

## 2. FYZIKÁLNE ČINITELE AKO PRÍČINY POŠKODENIA ZDRAVIA

### 2.1. ÚČINOK MECHANICKEJ ENERGIE

#### ÚRAZY A PORANENIA

Ak sa ľudské telo zrazi s iným telesom (živým alebo neživým predmetom), môže mať kinetická energia stretu za následok rôzne **úrazy (trauma)**, **rany (vulnus)** a v najhoršom prípade **náhlu smrť**.

V ekonomicky vyspelých krajinách sú úrazy najčastejšou príčinou predčasnej smrti a invalidity mladých ľudí.

V USA zapríčiňujú úrazy ročne viac ako 150 000 úmrtí. Následky nesmrteľných úrazov, ktoré vedú k trvalej invalidite, predstavujú obrovský lekársky a spoločenský problém na celom svete. Približne jedna tretina všetkých úmrtí súvisiacich s úrazmi je zapríčinená dopravnými nehodami, druhá tretina inými náhodnými príčinami (predovšetkým pádmi z výšky) a tretia tretina násilnými činmi (zabitie a samovražda).

Hlavné formy poranení sú vymenované v tabuľke 2.1. Následky poranení môžu byť veľmi rozdielne - od zanedbateľných prechodných nepríjemností až po trvalú invaliditu alebo smrť.

Tab. 2.1  
Hlavné formy poranení

Contusio	pomliaždenie
Abrasio	odrenina
Laceratio	natrhnutie
Fractura	zlomenina
Luxatio	vykĺbenie
Vulnus scissum	rezná rana
Vulnus sectum	sečná rana
Vulnus punctum	bodná rana
Vulnus morsum	hryzná rana
Vulnus sclopetarium	strelná rana

Najbežnejším príznakom poranení je **bolesť**, ktorá je zapríčinená iritáciou extero- a interoreceptorov, produktmi deštrukcie tkanív a neskôr zápalom poškodeného tkaniva.

Skoro každé poranenie vedie k **strate krvi**. Malé straty krvi neohrozujú cirkuláciu a sú rýchlo nahradené. Ak dôjde k strate veľkého množstva krvi, (10 - 30 % celkového objemu, t.j. 0.5 - 1.5 litrov u dospelých ľudí) dochádza k artériovej hypotenzii, ktorá môže vyústiť do **traumatického šoku**. (Popis hypovolemického šoku je v špeciálnej patologickej fyziológii srdcocievneho systému. V patogenéze šoku pri úrazoch okrem hypovolémie hrajú úlohu aj iné činitele, ako bolesť, účinok samotnej traumy na organizmus, psychické faktory a i.)

Do poškodených ciev sa môžu dostať vzduchové bubliny alebo častice tuku z poškodených tkanív. Tieto môžu upchať kapiláry v orgánoch vzdialených od poranenia a zapríčiniť v nich poruchu

zásobenia kyslíkom (**vzduchová a tuková embólia**). Penetrujúce rany hrudníka vedú k **pneumotoraxu** a v horšom prípade k **tamponáde srdca**.

Otvorené rany sú miestami, cez ktoré sa choroboplodné zárodky ľahko dostanú do organizmu (miesto najmenšieho odporu - **locus minoris resistentiae**). Najväznejšie nebezpečenstvo vzniká, ak rany kontaminované anaeróbnymi plynovými baktériami (spravidla z pôdy) nie sú včas správne ošetrené. Následkom môže byť rozmnoženie týchto baktérií (*Clostridium perfringens*) v poškodených tkanivách a **plynová gangréna** s následnou **sepsou**. Plynová gangréna bola častá v ére pred objavom antibiotík u vojnových poranení.

V nekrotických tkanivách okolo poranení (niekedy sú to malé, na prvý pohľad zanedbateľné rany) sa môžu rozmnožiť zárodky *Clostridium tetani*, ktoré nezapríčiňujú gangrénu a sepsu, ale produkujú **tetanotoxín**, bielkovinu s molekulovou hmotnosťou 150 kD. Tetanotoxín je jeden z najsilnejších jedovatých látok, účinkuje na nervový systém a vedie k bolestivým kontrakciám svalov. Pri neliečenom **tetane** môže smrť nastať udusením kvôli kŕčom dýchacích svalov. Očkovanie a preočkovanie, ktoré je potrebné robiť každých 5 rokov poskytuje ochranu pred tetanom. Nebezpečenstvo infekcie je mimoriadne vysoké pri pohryzení zvieratom alebo človekom a môže mať aj smrteľné následky (**besnota, AIDS**).

Každý väčší úraz spúšťa nešpecifické obranné mechanizmy organizmu (**stresová reakcia**).

Údery do hlavy často vedú ku krátkotrvajúcemu bezvedomiu aj vtedy, ak nedochádza k zlomeninám kostí lebky (**otras mozgu - commotio cerebri**). Následky sú krátkodobé, ako amnézia (poranený sa nepamätá na to, ako došlo k úrazu), nauzea a zvracanie, nystagmus, ale môže vzniknúť aj vážna neskorá komplikácia - **posttraumatická epilepsia**. Opakované malé úrazy hlavy a mozgu sú charakteristické pre päťarsky šport. Údery pravdepodobne vedú k mikroskopickým krvácaniam do mozgu a k dočasnému poklesu metabolickej aktivity neurónov a synáps. Roky po ukončení športovej kariéry sa poškodenie mozgu manifestuje poruchami koordinácie pohybov a trasom (**extrapyramídálna porucha Parkinsonského typu**) a v ťažkých prípadoch aj poklesom duševných schopností - **dementia pugilica**.

Mimoriadne závažným následkom úrazov (pády, dopravné nehody) sú **poranenia miechy** a z toho rezultujúce **obrnny**. Obrnny vznikajú aj po poškodení nervov pri úrazoch končatín.

## BLAST SYNDRÓM

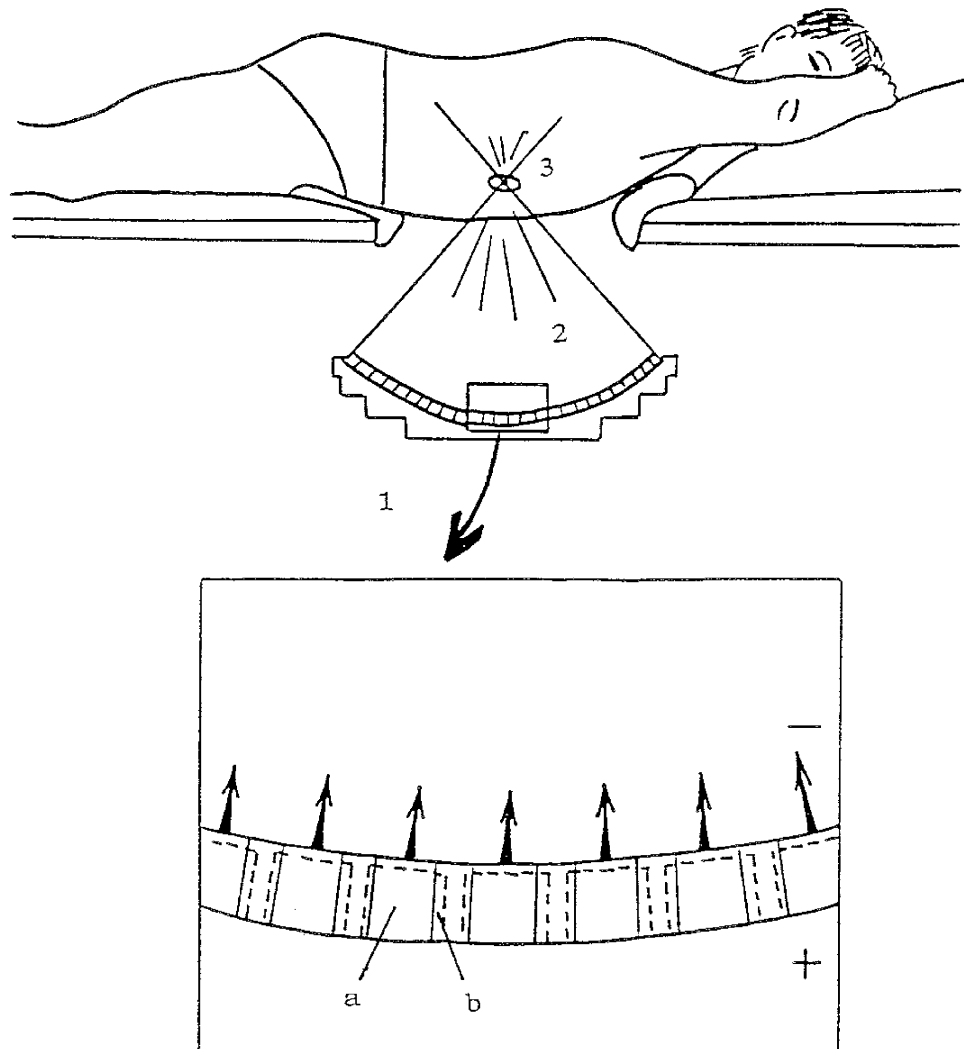
Blast syndróm je zapríčinený tlakovou vlnou explózií. Po výbuchu vzniká v krátkom slede niekoľko vln zvýšeného a zníženého tlaku, ktoré sa šíria do okolia. Tieto vlny poškodzujú bubienok a jemnú štruktúru stredného ucha, trhajú alveoly pľúc a vedú ku krvácaniu z pľúc a k vzduchovej embólii. Tlakové vlny poškodzujú aj orgány brušnej dutiny, hlavne tie, ktoré obsahujú vzduch (žalúdok a črevá).

