

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{E,m}$$

- **Koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr} (1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie. Vyjadruje teda energiu ktorá zostane absorbovaná v danom objeme.

- **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.
- **Fluencia energie častíc** Ψ [$J m^{-2}$] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavného rezu dS a tejto plochy.

10. mája 2019

46

Vzťah medzi kermou a dávkou

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m}$$

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m}$$

Energia (MeV)	$100 \cdot (\mu_{tr} - \mu_E) / \mu_{tr}$		
	Z=6	Z=29	Z=82
0,1	0	0	0
1,0	0	1,1	4,8
10,0	3,5	13,5	26

E(MeV)	1-G vzduch
0,01	1,0
0,1	1,0
1	1,0
1,5	0,996
2,0	0,995
3,0	0,991
5,0	0,984
8,0	0,972
10,0	0,964

10. mája 2019

47

Expozícia

$$X = \frac{|dQ|}{dm}$$

$$X = \Psi \cdot \mu_{E,m} \frac{e}{W_i}$$

- $\mu_{E,m}$ - hmotnostný koeficient absorpcie energie
- W_i - stredná energia ionizácie
- e - elementárny náboj

- Expozícia (ožiarenie) je najstaršia dozimetrická veličina.
- Je definované len pre fotónové žiarenie vo vzduchu.
- **Vyjadruje podiel absolútnej hodnoty celkového elektrického náboja dQ iónov rovnakého znamienka vzniknutých vo vzduchu po zabrzdení všetkých uvoľnených elektrónov a pozitronov v objemovom elemente o hmotnosti dm a tejto hmotnosti.**
- Jednotkou expozície je [$C \cdot kg^{-1}$].
- Staršou jednotkou je röntgen $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$.
- Vo vzduchu platí prevod na kermu: $1R = 8,76 mGy$

10. mája 2019

48

Kermová výdatnosť $V_{K,\delta}$ [Gy.m².s⁻¹]

$$V_{K,\delta} = \dot{K}_\delta l^2$$

$$\Gamma^\delta = \frac{V_{K,\delta}}{A}$$

- Kermová výdatnosť $V_{K,\delta}$ je charakteristika zdroja uvádzaná v jeho dokumentácii.
- Je obdobou expozičnej výdatnosti.
- Závisí na druhu rádionuklidu, jeho aktivite, konštrukcii a rozmerov zdroja.
- δ je minimálna energia uvažovaných fotónov.
- Kermu z rádionuklidového zdroja môžeme vypočítať z kermovej výdatnosti [Gy.m².s⁻¹].
- Univerzálnejšou charakteristikou rádionuklidov je kermová konštanta gama Γ^δ .

10. mája 2019

49

Dávkový ekvivalent

- **Dávkový ekvivalent** v ľubovoľnom mieste biologického väziva je daný vzťahom

$$H = D \cdot Q \cdot N^* \quad [\text{Sv}]$$

- D - absorbovaná dávka, [Gy]
- Q - faktor kvality, [1 (bezrozmerná veličina)]
- N - súčin všetkých ďalších (v súčasnosti ešte neznámych) modifikujúcich faktorov. V súčasnosti hodnota N = 1 a teda sa nemusí pri výpočte zohľadňovať.
 - * - norma STN ISO 31-10 obsahuje uvedenú definíciu, iná norma STN 01 1310 už zohľadňuje odporúčanie ICRU vypustiť hodnotu N.
- Pri presných výpočtoch sa využíva dávkový ekvivalent v závislosti od presnej veličiny lineárneho prenosu energie L.

$$H = \int_L Q(L) D_L dL$$

$$D_L = \frac{dD}{dL}$$

D_L - rozdelenie absorbovanej dávky podľa lineárneho prenosu energie,
- je podiel príspevku dávky dD v intervale $(L, L+dL)$ a tohto intervalu dL

10. mája 2019

50

Dávkový ekvivalent operačné veličiny

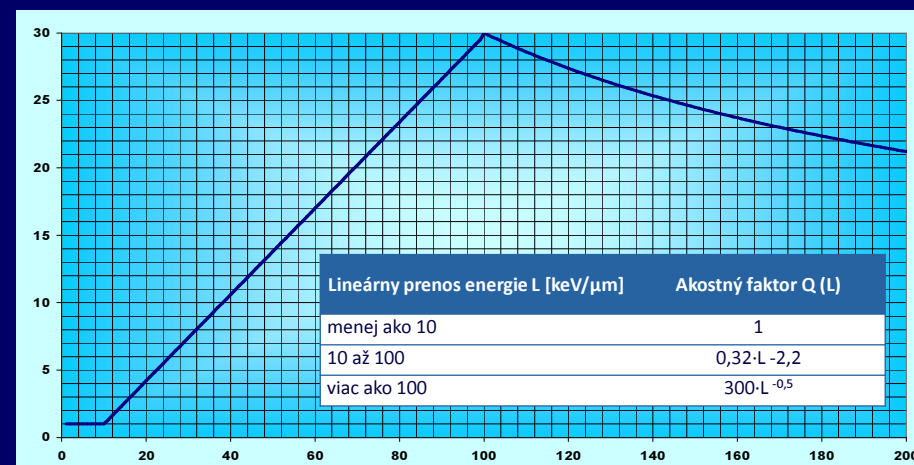
- je veličina používaná na základe odporúčaní ICRU* (Medzinárodná komisia pre radiačné jednotky a merania), ktoré definujú tzv. operačné – pracovné veličiny
 - priestorový dávkový ekvivalent
 - smerový dávkový ekvivalent
 - osobný dávkový ekvivalent
- Pre účely radiačnej ochrany sa používa ekvivalentná dávka.