Blast syndróm je spravidla spojený s inými poraneniami spôsobenými pádom, nárazom tela na rôzne predmety, projektilmi, letiacimi predmetmi a i.

Presne zaostrená koncentrovaná tlaková vlna, šíriaca sa v tekutine, sa používa na rozdrvenie žľzných kameňov a kameňov v močových cestách (**mimotelová litotripsia**, obr. 2.1).

## CRUSH SYNDRÓM

Crush syndróm (syndróm zo zasypania) sa vyvíja u ľudí zasypaných pod lavínami alebo pod troskami budov pri zemetraseniach a iných nešťastiach. Kompresia mäkkých tkanív vedie k zastaveniu krvného obehu v postihnutých orgánoch. Po vyslobodení postihnutých a po dekompresii stlačených končatín sa krvný obeh obnoví, ale ak kompresia trvala príliš dlho, má to za následok poškodenie endotelu. Cez poškodenú cievnu stenu dochádza k nekontrolovanému výstupu tekutín z ciev do intersticiálneho priestoru a vzniká **edém**. Vrstva tekutiny predlžuje difúziu dráhu kyslíka od kapilár k bunkám. Môže dôjsť aj k reperfúznemu poškodeniu bioreaktívnymi formami kyslíka. V krvnom riečisku dochádza k hypovolémii, zvyšuje sa hustota a viskozita krvi. Toxické produkty uvoľnené z anoxických tkanív a rôzne vazoaktívne látky (napr. histamín a prostaglandíny) ďalej zhoršujú cirkuláciu. Ak sa kompresia neuvolní včas a nezačne sa s intenzívnou protišokovou liečbou, (ktorú možno robiť už pred vyslobodením postihnutého), vzniká **hypovolemický šok** a **obličková nedostatočnosť**. Množstvo moča klesá a dochádza k rozvratu vnútorného prostredia. V tubuloch sa



Obr.2.1. Mimotelová piezoelektrická litotripsia.

- 1 - piezoelektrické keramické kryštály, ktoré účinkom elektrických impulzov menia svoj tvar
- 2 - zaostrená a koncentrovaná tlaková vlna, ktorá sa šíri v tekutom prostredí
- 3 - kameň v žlčníku

Inzert: a,b. Zmena tvaru piezoelektrických kryštálov.

Litotriptor má zabudovaný aj ultrazvukový aparát, ktorý pomáha lokalizovať kamene (nie je znázornený na schéme). Trvanie tlakových vln je niekoľko milisekúnd a sú opakované frekvenciou 1 - 1.5 Hz. Spravidla 500 - 3000 impulzov je potrebné na rozdrvenie kameňov v žlčníku a v močových cestách.

tvoria valce z uvoľneného myoglobínu. Podľa staršej teórie príčinou zlyhania obličiek pri crush syndróme malo byť upchatie tubulov týmito valcami. V skutočnosti je to naopak. Kvôli hypovolémii a zníženiu krvného tlaku klesá prietok krvi obličkami pod kritickú hodnotu a začne klesať aj glomerulárna filtrácia, čo má nakoniec za následok zlyhanie obličiek z **prerenálnych príčin**. Valce sú len sprievodným príznakom a nie príčinou zlyhania obličiek pri crush syndróme. Crush syndróm môže viesť k smrti v **urémii** aj bez vážnejších vonkajších zranení a straty krvi.

### VIBRÁCIA, HLUK A ULTRAZVUK

Ľudia, vystavení po dlhú dobu vibráciám, (väčšinu ide o profesionálnu expozíciu) sa často sťažujú na bolesti chrbta a končatín. RTG vyšetrenie ukáže ťažkú osteoporózu. Okrem toho je spravidla porušená regulácia tonusu malých ciev prstov ruky, vznikajú vazospazmy. Porucha lokálnej cirkulácie vedie k zvýšenej citlivosti prstov na chlad a neskôr k trofickým zmenám kože a svalov prstov. Príznaky sa podobajú na Raynaudov syndróm, čo je v primárnej forme vrodená porucha vazomotorického tonusu. Chronické vibrácie môžu poškodiť vnútorné ucho a pravdepodobne prispievajú k vzniku neuróz a vysokého krvného tlaku.

Vibrácie v rozsahu frekvencií 16 Hz - 20 kHz sú ľudským uchom vnímané ako zvuky. Silný alebo dlhodobý hluk (hluk je každý zvuk pocívaný ako rušivý - väčšinou sú to zvuky o intenzite viac ako 50 dB<sup>1</sup>) vedie k poruche sluchu a porušuje aktivitu vegetatívneho a centrálného nervového systému.

Ultrazvuk tvoria vysokofrekvenčné mechanické kmity o frekvencii viac ako 18 kHz, ktoré nie sú počuteľné ľudským uchom. Intenzita ultrazvuku používaná v diagnostike nemá na ľudský organizmus škodlivé účinky a nepoškodzuje ani plod vyvíjajúci sa v maternici. Intenzita ultrazvuku aplikovaného pri fyzikálnej terapii, kde sa využíva práve tepelný efekt absorbovanej energie, je už vyššia (diatermia). Ešte vyššie intenzity pôsobia na ľudský organizmus škodlivo, a to mechanicky a termicky. Absorbovaná energia sa mení na teplo a chvenie poškodzuje štruktúry buniek a tkanív. Zvláštnym úkazom sú **kavitácie** - mikroskopické dutiny v bunkách, ktoré vznikajú v závislosti od frekvencie kmitov a rezonancie biologického materiálu. Tieto dutiny poškodzujú subcelulárne štruktúry. Pri ešte vyšších energiách môže dôjsť k rozpadu molekúl a k vzniku bioreaktívnych foriem kyslíka - následky sú podobné ako pri absorpcii ionizujúceho žiarenia.

U ľudí, ktorí dlho pracujú v prostredí s vysokou intenzitou ultrazvuku, sa objavujú podobné príznaky, ako pri expozícii hlukom alebo vibráciami.

## 2.2. ÚČINKY ZRÝCHLENIA A GRAVITÁCIE NA ĽUDSKÝ ORGANIZMUS

### AKCELERÁCIA A DECELERÁCIA<sup>2</sup>

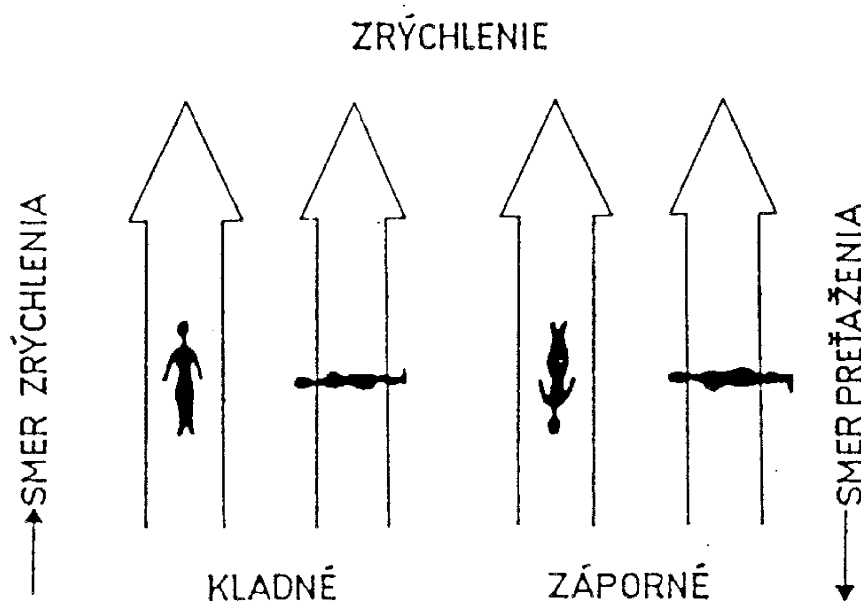
Akcelerácia alebo zrýchlenie je **zmena rýchlosti alebo smeru pohybu** (obr. 2.2). Pohyb pri stálej rýchlosti a bez zmeny smeru nemá žiadne účinky na telo a bez vizuálnej kontroly nie je ho možné vnímať. Pri zmene smeru alebo rýchlosti sa telo správa podľa zákona o zotrvačnosti - má tendenciu pohybovať sa v pôvodnom smere pôvodnou rýchlosťou. Práve na tom princípe sa zakladá činnosť vestibulárneho orgánu vnútorného ucha - pri zmene pohybu tela prúdi endolymfa zotrvačnosťou v pôvodnom smere a podráždi nervové zakončenia vestibulárneho aparátu.

Zmeny rýchlosti môžu byť rôzneho charakteru a rôznej intenzity. Intenzita zrýchlenia sa môže udávať ako  $m \cdot s^{-2}$ , ale často sa udáva v jednotkách gravitačného zrýchlenia ( $1 G = 9.81 m \cdot s^{-2}$ ; obr. 2.2).

Účinky zrýchlenia a spomalenia je možné najlepšie pochopiť na základe príkladov z bežného života:

<sup>1</sup> Závislosť medzi fyzikálnou energiou akustických vibrácií a ich vnímaním ako zvuku alebo hluku je logaritmická. Prah citlivosti pre určitý zvuk je 0 dB a fyzikálna energia zvuku o intenzite 10 dB je 100-krát väčšia. Energetická hodnota 0 dB prahu závisí od frekvencie zvuku, jej minimum je medzi 2 - 3 kHz.

<sup>2</sup> spomalenie (decelerácia) a negatívne zrýchlenie sú totožné



Obr.2.2. Schématické znázornenie smeru zrýchlenia a preťaženia.

### 1. Zrýchlenie a spomalenie v dopravných prostriedkoch.

Pretekárske auto dosiahne niekoľko sekúnd po štarte rýchlosť okolo 200 km/h. Pre šoféra to znamená silné pozitívne zrýchlenie v predozadnom smere (je zatlačený do sedadla), ale tento typ zrýchlenia znáša organizmus pomerne dobre.

Pred zatáčkami je potrebné brzdiť, vzniká negatívne zrýchlenie (spomalenie) a váha šoférovho tela sa prenáša na bezpečnostné pásy. V samotných zatáčkach sú dve možnosti. Ak je dráha plochá, zrýchlenie je **bočné** (auto chce pokračovať v pôvodnom smere a môže dôjsť ku šmyku). Niektoré veľmi rýchle pretekárske dráhy majú klopené zatáčky, ktoré umožňujú prechod zatáčkami veľkou rýchlosťou. V tomto prípade smeruje výsledný silový vektor nadol - kolmo na naklonenú trať, čo má na cestujúcich taký istý efekt ako pozitívne zrýchlenie smerom nahor. Ich telá sú zatlačené do sedadla smerom nadol - ako by ich hmotnosť narástla na viacnásobok, ale nehrozí šmyk smerom von z dráhy.

Najhorší typ spomalenia sa vyskytuje pri haváriách (obr. 2.3a), keď za zlomok sekundy dôjde k extrémnym, väčšinou negatívnym zrýchleniam. Správna konštrukcia karosérie (nie len pretekárskych) dopravných prostriedkov, bezpečnostné pásy, vzduchové vankúše a iné nové bezpečnostné prvky sú schopné absorbovať veľkú časť kinetickej energie nárazu pri havárii a zabrániť ťažkým poraneniám a smrti cestujúcich.

**2. Zrýchlenie a spomalenie vo výťahu** (obr. 2.3b). Vo výťahu, ktorý sa pohne smerom nahor, na krátku dobu vzniká pozitívne zrýchlenie (cestujúci cítia svoju váhu vyššiu ako normálne). Potom necítia nič zvláštne - rýchlosť výťahu je stála. Pred príchodom na horné poschodie výťah spomaľuje, čo vedie k negatívnemu zrýchleniu - cestujúci sú nadľahčení. Cestou nadol sa tieto udalosti opakujú v opačnom slede. Najprv je nadľahčenie tela v momente, ak sa výťah pohne smerom nadol, potom je preťaženie pri brzdení na prízemí. Z príkladu výťahu je možné pochopiť vzťah medzi smerom zrýchlenia a silami, ktoré pri zrýchlení vznikajú. Ak sa zrýchlenie deje smerom nahor, sila pôsobí opačne - zhora nadol. Ak sa výťah zrýchľuje smerom nadol, sila opäť pôsobí opačne a nadľahčuje telá cestujúcich. Pri negatívnom zrýchlení (spomalení) je všetko zdanlivo naopak. V skutočnosti sily pôsobia vždy opačne, ako je **zmena** rýchlosti alebo smeru pohybu.



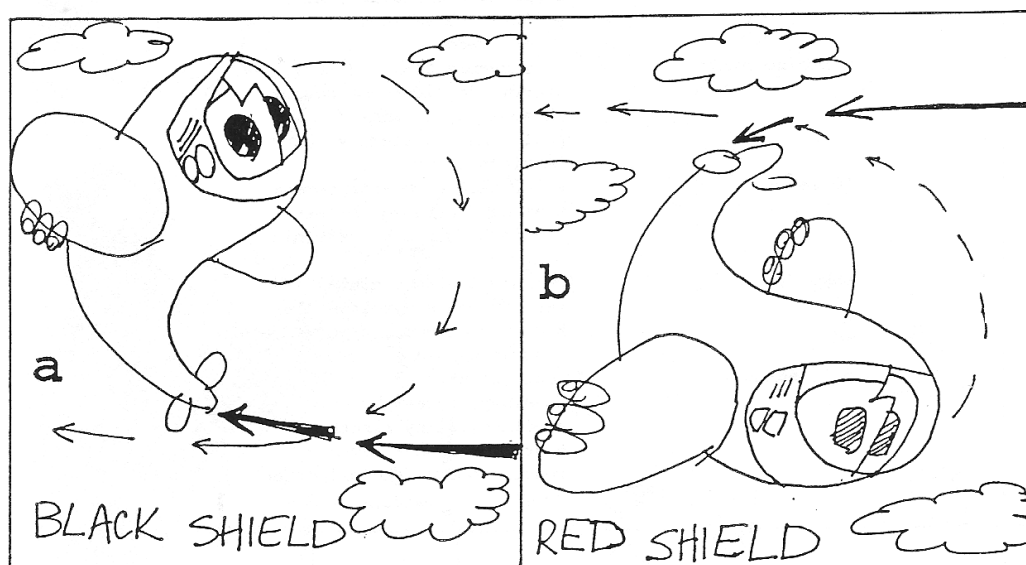
Obr.2.3. Akcelerácia a decelerácia.

### 3. Zrýchlenia v letectve a astronautike (obr. 2.4).

Ak lietadlo robí premet (looping) smerom nahor (obr. 2.4a), ide o zrýchlenie smerom nahor a krv sa zotrvačnosťou hromadí v dolných častiach tela. Ak sily zrýchlenia prekonajú adaptačné schopnosti cirkulácie, dôjde k nedokrveniu mozgu a zároveň aj cievnatky oka, čo sa prejaví najprv poruchou videnia - tzv. **čierna clona** a potom môže dôjsť aj k strate vedomia. Podobné sily účinkujú na telo kozmonautov po štarte rakety.

Ak pilot lietadla začína premet smerom nadol (looping dopredu; obr. 2.4b), krv sa hromadí v hlave a hyperémia očného pozadia vedie k poruche videnia, ktorá sa nazýva **červená clona**. Ide o zrýchlenie smerom nadol a sily pri takom zrýchlení sa znášajú horšie ako pri zrýchlení smerom nahor (tab. 2.2).

Špeciálne sedadlá a obleky konštruované pre pilotov vojenského letectva a pre kozmonautov znižujú nebezpečné účinky náhlych zmien rýchlosti.



Obr.2.4. Čierna a červená clona pri premetoch lietadlom.