*ICRU Publication No. 51/1993

10. mája 2019

51

Výpočet faktora kvality $Q(L)$



10. mája 2019

52

Veličiny používané na účely limitovania.

- Stredná absorbovaná dávka v orgáne D_T
- Radiačný váhový faktor w_R
- Tkanivový váhový faktor w_T
- Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne H_T
- Efektívna dávka E
- Úväzok ekvivalentnej dávky $H_T(\tau)$
- Úväzok efektívnej dávky $E(\tau)$
- Kolektívna ekvivalentná dávka S_T
- Kolektívna efektívna dávka S

10. mája 2019

53

Stredná absorbovaná dávka v orgáne D_T

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \cdot dm$$

- m_T je hmotnosť tkaniva alebo orgánu
- D je absorbovaná dávka v hmotnostnom elemente dm
- D_T sa rovná pomeru odovzdanej energie ε_T tkanivu alebo orgánu a hmotnosti tkaniva alebo orgánu m_T
- Nazýva sa tiež aj orgánová dávka.

10. mája 2019

54

Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne H_T

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

- $D_{T,R}$ je stredná absorbovaná dávka v biologickom tkanive T spôsobená žiarením typu R.
- Radiačný váhový faktor w_R vyjadruje rozdielny biologický účinok jednotlivých druhov ionizujúceho žiarenia (RBU).
- Názov hlavnej jednotky dávkového ekvivalentu a ekvivalentnej dávky je sievert (Sv) = J.kg⁻¹.

10. mája 2019

55

Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia	Radiačný váhový faktor w_R
Fotóny	1
elektróny a mióny	1
protóny a nabité pióny	2
častice alfa, ťažké jadrá, štiepne fragmenty	20
neutróny, $E_n < 1$ MeV	$2,5 + 18,2 \cdot e^{-[\ln(E_n)]^2}$
neutróny, $1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5,0 + 17,0 \cdot e^{-[\ln(2 \cdot E_n)]^2}$
neutróny, $E_n > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25 \cdot e^{-[\ln(0,04 \cdot E_n)]^2}$

10. mája 2019

56

Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia a jeho energia	w_R , (ICRP 60)	w_R , (ICRP 103)
Fotóny všetkých energií	1	1
Elektróny všetkých energií	1	1
Neutróny, energia E		spojitá funkcia:
< 10 keV	5	$2,5 + 18,2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, E_n < \text{MeV}$
10 keV - 100 keV	10	
100 keV - 2 MeV	20	$5,0 + 17,0 e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, 1 \text{ MeV} < E_n < 50 \text{ MeV}$
2 MeV - 20 MeV	10	
> 20 MeV	5	$2,5 + 3,25 e^{-[\ln(0,04 E_n)]^2/6}, E_n > 50 \text{ MeV}$
Protóny > 2 MeV	5	2
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20	20

Referenčné žiarenie pre súbor radiačných váhových faktorov v doporučení ICRP 103 bolo nízkoenergetické fotónové žiarenie, ktorého energia nebola konkretizovaná.
V doporučení ICRP 60 bolo konkretizované fotónové žiarenie s energiou nad 200 keV a boli brané do úvahy dáta od ^{137}Cs a ^{60}Co .

10. mája 2019

57

Fotóny, elektróny a mezóny

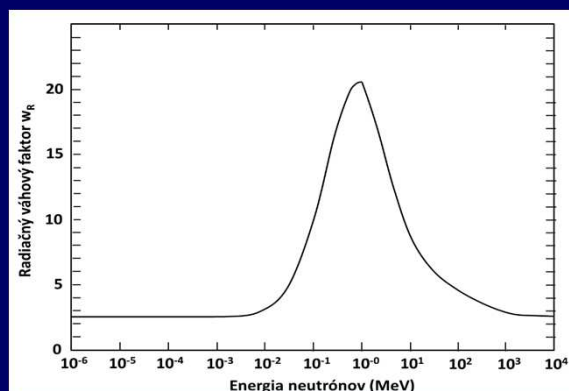
- Fotóny, elektróny a mezóny sú druhy žiarenia s nízkou hodnotou LET (<10 keV/ μm). Môže sa použiť $w_R=1$ na určenie ekvivalentnej a efektívnej dávky pri hodnotení a usmerňovaní ožiarenia v oblasti nízkych dávok.
- Reálne sa hodnota w_R líši od 1 a prejavuje sa to v individuálnom retrospektívnom hodnotení rizika, kde treba uvažovať detailnejšie informácie o poli žiarenia a príslušných hodnotách RBE.

10. mája 2019

58

w_R silne závisí od energie neutrónov

V porovnaní s predchádzajúcou stupňovitou funkciou si treba všimnúť zníženú hodnotu w_R v oblasti nízkych energií a energií nad 100 MeV. Hodnoty sa blížila k 2,5 namiesto pôvodných 5.



10. mája 2019

59

Protóny a pióny

- Dolet protónov o energii 10 MeV v tkanive je 1,2 mm a klesá s nižšími energiami. Tieto protóny sú teda absorbované v koži.
- Radiačný váhový faktor o hodnote 2 je doporučený pre všetky energie protónov a nahradzuje predchádzajúcu hodnotu 5.
- Pióny sú častice vznikajúce hlavne interakciou kozmického žiarenia s jadrami prvkov atmosféry.
- Pre nabité pióny všetkých energií sa uvažuje $w_R=2$.
- Brať do úvahy ožiarenie piónmi je treba u personálu lietadiel a pracovníkov urýchľovačov vysokoenergetických častíc.