**4. Uhlové zrýchlenie.** Ak sa nejaké teleso otáča okolo vlastnej osi stálou rýchlosťou (napr. rotor centrifúgy alebo telo krasokorčuliara pri piruete, obr. 2.5) vzniká zrýchlenie zmenou smeru pohybu a sila zodpovedajúca takému zrýchleniu sa volá centrifugálna sila. Účinkom tejto sily dochádza k sedimentácii častíc v centrifúge a taká istá sila umožňuje hod kladivom na veľkú vzdialenosť v porovnaní s obyčajným vrhom guľou. Krasokorčuliar pri piruete potrebuje vynaložiť silu na to, aby horné končatiny pritiahol k svojmu telu.

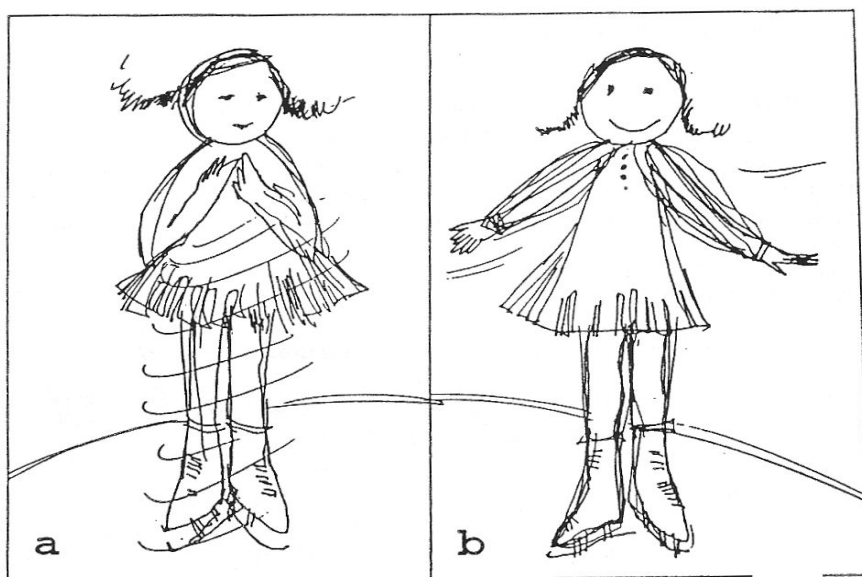
### ÚČINKY GRAVITÁCIE A BEZVÁHOVÉHO STAVU NA ĽUDSKÝ ORGANIZMUS

Naše telo (podobne ako všetky predmety) je priťahované k Zemi **gravitačnou silou**, ktorá sa rovná zrýchleniu  $9.77 - 9.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (obr. 2.6).

Gravitačná sila má ten istý účinok na telo ako sily vznikajúce pri zrýchlení a spomalení. (Podľa Einsteinovej teórie relativity obidva typy síl sú rovnocenné. Preto je možné zrýchlenie vyjadriť aj v jednotkách G). V bežných polohách tela (stoj, sed, ľah) si túto silu neuvedomujeme a regulačné mechanizmy kardiovaskulárneho systému zabezpečujú adekvátnu dodávku krvi do každého orgánu, napriek tomu, že krv v tele má tendenciu klesať smerom nadol, do dolných končatín. Gravitačná sila sa nemení ani vtedy, ak sa postavíme na hlavu, ale táto poloha je vnímaná ako negatívne zrýchlenie o intenzite  $-1 \text{ G}$ , t.j. ako zrýchlenie smerom nadol o  $19.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (zmena oproti bežne pocítovanej sile je totiž  $2 \text{ G}$ ) a krv sa hromadí v hlave. Na iných planétach môže byť gravitačná sila väčšia ako na Zemi, ale na Mesiaci je len jedna šestina zemskej príťažlivosti.

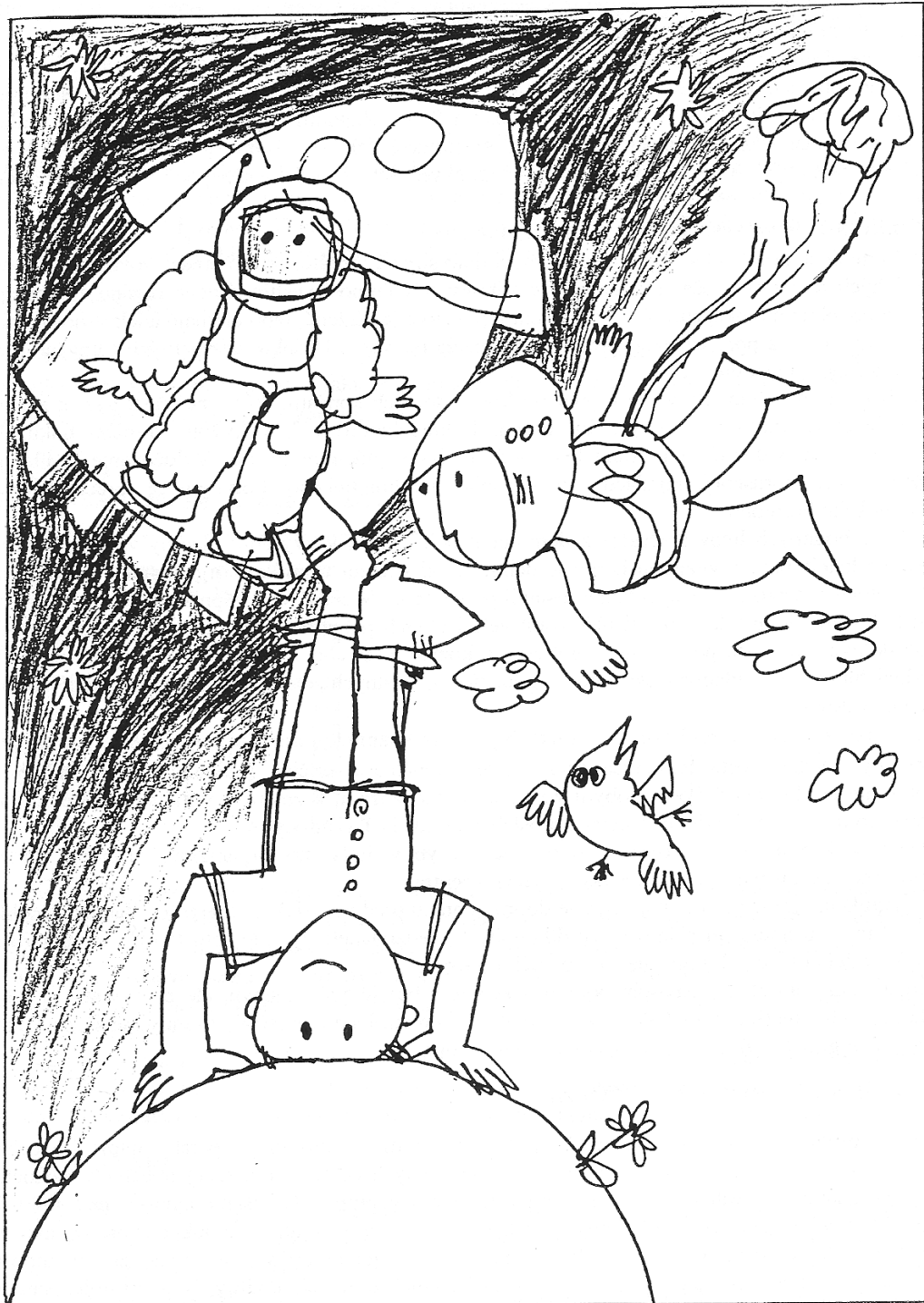
Tab. 2.2  
Vplyv preťaženia na ľudský organizmus

Zrýchlenie G	Tolerancia zrýchlenia	Efekt
+2 +2.5	desiatky minút niekoľko minút	oťaženie končatín, pocit pripútania k sedadlu náhle oťaženie tela, vstať zo sedu je takmer nemožné, sťaženie dýchania
+3 +4	sekundy sekundy	bledosť tváre, zahmlenie pred očami strata periférneho videnia "čierna clona", tachykardia inspiračná dýchavica, kŕče v lýtkových svaloch strata vedomia
-1	niekoľko minút	pocitovanie tlaku remeňov, ktorými je človek pripútaný /k sedadlu, k padáku/
-1.5		pocit ľahkého tlaku v rôznych častiach hlavy
-2	10 sekúnd	silný tlak v oblasti temena, tlak na diafragmu, bolesť v očiach, slzotok, krútenie hlavy
-2.5	sekundy	pulzujúci tlak v hlave, sťa- žené dýchanie vyvolané tla- kom na diafragmu, začervenanie zrkového poľa
-4	do 1 sekundy	pocit silného prílivu krvi do hlavy, rezavá bolesť v očiach, silný slzotok, "červená clona", porucha funkcií mozgu /ako pri otrase mozgu/



Obr.2.5. Uhlové zrýchlenie.





Obr.2.6. Gravitácia a bezváhový stav.

**Bezváhový stav** vzniká vtedy, ak je gravitačná sila vyrovnaná zrýchlením. Najjednoduchším príkladom bezváhového stavu je voľný pád (napríklad pád parašutistu pred otvorením padáka). Dlhotrvalý bezváhový stav sa vyskytuje v astronautike. Ak sa kozmická loď pohybuje bez zapnutia motorov, jej zrýchlenie sa rovná gravitačnej sile a vo vnútri lode vzniká bezváhový stav. Môže to byť na orbitálnej dráhe okolo Zeme, keď uhlové zrýchlenie je rovnaké ako gravitačná sila Zeme, alebo pri lete medzi planétami. V druhom prípade je zrýchlenie lode dané práve vektorovým súhrnom gravitačných síl všetkých okolitých väčších planét a Slnka. Zapnutím motorov alebo rotáciou veľkej orbitálnej stanice okolo vlastnej osi (zatiaľ existujúcej len vo forme projektu NASA a vo vedecko-fantastických filmoch) vzniká pri kozmických letoch zrýchlenie pociťované ako umelá gravitácia.

#### Účinky pobytu vo vesmíre na ľudský organizmus<sup>1</sup>

Po štarte dochádza k silnému zrýchleniu, hoci tieto sily sú menšie, ako to predstavovali prví autori fantastických románov. Počas letu naruší bezváhový stav činnosť vestibulárneho orgánu a vznikajú príznaky podobné morskej chorobe. Orientácia v priestore je sťažená, lebo chýbajú adekvátne signály z vnútorného ucha a porušená je aj presná koordinácia pohybov. U dobre trébovaných zdravých ľudí sú tieto ťažkosti prechodné.

Chýbanie gravitačnej sily vedie k presunu krvi z dolných končatín do hornej časti tela, k zmene frekvencie srdca (najprv k tachykardii, potom k bradykardii) a k výkyvom krvného tlaku. Je zaujímavé, že k podobnému presunu krvi nedochádza v pľúcnom obehu. Vylučovanie sodíka je zvýšené kvôli porušenej regulácii vylučovania antidiuretického hormónu a predsieňového nátriuretického hormónu.

Počas dlhodobých letov dochádza k demineralizácii kostí a k zvýšeniu hladiny vápnika v krvi. Podávanie kalcitonínu a vitamínu D nie je účinné proti stratám vápnika z organizmu. Našťastie pri dlhých letoch sa tento proces spontánne zastavil po strate 20 % celkového vápnika, ale straty vápnika môžu byť limitujúcim faktorom pri plánovaní veľmi dlhých pobytov v kozme. Atrofia posturálnych svalov dolných končatín počas dlhých pobytov v kozme (viac ako 1 rok) môže dosiahnuť až 40 % pôvodnej hmoty. Pravidelným cvičením a použitím špeciálnych odevov je možné zabrániť ťažším zmenám svalov a kostry.

Zaujímavým nálezom pri kozmických letoch je vznik **kozmickej anémie**, zapríčinennej potlačením krvotvorby. Dĺžka života červených krviniek je normálna a príčina inhibície syntézy mladých krviniek nie je objasnená. Počas pobytu vo vesmíre dochádza aj k zmenám imúnneho systému - je znížená proliferatívna aktivita lymfocytov a oslabená funkcia T-lymfocytov.

Pobyt v kozme desynchronizuje normálne biorytmy ľudského organizmu. "Deň" a "noc" kozmonautov sú časované z pozemného riadiaceho centra.

Konštrukcia vesmírnych lodí poskytuje dobrú ochranu pred kozmickým žiarením. Závaž by mohla prekročiť únosnú mieru pri plánovaných dlhodobých medziplanetárnych letoch. Práca v skafandroch mimo kozmickej lode je limitovaná z toho istého dôvodu.

Organizmus sa dobre prispôsobí pobytu v kozme a bezváhovému stavu, ale po návrate na Zem vznikajú prechodné (kardiovaskulárne a posturálne) ťažkosti, lebo regulačné systémy nie sú zvyknuté na normálnu gravitačnú silu. Tieto ťažkosti sú prechodné.

#### MORSKÁ CHOROBA (KINETÓZA)

Krátke prudké zmeny rýchlosti v rôznych smeroch iritujú otolitový aparát vnútorného ucha. Chaotické signály z utrikula sú prenesené do vegetatívnych centier predĺženej miechy a mozočka spolu so signálmi zo svalových vretienok a šlachových receptorov. Narušenie činností motorických centier blúdivého nervu a vestibulárnych jadier je príčinou príznakov morskej choroby, ako je bledosť, nevoľnosť, nauzea, zvýšené slinenie, zvracanie, zmeny frekvencie srdca, zmeny tonusu svalov, poruchy koordinácie pohybov a iné. Sklon ku kinetóze je individuálny. Niektorí ľudia nemajú ťažkosti ani pri plavbe na rozbúrenom mori, iní sú ťažko chorí pri každej ceste loďou, autom alebo lietadlom. Pomalé a hlboké dýchanie a vizuálna kontrola pohybu občas pomáha prekonať príznaky kinetózy.

<sup>1</sup> Údaje tejto časti boli poskytnuté láskavosťou prof. Ivana a prof. Evy Ahlersovcov, Prírodovedecká fakulta UPJŠ Košice.

## 2.3. ÚČINKY NÍZKEHO A VYSOKÉHO ATMOSFERICKÉHO TLAKU NA ĽUDSKÝ ORGANIZMUS

Atmosferický tlak na povrchu Zeme je 101.3 kPa (760 torr alebo Hgmm alebo 1 ATA). Malé fluktuácie atmosferického tlaku (3 až 4 kPa) sa vyskytujú v súvislosti so zmenami počasia. Tieto výkyvy majú určitý vplyv na fyziologické funkcie a zdravotný stav človeka, ale tieto nie je možné chápať ako priame fyzikálne účinky. Štúdiom meteorologických a klimatických podmienok na ľudský organizmus sa zaoberá **bioklimatológia** a **meteoropatológia**.

### HYPOBÁRIA

Atmosferický tlak klesá pri výstupe do výšky (tab. 2.3) a nad 3 km sa môže objaviť **horská choroba**. Hlavným etiologickým faktorom horskej choroby je nedostatok kyslíka. (Všetky formy a následky **hypoxie** sú opísané v kapitole 5.)

**Tab. 2.3**  
**Nadmorská výška a tlak vzduchu**

NADMORSKÁ VÝŠKA km	TLAK VZDUCHU	
	kPa	torr
0	101.3	760
0.5	95.4	716
1	89.4	671
2	78.9	592
3	69.6	522
4	61.5	461
5	54.3	407
8	35.6	267
10	26.4	198

Hypobária môže ohroziť organizmus okrem nedostatku kyslíka aj poškodením dutých orgánov rozpínaním plynov, ktoré sú v nich uzavreté. Počas letu vo väčších výškach bez pretlakovej kabíny sa objavujú napríklad bolesti stredného ucha a prínosových dutín, ak ich komunikácia s okolím je blokováná. Plynové bubliny v kariéznych alebo zle ošetrených zuboch môžu zapríčiniť ich akútne bolesti. Plyn v tráviacom trakte pri expanzii podráždi receptory v črevnej stene a môžu zapríčiniť kŕče i zvýšenú peristaltiku.

Hranica života z hľadiska hypobárie je tlak 6.25 kPa, čo zodpovedá výške približne 20 km. Pri tomto tlaku voda vri už pri 37 °C, a vzhľadom na to, že telesné tekutiny sú vodné roztoky, smrť nastáva behom niekoľkých sekúnd pre difúzne poškodenie buniek a subcelulárnych častíc.

### HYPERBÁRIA

Zvýšený atmosferický tlak nepoškodzuje organizmus, ale fyzická práca za týchto okolností je veľmi vyčerpávajúca. Trénovaní zdraví ľudia sú schopní žiť a pracovať v prostredí, kde je tlak pomerne vysoký. Pomocou ľahkého potápačského výstroja sa neodporúča ponárať hlbšie ako 40 m, hranica pre špeciálne potápačské odevy je 440 m. Ľudský život je však možný aj pri tlaku 5000 kPa (50 atmosfér), čo zodpovedá hĺbke 500 metrov pod vodou. Najväčšia hĺbka dosiahnutá veľrybami je 2440 m, ale život existuje aj v 11 kilometrovej hĺbke Mariánskej priekopy.