10. mája 2019

60

Žiarenie alfa, štiepne produkty a ťažké ióny

RBE pre **alfa** sa týka hlavne interného ožiarovania alfa rádionuklidmi (hlavne Rn, ale aj Pu, Po, Ra, Th, U).

Dostupné dáta ukazujú na RBE=10÷20 pre rakovinu pľúc, a menšie hodnoty pre leukémiu a zhubný nádor kostí. Preto je $w_R=20$ konzervatívna voľba.

Podobne ako u alfa sa pre **štiepne produkty a ťažké ióny** uvažuje interné ožiarovanie, krátke dolety a vysoká ionizačná schopnosť. Radiačný váhový faktor $w_R=20$ je stanovený dostatočne konzervatívne.

Pri vonkajšom ožiarení ťažkými nabitými časticami (napr. v kozme) treba použiť realistickejší prístup.

10. mája 2019

61

Stanovenie ekvivalentnej dávky v koži pri povrchovej kontaminácii

$$H_K = \sum_i H_{K,i} = \sum_i \bar{A}_{K,i} \cdot C_{K,i} \cdot S_{K,i} \cdot T$$

$H_{K,i}$ je ekvivalentná dávka v koži od rádionuklidu i ,

$\bar{A}_{K,i}$ je priemerná povrchová aktivita rádionuklidu i na koži alebo odevu,

$C_{K,i}$ je konverzný koeficient príkonu ekvivalentnej dávky v koži rádionuklidu i ,

$S_{K,i}$ je tieniaci faktor pre zoslabenie beta žiarenia v odevu a

T je doba expozície.

Konverzný koeficient $C_{K,i}$ predstavuje nominálnu hodnotu príkonu ekvivalentnej dávky v koži ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) na jednotkovú povrchovú aktivitu rádionuklidu ($\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$).

Pre tieniaci faktor $S_{K,i}$ charakterizujúci zoslabenie beta žiarenia bežným odevom sa odporúča používať hodnoty: 0,20 pre letné obdobie, 0,30 pre obdobie jar a jeseň, 0,001 pre zimné obdobie a 0,00 pre kožu nechránenú odevom.

10. mája 2019

62

Rádionuklid	($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Konverzné koeficienty príkonu ekvivalentnej dávky v koži $C_{K,i}$ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$)	
H-3	0.00	As-76	2.10
C-14	0.32	Se-75	0.14
F-18	1.90	Br-77	0.01
Na-22	1.70	Br-82	1.50
Na-24	2.20	Rb-87	1.90
Al-26	1.80	Sr-85	0.06
P-32	1.90	Sr-89	1.80
P-33	0.86	Sr-90/Y-90	3.50
S-35	0.35	Y-90	2.00
Cl-36	1.80	Zr-95/Nb-95	1.60
K-40	1.50	Mo-99/Tc-99m	1.90
K-42	2.20	Tc-99m	0.25
K-43	1.90	Tc-99	1.20
Ca-45	0.84	Ru-103/Rh-103m	0.78
Ca-47/Sc-47	3.50	Ru-106/Rh-106	2.20
Sc-46	1.40	Ag-110m	0.68
Sc-47	1.50	Ag-111	1.80
Cr-51	0.015	Cd-109	0.54
Mn-52	0.761	In-111	0.38
Mn-54	0.062	In-113m	0.73
Mn-56	2.40	In-115m	1.30
Fe-52	1.10	Sn-125	2.30
Fe-55	0.016	Sb-122	2.20
Fe-59	0.97	Sb-124	2.20
Co-56	0.55	Sb-126	1.80
Co-57	0.12	Te-123m	1.10
Co-58	0.30	Te-132	0.78
Co-60	0.78	I-123	0.38
Ni-63	0.00	I-124	0.52
Ni-65	2.20	I-125	0.021
Cu-64	1.00	I-131	1.60
Cu-67	1.30		
Zn-65	0.076		
Ga-66	1.60		
Ga-67	0.35		
Ga-68	1.80		

Efektívna dávka

jednotkou je $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
s názvom sievert, Sv

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

Efektívna dávka E je súčtom ekvivalentných dávok H_T vo všetkých orgánoch alebo tkanivách vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom w_T .

w_T vyjadruje relatívny príspevok k celkovej zdravotnej ujme daného tkaniva v porovnaní s ostatnými tkanivami pri rovnomernom ožiarení celého tela nízkymi dávkami. (jedná sa o stochastické následky, hlavne rakovinu)

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R} = \sum_R w_R \sum_T w_T \cdot D_{T,R}$$

10. mája 2019

64

Tkanivový váhový faktor w_T podľa ICRP 103

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T
kostná dreň (červená)	0,12
hrubé črevo	0,12
pľúca	0,12
žalúdok	0,12
Prsia	0,12
ostatné orgány a tkanivá ^{a)}	0,12
gonády	0,08
močový mechúr	0,04
pažerák	0,04
pečeň	0,04
štíttna žľaza	0,04
povrch kostí	0,01
Mozog	0,01
slinné žľazy	0,01
Koža	0,01

^{a)} w_T pre ostatné tkanivá (0,12) sa vzťahuje na aritmetický priemer stredných dávok v 13 orgánoch a tkanivách oboch pohlaví; ostatné tkanivá sú: nadobličky, hrudná dutina, žľezník, srdce, obličky, lymfatické uzliny, sval, sliznica dutiny ústnej, pankreas, prostata (muži), tenké črevo, slezina, týmus, maternica/krček matrice (ženy).