Dusík od parciálneho tlaku 400 kPa má narkotické účinky na nervový systém, a preto za týchto okolností sa na dýchanie používa zmes kyslíka a hélia. V hélionej atmosfére dochádza k skresleniu ľudského hlasu - frekvencia sa posúva k vyšším hodnotám a ľudská reč je nezrozumiteľná.

Umelá hyperbária s **hyperoxiou** sa používa v liečbe otravy oxidom uhoľnatým a pri iných situáciách, keď je potrebné zvyšovať koncentráciu fyzikálne rozpusteného kyslíka v krvi.

## CHOROBA Z DEKOMPRESIE (KESONOVÁ CHOROBA)

Pri ponáraní sa do vody tlak rastie o 101 kPa na každých 10.3 metrov hĺbky. Rozpustnosť plynov v tekutinách závisí od tlaku, a preto pri hyperbárii sa v krvi, v telesných tekutinách a v cytosóle buniek rozpustí väčšie množstvo kyslíka a dusíka ako pri normálnom tlaku. Ide o fyzikálny fenomén a množstvo kyslíka viazaného na hemoglobín sa nemení.

Ak dôjde k náhlemu poklesu zvýšeného tlaku, plyny sa uvoľňujú vo forme bublínok, ktoré poškodzujú bunky a upchávajú malé kapiláry (**plynová embólia**) a zhoršujú perfúziu orgánov. Poškodenie je vyvolané viac dusíkom ako kyslíkom, lebo dusík sa dobre rozpúšťa v tukovom tkanive a jeho difúzia a eliminácia z organizmu je pomalá.

Hlavné príznaky dekompresnej choroby:

- ♦ bolesti kĺbov a periartikulárnej oblasti;
- ♦ svrbenie kože a parestézie (bublíny v podkoží a v koži);
- ♦ škvrny na koži, ktoré pripomínajú cyanózu;
- ♦ tachypnoe, substernálna bolesť, suchý kašeľ (embolizácia do pľúcnych kapilár a následná pulmonárna hypertenzia);
- ♦ príznaky poškodenia CNS, v najzávažnejších prípadoch delírium a strata vedomia (embolizácia do mozgových kapilár a vazospasmy v mozgu).

U potápačov, ktorí opakovane nedodržia pravidlá dekompresie, môže dôjsť po dlhšom čase k difúznemu poškodeniu mozgu.

Prevenia choroby je jednoduchá - pomalá dekompresia ponecháva dost času na to, aby uvoľnené plyny nevytvárali bubliny. Prvá pomoc je založená na tom istom princípe: rekompresia v tlakovej komore a potom pomalá dekompresia.

Podobný pochod sa odohráva v tom prípade, ak k dekompresii dôjde vo veľkej výške - napr. pri porušení celistvosti pretlakovej kabíny lietadla. Tlak klesá veľmi rýchlo (vo výške 10 km je hodnota atmosferického tlaku 27 kPa) a vzniká **explozívna dekompresia** so vzduchovou embóliou, distenziou a prasknutím dutých orgánov kombinovaná s **akútnou hypoxiou**.

## 2.4. ÚČINKY TEPLA A CHLADU NA ORGANIZMUS

Ideálna teplota pre funkciu enzýmov je 37 °C. Pri vyšších teplotách sa rýchlosť enzýmovej katalýzy teoreticky zvyšuje, ale zároveň dochádza k denaturácii bielkovinovej štruktúry a k rýchlej inaktivácii enzýmov (výnimku tvoria enzýmy termofilných baktérií, ktoré žijú v horúcich prameňoch a gejzíroch, napr. v Yellowstonskom parku, USA). Pri teplote okolo 50 °C dochádza ku koagulácii cytosólu buniek. Nízke teploty (nad 0 °C) nepoškodzujú štruktúru bielkovín, ale pri nízkych teplotách rýchlosť enzýmovej katalýzy klesá alebo sa úplne zastavuje. Pri teplotách pod 0 °C (a hlavne počas nasledujúceho topenia) sú subcelulárne štruktúry poškodené kryštálkami ľadu.

Následky pôsobenia vysokej alebo nízkej teploty delíme podľa toho, či ide o **lokálne** alebo **celkové** pôsobenie abnormálnej teploty. Lokálny účinok veľmi vysokej alebo nízkej teploty vedie k **popáleninám (combustio)** resp. k **omrzlinám (congelatio)**. Vysoká alebo nízka celková teplota okolia môže viesť k zlyhaniu termoregulácie s následnou zmenou teploty ľudského tela (**hypotermia a hypertermia**).

Telesná teplota sa mení aj pri **horúčke**, ale v tomto prípade zmena teploty nie je zapríčinená vonkajšími výkyvmi teploty, ale preladením nastavenej hodnoty telesnej teploty v termoregulačnom centre.

### POPÁLENINY

Miestny účinok teploty nad 50 °C vedie ku vzniku popáleninového úrazu. Jeho následky závisia od stupňa a rozsahu poškodenej telesnej plochy (tab. 2.4 - 2.6). Malé popáleniny spôsobujú bolesť, leukocytózu a prechodné zvýšenie telesnej teploty. Väčšie popáleniny spúšťajú nešpecifickú obrannú reakciu organizmu. Cez obnažený povrch sa do tela môžu dostať patogénne mikroorganizmy,

a pretože súčasne je oslabená aj imunita, ľahšie vzniká infekcia, ktorá môže vyústiť až do **sepsy**. Pri väčších popáleninách hrozí vznik **popáleninového šoku**, čo je špeciálna forma **hypovolemického šoku**. Koža a podkožné kapiláry sú poškodené, čo má za následok nekontrolovanú stratu extracelulárnej tekutiny. Dochádza k uvoľneniu vazoaktívnych a toxických látok. V minulosti sa predpokladala existencia špecifických popáleninových toxínov, ale v skutočnosti sú to len rôzne nešpecifické rozpadové produkty bielkovín. Vazoaktívne látky a popáleninové toxíny účinkujú na krvný obeh a na cievy aj na miestach vzdialených od popáleniny.

Strata tekutiny a jej translokácia z ciev do extravazálneho priestoru znižuje objem plazmy a zvyšuje hematokrit a viskozitu krvi. Ak sa stratené tekutiny nenahradia v dostatočnej miere a včas, môže dôjsť k zlyhaniu obličiek z prerenálnej príčiny alebo k smrti v šoku.

**Tab. 2.4**  
**Obarenie horúcou vodou**

Teplota vody, °C	Čas potrebný k poškodeniu tkanív
49 >	5 min.
53	1 min.
56	15 sek.
60	5 sek.
65	2 sek.
69	1 sek.

**Tab. 2.5**  
**Vlastosti a rozdelenie popálenín**

**PRVÝ STUPEŇ - COMBUSTIO ERYTHEMATOSA**

Poškodenie pokožky (epidermis). Nekróza keratinocytov, vazodilatácia v koži, červená a bolestivá pokožka  
Hojí sa bez následkov

**DRUHÝ STUPEŇ - COMBUSTIO VESICULOSA**

a/ povrchový (epidermálny) - postihuje len pokožku  
b/ hlboký (dermálny) - postihnuté sú aj ostatné vrstvy kože  
Nekróza buniek epidermis (a) a dermis (b). Intra- a extracelulárny edém, subepidermálne pluzgiere a perivaskulárne lymfocytové a neutrofilné infiltrácie  
Spravidla sa hojí bez jaziev, ale môže zanechať hyperpigmentáciu

**TRETÍ STUPEŇ - COMBUSTIO ESCHAROTICA**

a/ dermálny - postihuje len kožu  
b/ subdermálny - postihuje aj podkožné tkanivá (svaly, kosti a i.)  
Zničenie kože a kožých adnex, nekróza a poškodenie subepidermálnych štruktúr, pluzgiere, chrasty, edém a zápalový infiltrát  
Hojí sa jazvami. Transplantácia kože a plastické operácie sú potrebné na prevenciu vzniku deformujúcich hyperplastických jaziev

**ŠTVRTÝ STUPEŇ - CARBONISATIO**

Úplné zničenie, zuhoľnatenie tkanív

**POVRCHOVÉ POPÁLENINY - PRVÝ STUPEŇ A PORCHOVÝ DRUHÝ STUPEŇ**

**HĽBOKÉ POPÁLENINY - HĽBOKÝ DRUHÝ STUPEŇ A ŤAŽŠIE**

**Tab. 2.6**  
**Klasifikácia popálenín podľa závažnosti a rozsahu**

KLINICKÉ HODNOTENIE	% TBSA <sup>1</sup>	
	CELKOVO	HLBOKÉ
1 - MALÁ POPÁLENINA <sup>2</sup>	< 20 <sup>4</sup>	0
2 - STREDNE ŤAŽKÁ	20 - 25	< 10
3 - ŤAŽKÁ	25 - 40	10 - 20
4 - KRITICKÁ <sup>3</sup>	> 40	> 20

<sup>1</sup> Percento celkovej plochy tela (Total body surface area)

<sup>2</sup> Len vtedy, ak nie je prítomná popálenina tváre, rúk, nôh a perinea

<sup>3</sup> U detí vo veku pod 3 roky a u starých ľudí nad 60 rokov každá popálenina musí byť považovaná za "kritickú". To isté platí, ak sú popáleniny kombinované s intoxikáciou dymom, úrazom alebo inými priťažujúcimi podmienkami

<sup>4</sup> U detí vo veku nad 3 roky sú hodnoty nižšie o 5 - 10 %

Metabolická odpoveď na ťažké popáleniny spočíva vo zvýšení bazálneho metabolizmu a v prevahe katabolických procesov. Okrem toho je často prítomná hyperdynamická cirkulácia, mierna hemolýza a oslabenie imúnnych funkcií. Mierne zvýšená teplota prostredia (32 °C) a tlmenie bolesti znižujú hypermetabolický stav, ktorý bez liečby trvá niekoľko týždňov.