10. mája 2019

65

Tkanivový váhový faktor w_T

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T , (ICRP 60)	Tkanivový váhový faktor w_T , (ICRP 103)
Gonády	0,20	0,08
Červená kostná dreň	0,12	0,12
Hrubé črevo	0,12	0,12
Pľúca	0,12	0,12
Žalúdok	0,12	0,12
Močový mechúr	0,05	0,04
Mliečna žľaza	0,05	0,12
Pečeň	0,05	0,04
Pažerák	0,05	0,04
Štítna žľaza	0,05	0,04
Koža	0,01	0,01
Povrchy kostí	0,01	0,01
Slinná žľaza	-	0,01
Mozog	-	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05	0,12

10. mája 2019

66

Úvazok ekvivalentnej dávky

je časový integrál príkonu ekvivalentnej dávky v orgáne alebo tkanive T za čas τ od príjmu rádionuklidu.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

- Na účel hodnotenia veľkosti ožiarenia osôb a sledovania dodržiavania limitov ožiarenia sa pre výpočet úvazku ekvivalentnej dávky u osôb starších ako 18 rokov sa počíta s obdobím 50 rokov a u osôb mladších ako 18 rokov s obdobím 70 rokov od príjmu rádionuklidov.
- Jednotkou úvazku ekvivalentnej dávky je **Sievert (Sv)**.

10. mája 2019

67

Úvazok efektívnej dávky

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau) = \sum_T w_T \cdot \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt$$

- je súčet úvazkov ekvivalentných dávok $H_T(\tau)$ v orgáne alebo tkanive T za čas τ od príjmu rádionuklidov vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom w_T .
- Jednotkou úvazku efektívnej dávky je **Sievert (Sv)**.

10. mája 2019

68

Úväzok efektívnej dávky z príjmu rádionuklidov požitím alebo vdýchnutím za kalendárny rok

$$E(50) = \sum_j h(g)_{j,ing} \cdot I_{j,ing} + \sum_j h(g)_{j,inh} \cdot I_{j,inh}$$

- kde $E(50)$ je úväzok efektívnej dávky z vnútorného ožiarovania za obdobie 50 rokov po prijme rádionuklidov,
- $I_{j,ing}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) potravou za rok,
- $I_{j,inh}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) dýchaním za rok,
- $h(g)_{j,ing}$ je konverzný faktor pre výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) potravou pre vekovú skupinu g
- $h(g)_{j,inh}$ je konverzný faktor pre výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) dýchaním pre vekovú skupinu g .

10. mája 2019

69

Stanovenie efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarovania rádionuklidmi rozptýlených v ovzduší

Osoby, ktoré sa nachádzajú vo vnútri rádioaktívneho mraku, v ktorom sú rozptýlené rádionuklidy emitujúce gama žiarenie, sú vystavené celotelovému externému ožiarovaniu. Efektívna dávka z vonkajšieho ožiarovania gama žiarením z rádioaktívneho mraku sa stanoví pomocou vzťahu:

$$E_{Ext} = T \cdot \sum_i \bar{A}_{V,i} \cdot C_{V,i}$$

kde E_{Ext} je efektívna dávka z vonkajšieho ožiarovania, T je doba expozície (h),

$\bar{A}_{V,i}$ je priemerná objemová aktivita rádionuklidu i v ovzduší a

$C_{V,i}$ je konverzný koeficient efektívnej dávky rádionuklidu i .

Konverzný koeficient predstavuje nominálnu hodnotu príkonu efektívnej dávky ($\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$) na jednotkovú objemovú aktivitu rádionuklidu ($\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$).

10. mája 2019

70

Rádionuklid	($\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1} / \text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$)				
H-3	0.0E+00	Zr-93	0.0E+00	Cs-134	3.4E-04
C-14	0.0E+00	Zr-95	1.6E-04	Cs-136	4.8E-04
Na-22	4.8E-04	Zr-97	4.1E-05	Nb-94	3.4E-04
Na-24	1.0E-03	Nb-95	1.7E-04	Cs/Ba-137	1.3E-04
P-32	0.0E+00	Mo-99	3.4E-05	Cs-138	5.2E-04
P-33	0.0E+00	Tc-99	1.1E-10	Ba-133	7.8E-05
S-35	0.0E+00	Tc-99m	2.8E-05	Ba-139	7.8E-06
Cl-36	1.8E-12	Ru-103	1.0E-04	Ba-140	4.1E-05
K-40	3.4E-05	Ru-105	1.7E-04	La-140	5.2E-04
K-42	6.3E-05	Ru/Bh-106a	4.4E-05	La-141	9.3E-06
Ca-45	3.4E-15	Pd-109	1.4E-07	La-142	6.7E-04
Sc-46	4.4E-04	Ag-108m	5.9E-04	Ce-141	1.6E-05
Ti-44	2.8E-05	Cd-109	4.8E-07	Ce-143	5.6E-05
V-48	6.3E-04	Cd-113m	0.0E+00	Ce-144	3.7E-06
Cr-51	6.7E-06	In-116m	1.9E-05	Ce/Pr-144a	1.1E-05
Mn-54	1.9E-04	Sn-113	1.8E-06	Nd-147	2.8E-05
Mn-56	4.1E-04	Sn-123	1.5E-06	Pm-145	3.5E-06
Fe-55	4.8E-09	Sn-125	6.7E-05	Pm-147	7.8E-10
Fe-59	2.6E-04	Sn-126	1.0E-05	Pm-149	2.5E-06
Co-58	2.1E-04	Sb-124	4.1E-04	Pm-151	7.0E-05
Co-60	5.6E-04	Sb-126	5.9E-04	Sm-151	1.9E-10
Ni-63	0.0E+00	Sb-127	1.4E-04	Eu-152	2.5E-04
Cu-64	4.1E-05	Sb-129	3.2E-04	Eu-154	2.7E-04
Zn-65	1.3E-04	Te-127m	6.7E-07	Eu-155	1.2E-05
Ge-68	1.9E-08	Te-129	1.1E-05	Gd-153	1.9E-05
Se-75	8.5E-05	Te-129m	7.4E-06	Tb-160	2.4E-04
Kr-85	4.8E-07	Te-131m	3.1E-04	Ho-166m	3.5E-04
Kr-85m	3.4E-05	Te-132	4.4E-05	Tm-170	1.0E-06
Kr-87	1.9E-04	Te-134	1.9E-04	Yb-169	5.9E-05
Kr-88	4.8E-04	I-125	2.3E-06	HF-181	1.1E-04
Kr-89	4.4E-04	I-129	1.8E-06	Ta-182	2.8E-04
Rb-86	2.1E-05	I-131	8.1E-05	W-187	1.0E-04
Rb-88	1.5E-04	I-132	5.2E-04	Ir-192	1.7E-04
Rb-89	4.8E-04	I-133	1.3E-04	Au-198	8.5E-05
Sr-89	3.0E-08	I-134	5.9E-04	Hg-203	4.8E-05
Sr-90	0.0E+00	I-135	3.5E-04	Tl-204	2.1E-07
Sr-91	1.5E-04	Xe-131m	1.8E-06	Pb-210	2.8E-07
Y-90	0.0E+00	Xe-133	7.4E-06	Bi-207	3.4E-04
Y-91	7.8E-07	Xe-135	6.3E-06	Bi-210	0.0E+00
		Xe-135m	9.3E-05	Po-210	1.9E-09
		Xe-137	4.1E-05		
		Xe-138	2.6E-04		

 $C_{V,i}$

Kolektívna ekvivalentná dávka

$$S_T = \sum_i \bar{H}_{T,i} \cdot N_i$$

N_i je počet jednotlivcov v populačnej skupine i , ktorí obdržali strednú ekvivalentnú dávku $H_{T,i}$

10. mája 2019

72

Kolektívna efektívna dávka S

$$S = \sum_i \bar{E}_i N_i$$

- E_i je stredná efektívna dávka pre jednotlivca z populačnej podskupiny i , ktorej zodpovedá počet členov N_i .
- Jednotkou kolektívnej efektívnej dávky je **man.Sievert (man.Sv)**.

10. mája 2019

73

Osobný dávkový ekvivalent - $H_p(d)$

- **Osobný dávkový ekvivalent - $H_p(d)$** je dávkový ekvivalent v mäkkom tkanive v určitom bode pod povrchom tela v hĺbke tkaniva d .
- Na účel osobnej dozimetrie, pre stanovenie efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarovania, ekvivalentnej dávky v každom orgáne ľudského tela s výnimkou kože a očnej šošovky zodpovedá hĺbkový osobný dávkový ekvivalent $H_p(10)$ v hĺbke tkaniva 10 mm.
- Ekvivalentnej dávke v koži zodpovedá povrchový osobný dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$ v hĺbke 0,07 mm a ekvivalentnej dávke v očnej šošovke zodpovedá osobný dávkový ekvivalent $H_p(3)$ v hĺbke 3 mm.
- Pri nerovnomernom ožiarení kože, pre ekvivalentnú dávku v koži sa berie do úvahy priemer z plochy 1 cm² v najviac ožiarenej oblasti kože.

10. mája 2019

74

Operačné (pracovné) veličiny

Používajú sa pri monitorovaní priestoru a osôb meradlami s cieľom preskúmať situácie externého ožiarovania a možnosti príjmu rádionuklidov vdýchnutím alebo požitím.

Používajú sa pri vyhodnotení dozimetrických veličín radiačnej ochrany.

Poskytujú **konzervatívne odhady** hodnôt veličín radiačnej ochrany. Boli navrhnuté a vyvinuté ICRU.

10. mája 2019

Dozimetria a radiačná

75

Pracovné (operačné) veličiny pre ožiarenie z vonkajších zdrojov

- Sú odvodené z dávkového ekvivalentu v bode fantómu alebo tela, závisia od typu a energie žiarenia v bode a preto môžu byť vypočítané na základe fluencie v bode.
- Pre monitorovanie osôb sa používa **osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$** .
- Pre monitorovanie priestoru **priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ a smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$** .

10. mája 2019

Dozimetria a radiačná

76

Osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$

$H_p(d)$ je dávkový ekvivalent v mäkkých tkanivách v hĺbke d pod stanoveným bodom tela.

Jeho jednotkou je J.kg^{-1} a nazýva sa **sievert [Sv]**.

Veličina $H_p(d)$ je meraná detektorom, ktorý sa nosí na povrchu tela a je obklopený primeranou hrúbkou materiálu tkanivu ekvivalentného.