Mortalita pri popáleninách závisí od mnohých činiteľov. Najdôležitejšie sú:

- ♦ **rozsah popálenej plochy** tela (vyjadrená v percentách ako % TBSA - total body surface area)
- ♦ **vek postihnutých** (malé deti a starí ľudia majú vyššiu mortalitu)
- ♦ **celkový zdravotný stav** postihnutých
- ♦ **komplikácie**, ako napr. infekcia, mechanický úraz, inhalácia dymu a i.

**Inhalácia dymu** je častou a veľmi dôležitou komplikáciou pri popáleninách. Môže viesť k akútnej otrave oxidom uhoľnatým alebo kyanidmi (ktoré vznikajú pri horení niektorých umelých látok), k podráždeniu a obštrukcii horných dýchacích ciest, pľúcnemu edému a k zápalu pľúc s následnou fibrózou.

Poškodenie pľúc pri popáleninách nemusí byť len priame. Pri rozsiahlych poraneniach (polytrauma, popáleniny) môže nastať **viacorgánové zlyhanie** (MOF - multiple organ failure), pri ktorom majú rozhodujúcu úlohu pľúca a obličky, ale sú postihnuté aj iné orgány, ako pečeň, gastrointestinálny trakt a srdce. V pľúcach dochádza k aktivácii neutrofilov a alveolárnych makrofágov, ktoré poškodzujú pľúcne tkanivo. Zvyšuje sa permeabilita kapilár s následným hromadením tekutiny v pľúcach až pľúcny edémom. Klinicky sa poškodenie pľúc javí ako **respiračný distresový syndróm dospelých** (ARDS - adult respiratory distress syndrome).

V posledných 40 rokoch došlo k obrovskému pokroku v liečbe popálenín. Dnes aj postihnutí s 70 - 90 % TBSA majú reálne výhliadky na prežitie, kým predtým popáleniny s 33 - 50 % TBSA boli väčšinou smrteľné. Tento pokrok bol dosiahnutý zavedením intenzívnych a včasných protišokových opatrení (náhrada stratených tekutín a elektrolytov, tlmenie bolesti), včasným odstránením poškodených tkanív a pokrytím obnažených častí umelou alebo prirodzenou náhradou kože (auto- a alotransplantácia) i účinnou cieľenou antimikrobiálnou farmakoterapiou.

## OMRZLINY

V závislosti od teploty a trvania účinku nízkej teploty koža je najprv bledá (vazokonstrikcia) a bolestivá, neskôr cyanotická (vazodilatácia). Bolesť ustupuje a vznikajú parestézie alebo úplná necitlivosť kože. V ťažších prípadoch sa objavujú pľuzgierie, edém kože a nekróza s následnou mokrou gangrénou. Poškodenie nízkou teplotou sa vyvíja rýchlejšie a pri relatívne vyšších teplotách v prípade, ak cirkulácia postihnutej časti tela bola poškodená už skôr iným patologickým procesom.

## OBRANA ORGANIZMU PRI VYSOKEJ TEPLOTE OKOLIA

Ľudský organizmus má štyri možnosti na odvádzanie nadbytočného tepla produkovaného samotným telom alebo absorbovaného z okolia:

1. **Radiácia tepla** je fyzikálny jav. Každé teleso vyžaruje energiu v závislosti od svojej absolútnej teploty. Týmto spôsobom je možné odovzdať teplo len smerom od teplejších telies k studenejším.

2. **Kondukcia** je priame odovzdanie tepla z teplejších predmetov studeným. Studená sprcha, plávanie v studenej vode, zmrzlina alebo studené nápoje ochladzujú telo týmto spôsobom.

3. Vietor alebo prúd vzduchu z ventilátora ochladzuje **konvekciou**.

4. Posledná, ale najdôležitejšia cesta odovzdania tepla je spojená s potením a odparením vody z povrchu tepla. **Evaporácia** každého gramu vody, ktorý sa dostane na povrch tela spotrebuje 2.4 kJ energie. Ak okolitá teplota je vyššia ako teplota tela, to je jediná množnosť odovzdania tepla.

V teplom a suchom prostredí (napr. v saune, na pracoviskách s vysokou teplotou) sa zvýši prekrvenie kože a vylučovanie potu. Stála teplota tela sa udržiava pomocou odparenia vypotenej vody. Táto forma tepelnej záťaže sa dobre toleruje, kým je zabezpečená náhrada stratenej tekutiny a elektrolytov. Pot je v porovnaní s plazmou hypotonický roztok, ale silné potenie môže viesť k značnej strate solí, ak je nahradené len čistou vodou. Pre činnosť svalov a srdca je zvlášť nebezpečná hrozba **hypokalémie**. Bez náhrady tekutín dôjde k **dehydratácii** a hypovolémii, viskozita krvi rastie, krvný tlak klesá. Neskôr začína stúpať aj telesná teplota, dochádza k **hypertermii**.

### TEPELNÝ ÚPAL - SIRIASIS

V teplom a vlhkom prostredí, alebo ak odparenie potu je sťažené pre nevhodné oblečenie, je zablokovaný aj tento posledný spôsob termoregulácie. Teplota tela začína rásť, zvyšuje sa frekvencia srdca a dýchania a klesá krvný tlak. Keď jadrová teplota tela dosiahne 40 °C objaví sa únava, bolesť hlavy, hučanie v ušiach, neskôr zvracanie a svalové kŕče. Pri 43 °C dôjde k strate vedomia, k zlyhaniu cirkulácie a smrti.

### SLNEČNÝ ÚPAL - INSOLATIO

V prípade, keď tepelná záťaž (spravidla ide o slnečné lúče) je koncentrovaná na nekrytú, zvlášť na plešivú hlavu, objavujú sa podobné príznaky, ako pri hypertermii. V popredí príznakov sú bolesti hlavy, nauzea a zvracanie. Nie je prítomná dehydratácia a celková porucha termoregulácie (aj keď telesná teplota je spravidla zvýšená). Príznaky sú pravdepodobne zapríčinené lokálnym prehriatím CNS, meningeálnou a mozgovou vazodilatáciou s následnou hyperémiou. Zvlášť náchylní na úpal sú malé deti a starí ľudia.

### HYPOTERMIA

Telesná teplota **poikilotermných** zvierat kolíše v závislosti od vonkajšej teploty, kým **homoiotermné** živé bytosti udržiavajú jadrovú teplotu svojho tela v úzkom rozmedzí. Niektoré cicavce (**hibernanty**) v zime prežívajú v dormantnom stave, pri ktorom sú telesná teplota, metabolizmus, frekvencia srdca a dýchanie znížené na minimum. **Hypotermia u ľudí** je patologický stav, ktorý vzniká pri poklese jadrovej teploty tela pod 35 °C.

V studenom prostredí sa zníži prekrvenie kože a dochádza k **piloerekcii** (husia koža). Koža a piloerekciami imobilizovaná vrstva kože účinkujú ako tepelná izolácia. Človek v procese filogenézy stratil hustú sršť, a preto je nútený nosiť šaty ako prídavnú tepelnú izoláciu. Druhá možnosť ochrany pred zimou je zvýšenie produkcie tepla cielenou **svalovou prácou** alebo **triaškou**. **Tukové tkanivo** má pri ochrane pred podchladením dve rôzne úlohy: je dobrým izolátorom a dodáva energiu pre svalovú prácu. Hnedé tukové tkanivo produkuje teplo rozpojením oxidatívnej fosforylácie v mitochondriách tukových buniek v procese **netriaškovej temogenézy**. Rozpojenie je zabezpečené mitochondriálnou bielkovinou **termogenínom** (32 kDa dimér) a riadené noradrenalínom.