V osobnej dozimetrii sa používa:

$H_p(10)$ - pre odhad efektívnej dávky E

$H_p(0,07)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky na kožu

$H_p(3)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky v očnej šošovke

Pri nerovnomernom ožiarení kože, pre ekvivalentnú dávku v koži sa berie do úvahy priemer z plochy 1 cm^2 v najviac ožiarenej oblasti kože.

10. mája 2019

77

Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$

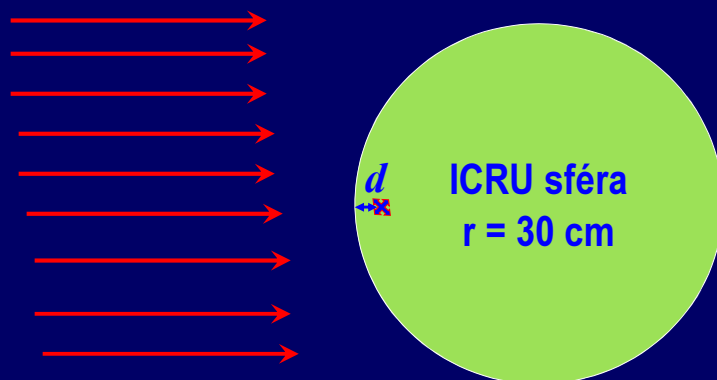
- Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ je dávkový ekvivalent v bode radiačného poľa, ktorý by bol vytvorený zodpovedajúcim **rozšíreným a usporiadaným poľom** v ICRU sfére v hĺbke d na polomere, ktorý je opačný ako smer poľa.
- Jednotkou je sievert (Sv) = J.kg^{-1} .
- Pre silno prenikavé žiarenie sa odporúča hĺbka **$d=10 \text{ mm}$** .
- Pre slabo prenikavé žiarenie sa používa pre kožu hĺbka **$0,07 \text{ mm}$** a pre očné šošovku **3 mm** .
- Hodnota $H^*(10)$ predstavuje dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm ICRU gule a slúži ako odhad ekvivalentnej dávky u osoby, vyskytujúcej sa v meranom priestore, v hĺbke 10 mm .

10. mája 2019

Dozimetria a radiačná

78

Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$



10. mája 2019

79

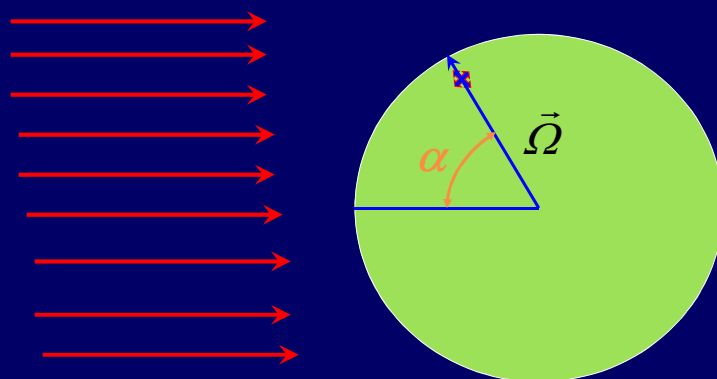
Smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$

- Pre smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$ treba špecifikovať smer Ω , teda uhol pod ktorým je meraný objekt otočený k smeru poľa ionizujúceho žiarenia.
- Smerový dávkový ekvivalent môže byť určený aj len pre **rozšírené pole**, teda bez smerového usmernenia. Vtedy treba zvoliť vhodný súradnicový systém, s ohľadom na ktorý sa bude definovať smer Ω .

10. mája 2019

80

Smerový dávkový ekvivalent $H^*(d, \Omega)$



10. mája 2019

81

ICRU sféra

● sféra s priemerom 30 cm, vyhotovená z tkanivu ekvivalentného materiálu:

- hustotou $1\text{g}\cdot\text{cm}^3$ a hmotnostným zložením
 - 76,2% kyslíka,
 - 11,1 % uhlíka,
 - 10,1% vodíka a
 - 2,6% dusíka.

10. mája 2019

82

Silno (slabo) prenikavé žiarenie

- ak dávkový ekvivalent odovzdaný malej ploche citlivej vrstvy kože je menej (viac) ako 10-násobok efektívneho dávkového ekvivalentu pre danú orientáciu tela v homogénnom a jednosmernom poli ionizujúceho žiarenia
- pre slabo prenikavé žiarenie je dôležité poznať dávkový ekvivalent v očnej šošovke alebo v koži
- za slabo prenikavé žiarenie sa považuje fotónové žiarenie s energiou do 15 keV, alfa a beta žiarenie

10. mája 2019

83

Hodnotenie vonkajšieho a vnútorného ožiarenia

- Pri osobnom monitorovaní a monitorovaní priestorov sa pre prenikavé žiarenie odporúča používať hĺbka 10 mm, pre slabo prenikavé 0,07 mm a pre oko 3 mm.
- Pri vonkajšom ožiarení ekvivalentnej dávke v každom orgáne s výnimkou kože zodpovedá hĺbkový osobný dávkový ekvivalent $H_p(10)$, ekvivalentnej dávke v koži povrchový osobný dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$.

10. mája 2019

84

Hodnotenie ožiarenia

- Ak ide o nerovnomerné ožiarenie, pre ekvivalentnú dávku v koži sa berie do úvahy priemer z plochy 1 cm^2 v najviac ožiarenej oblasti.
- Ekvivalentnej dávke v očnej šošovke zodpovedá osobný dávkový ekvivalent $H_p(3)$ v hĺbke 3 mm.
- Pri monitorovaní prostredia sa používa priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$, smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$, pričom d je hĺbka v mm pod povrchom ICRU sféry a Ω je uhol dopadu.

10. mája 2019

85

Porovnanie s limitom

Limity efektívnej dávky E sa vzťahujú na súčet efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarenia a úväzkov efektívnej dávky z jednotlivých príjmov rádioaktívnej látky v kalendárnom roku zo všetkých zdrojov ionizujúceho žiarenia, ktorým sú vystavené osoby pracujúce so zdrojmi žiarenia a jednotlivci z obyvateľstva.

10. mája 2019

86

Limity ožiarenia

Limit ožiarenia je hodnota ročnej alebo päťročnej efektívnej dávky alebo ročnej ekvivalentnej dávky, ktorá zodpovedá hornej hranici **prijateľného** rizika **stochastického** poškodenia zdravia v dôsledku ožiarenia pre jednotlivca aj spoločnosť a ktorá vyklučuje výskyt deterministických účinkov ožiarenia

Sú ustanovené pre **pracovníkov, praktikantov, študentov a obyvateľov**.

Vzťahujú sa na **súčet príslušných dávok z vonkajšieho ožiarenia počas daného obdobia a úväzkov dávok z príjmu rádionuklidov** počas toho istého obdobia, pričom pre osoby staršie ako 18 rokov veku sa uvažuje časové obdobie 50 rokov a pre osoby mladšie ako 18 rokov veku časové obdobie do dosiahnutia veku 70 rokov.

Efektívna dávka na účel osobného monitorovania pracovníkov Celková efektívna dávka, (mSv)

$$E = E_{\text{external}} + E(50) = H_p(10) + \sum_j h(g)_{j, \text{ing}} \cdot I_{j, \text{ing}} + \sum_j h(g)_{j, \text{inh}} \cdot I_{j, \text{inh}}$$

$H_p(10)$ je osobný dávkový ekvivalent v hĺbke tkaniva 10 mm,

$E(50)$ je úväzok efektívnej dávky z vnútorného ožiarenia za obdobie 50 rokov po prijme rádionuklidov

E_{external} je príslušná efektívna dávka z vonkajšieho ožiarenia,

$I_{j, \text{ing}}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) potravou za rok,

$I_{j, \text{inh}}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) dýchaním za rok,

$h(g)_{j, \text{ing}}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) potravou pre rôzne vekové skupiny g ,

$h(g)_{j, \text{inh}}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) dýchaním pre rôzne vekové skupiny g .

10. mája 2019

88

Príjem rádionuklidov potravou $I_{j,ing}$ (Bq)

$$I_{j,ing} = \sum_P a_{P,j} \cdot P_P$$

$a_{P,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j-tého rádionuklidu v potravine P a vode [Bq/kg, resp. Bq/l],

P_P je spotreba potravy P v jednom roku [kg].

- Pri stanovení príjmu rádionuklidov z vody sa používajú pre jednotlivé skupiny osôb nasledovné hodnoty ročného príjmu vody: deti do 2 rokov 0,25 m³ vody vo forme kvapaliny, deti od 2 do 17 rokov 0,45 m³ vody vo forme kvapaliny a osoby staršie ako 17 rokov 1 m³ vody, z toho 0,7 m³ vo forme kvapaliny.
- Pri stanovení ročného príjmu rádionuklidov potravou je potrebné vychádzať zo štatistických prehľadov ročnej spotreby jednotlivých potravín a to osobitne pre jednotlivé vekové kategórie.

10. mája 2019

89

Príjem rádionuklidov dýchaním $I_{j,inh}$ (Bq)

$$I_{j,inh} = a_{V,j} \cdot B$$

$a_{V,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j-tého rádionuklidu vo vzduchu [Bq.m⁻³],

B je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku [m³.rok⁻¹].

Skupina osôb	Vek v rokoch	B (m ³ .rok ⁻¹)
Pracovníci so zdrojmi ionizujúceho žiarenia	nad 18	2000
	0 – 1	1000
Jednotlivci z obyvateľstva	1 - 2	2000
	2 - 7	4000
	7 - 12	6000
	12 - 17	8000
	nad 17	8500

10. mája 2019

90

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

Tabuľka č. 4
Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing} na prepočet príjmu rádionuklidov vdychnutím (inhaláciou) aerosólov a požitím (ingesciou) na účelok efektívnej dávky pre pracovníkov

Prvok	Polčas rozpadu	Inhalácia				Ingescia	
Nuklid		typ	f _i	h _{inh} [Sv/Bq]		f _i	h _{ing} [Sv/Bq]
				d _{ama} = 1 μm	d _{ama} = 5 μm		
vodík							
H-3 (triciovaná voda)	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	1,8.10 ⁻¹¹
organicky viazané trícium	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	4,2.10 ⁻¹¹
berýlium							
Be-7	53,3 d	M	0,005	4,8.10 ⁻¹¹	4,3.10 ⁻¹¹	0,005	2,8.10 ⁻¹¹
		S	0,005	5,2.10 ⁻¹¹	4,6.10 ⁻¹¹		
Be-10	1,60 10 ⁶ r	M	0,005	9,1.10 ⁻⁹	6,7.10 ⁻⁹	0,005	1,1.10 ⁻⁹
		S	0,005	3,2.10 ⁻⁸	1,9.10 ⁻⁸		
uhlík							
C-11	0,340 h			Pozri tabuľku 7		1	2,4.10 ⁻¹¹
C-14	5,73 10 ³ r			Pozri tabuľku 7		1	5,8.10 ⁻¹⁰
fluór							
F-18	1,83 h	F	1	3,0.10 ⁻¹¹	5,4.10 ⁻¹¹	1	4,9.10 ⁻¹¹
		M	1	5,7.10 ⁻¹¹	8,9.10 ⁻¹¹		
		S	1	6,0.10 ⁻¹¹	9,3.10 ⁻¹¹		
sodík							
Na-22	2,60 r	F	1	1,3.10 ⁻⁹	2,0.10 ⁻⁹	1	3,2.10 ⁻⁹
Na-24	15,0 h	F	1	2,9.10 ⁻¹⁰	5,3.10 ⁻¹⁰	1	4,3.10 ⁻¹⁰
horčík							
Mg-28	20,9 h	F	0,5	6,4.10 ⁻¹⁰	1,1.10 ⁻⁹	0,5	2,2.10 ⁻⁹

10. mája 2019

91

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

- Konverzné faktory h_{inh} pre príjem inhaláciou sú uvedené v závislosti od typu absorpcie v pľúcach.
- Pri bližšie neidentifikovaných rádionuklidoch a chemických formách rádioaktívnych látok alebo vlastností vdychovaného aerosólu sa aktivita prisudzuje tým rádionuklidom a ich formám, prípadne takému aerosólu, pre ktorý je stanovený najvyšší konverzný faktor.

10. mája 2019

92

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

- Absorpcia v pľúcach je vyjadrená typom **F, M alebo S** charakterizujúcim v modelových výpočtoch rýchlosť, ktorou látka prechádza z pľúc do telesných tekutín (F – rýchlo, M – stredne, S – pomaly), a koeficientom f_1 charakterizujúcim frakciu, ktorá prechádza v tráviacom ústrojenstve do telesných tekutín.

10. mája 2019

93

Konverzné faktory na prepočet objemových aktivít vzácnych rádioaktívnych plynov na príkon efektívnej dávky u dospelých jednotlivcov z obyvateľstva a u pracovníkov

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d ⁻¹ /(Bq.m ⁻³)]
Ar-37	4,1.10 ⁻¹⁵
Ar-39	1,1.10 ⁻¹¹
Ar-41	5,3.10 ⁻⁹
Kr-74	4,5.10 ⁻⁹
Kr-76	1,6.10 ⁻⁹
Kr-77	3,9.10 ⁻⁹
Kr-79	9,7.10 ⁻¹⁰
Kr-81	2,1.10 ⁻¹¹
Kr-83m	2,1.10 ⁻¹³
Kr-85	2,2.10 ⁻¹¹

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d ⁻¹ /(Bq.m ⁻³)]
Kr-85m	5,9.10 ⁻¹⁰
Kr-87	3,4.10 ⁻⁹
Kr-88	8,4.10 ⁻⁹
Xe-120	1,5.10 ⁻⁹
Xe-121	7,5.10 ⁻⁹
Xe-122	1,9.10 ⁻¹⁰
Xe-123	2,4.10 ⁻⁹
Xe-125	9,3.10 ⁻¹⁰
Xe-127	9,7.10 ⁻¹⁰
Xe-129m	8,1.10 ⁻¹¹

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d ⁻¹ /(Bq.m ⁻³)]
Xe-131m	3,2.10 ⁻¹¹
Xe-133m	1,1.10 ⁻¹⁰
Xe-133	1,2.10 ⁻¹⁰
Xe-135m	1,6.10 ⁻⁹
Xe-135	9,6.10 ⁻¹⁰
Xe-138	4,7.10 ⁻⁹

10. mája 2019

94

Koeficienty efektívnej dávky pre rozpustné alebo reaktívne plyny

Nuklid/chemická forma	$t_{1/2}$	h_{inh} [Sv.Bq ⁻¹]
H-3 plyn	12,3 r	1,8.10 ⁻¹⁵
H-3 vodná para	12,3 r	1,8.10 ⁻¹¹
H-3 organicky viazané trícium	12,3 r	4,1.10 ⁻¹¹
I-120 para	1,35 h	3,0.10 ⁻¹⁰
I-120m para	0,88 h	1,8.10 ⁻¹⁰
I-121 para	2,12 h	8,6.10 ⁻¹¹
I-123 para	13,2 h	2,1.10 ⁻¹⁰
I-124 para	4,18 d	1,2.10 ⁻⁸
I-125 para	60,1 d	1,4.10 ⁻⁸
I-126 para	13,0 d	2,6.10 ⁻⁸
I-128 para	0,42 h	6,5.10 ⁻¹¹
I-129 para	1,57.10 ⁷ r	9,6.10 ⁻⁸
I-130 para	12,4 h	1,9.10 ⁻⁹
I-131 para	8,04 d	2,0.10 ⁻⁸
I-132 para	2,30 h	3,1.10 ⁻¹⁰
I-132m para	1,39 h	2,7.10 ⁻¹⁰
I-133 para	20,8 h	4,0.10 ⁻⁹
I-134 para	0,88 h	1,5.10 ⁻¹⁰
I-135 para	6,61 h	9,2.10 ⁻¹⁰

10. mája 2019

95

10. mája 2019

96