**Schopnosť adaptácie na zimu** závisí od veku, zdravotného stavu a iných podmienok:

**Ľudia žijúci v oblastiach so studeným podnebíom** (Eskimáci) majú lepšie vyvinuté mechanizmy adaptácie na zimu ako ľudia žijúci v tropických oblastiach sveta. Individuálna adaptácia na zimu sa docieľa otužovaním tela.

**Novorodenci** majú určité množstvo hnedého tukového tkaniva. Ide o bezpečnostný mechanizmus proti hypotermii v prvých dňoch života, keď ostatné mechanizmy termoregulácie ešte nie sú úplne vyvinuté. Napriek tomu pri nedostatočnej opatere v prvých hodinách po narodení môže telesná

teplota novorodencov rýchlo klesá na veľmi nízke hodnoty. Ešte viac sú ohrození nedonosení novorodenci, novorodenci s intrakraniálnou pôrodnou traumou a s vrodenou nedostatočnosťou štítnej žľazy. Na druhej strane novorodenci lepšie tolerujú následky hypotermie ako dospelí. Hypotermia a instabilita telesnej teploty je jedným z príznakov **Menkesovho syndrómu**.

Termoregulácia a adaptabilita na zimu je zhoršená v **starobe**. Súvisí to so stareckými zmenami kože a s poklesom intenzity metabolizmu u starých ľudí.

**Obézni ľudia a jedinci so silnými svalmi** lepšie znášajú zimu ako chudí. Majú viac tuku a sú schopní vytvoriť väčšie množstvo tepla svalovou prácou ako chudí, podvyživení a slabí ľudia.

**Chorí ľudia** s nedostatočnosťou krvného obehu (napr. pri šoku), zníženou činnosťou štítnej žľazy, Addisonovou chorobou a encefalitídou sú zvlášť náchylní na hypotermiu (katabolizmus tukov je riadený hormónmi štítnej žľazy, katecholamínmi a glukokortikoidmi).

Priečne pružované svaly sú schopné vytvárať teplo len dovtedy, kým sa neunavia. **Vyčerpanie** (napr. u slabo trénovaných a málo aklimatizovaných horolezcov, u neskúsených turistov v horách) vedie k veľmi rýchlemu nástupu hypotermie.

**Alkohol** a niektoré lieky účinkujúce na nervový systém inhibujú činnosť termoregulačného centra. Alkohol navyše rozširuje cievy (čím sa zníži izolačná funkcia kože) a dodáva falošný pocit tepla. Na základe týchto účinkov alkoholu je možné ľahko pochopiť, prečo opití ľudia umierajú na hypotermiu aj pri nie príliš nízkych teplotách okolia.

Ak sa z hocijakého dôvodu prekročia medze adaptability termoregulačného systému, začína klesať jadrová teplota tela. Pri jadrovej teplote 33 °C je postihnutý spravidla spavý (stuporózný) a dochádza k rigidite svalov. Klesá frekvencia srdca a dýchania. Pri 30 °C sa triaška zastaví a pri 27 °C svaly sú ochabnuté a stráca sa vedomie. Pri tejto teplote je veľké nebezpečie náhlej smrti kvôli fibrilácii srdcových komôr. Pri ešte nižších teplotách smrť nastáva kvôli zastaveniu obehu a dýchania, hoci individuálne prípady prežitia boli popísané aj v prípadoch, keď jadrová teplota bola len 18 °C.

U novorodencov sa hypotermia prejavuje zrýchleným dýchaním (pri veľmi nízkej teplote zastavením dýchania), acidózou, hypoglykémiou a diseminovanou intravaskulárnou koaguláciou.

**Imerzné podchladenie** je špeciálny prípad hypotermie, ktorý vzniká v studenej vode. Koža sa rýchlo schladí na teplotu okolitej vody a dĺžka prežívania závisí od hrúbky podkožného tuku. Z toho dôvodu ženy lepšie znášajú imerzné podchladenie ako muži. Svalová práca (plávanie) v studenej vode paradoxne zvyšuje straty tepla - z lepšie prekrvených svalov sa stráca viac tepla. Smrť podchladením a celkovým vyčerpaním v studenej vode nastáva za niekoľko hodín.

Studené počasie zvyšuje pravdepodobnosť vírusových a baktériových infekcií dýchacích ciest. Znížené prekrvenie slizníc horných dýchacích ciest pravdepodobne znižuje ich obrannú funkciu a hoci zlé počasie nie je skutočným etiologickým činiteľom týchto chorôb, len ich spúšťačom, výraz "**choroby z prechladnutia**" (angl. "**common cold**") sa bežne používa na ich popis dodnes.

Hypotermia znižuje metabolizmus a tým nároky na dodávku kyslíka do tkanív. Počas kontrolovanej hypotermie alebo **umelej hibernácie** môže byť krvné zásobenie mozgu prerušené na dlhšiu dobu ako pri normálnej teplote. Táto technika sa v nedávnej minulosti využívala v kardiovaskulárnej chirurgii, ale dnes je už nahradená modernými prístrojmi, zabezpečujúcimi umelú cirkuláciu.

## 2.5. ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PRÚDU NA ĽUDSKÉ TELO

Účinok elektrického prúdu na ľudské telo závisí od rôznych faktorov, ako:

- ♦ **intenzita a napätie prúdu;**
- ♦ **trvanie jeho účinku;**
- ♦ **typ prúdu (striedavý alebo jednosmerný),**
- ♦ **frekvencia, ak ide o striedavý prúd;**
- ♦ **odpor tela;**
- ♦ **dráha prúdu v ľudskom tele.**



Základným pravidlom je, že prúd o intenzite 0.1 A a viac, o napätí 50 V a viac a o trvaní dlhšom ako 1 sekunda ohrozuje život. Striedavý prúd je nebezpečnejší ako jednosmerný a najnebezpečnejšie frekvencie sú medzi 30 - 150 Hz.

Suchá ľudská koža je dobrý izolátor, ale vlhkosť znižuje jej odpor. Ohmov zákon<sup>1</sup> platí aj v tomto prípade, a preto najnebezpečnejšie sú úrazy elektrickým prúdom v kúpeľni, kde sa prúd dostane do tela cez mokrá pokožku.

Vo vnútri tela sleduje prúd dráhu, ktorá zodpovedá najmenšiemu odporu. Telové tekutiny, svaly a nervy sú najlepšie vodiče prúdu, lebo obsahujú vysokú koncentráciu iónov. Je samozrejmé, že najväčšie nebezpečie vzniká v prípadoch, keď dráha prúdu kríži srdce alebo CNS.

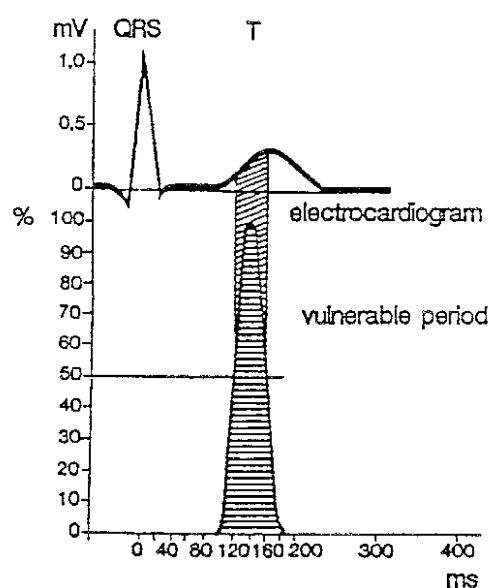
Elektrický prúd depolarizuje membrány buniek. To je základná príčina **svalových kŕčov, zastavenia dýchania, straty vedomia, amnézie a fibrilácie srdca**. K fibrilácii komôr srdca dochádza vtedy, ak elektrický impulz skríži srdce vo **vulnerabilnej fáze**, t.j. počas T vlny (obr. 2.7). Fibrilácia komôr je najväčším následkom úrazu elektrickým prúdom, lebo znamená zastavenie srdca a bez okamžitej resuscitácie vedie k smrti.

V bunke spôsobuje elektrický prúd presun iónov a porušenie funkcie intracelulárnych orgánov.

Energia elektrického prúdu sa pri prechode telom mení na teplo, čo zapríčiňuje popáleniny. Produkcia tepla závisí od odporu tkaniva a z toho dôvodu sa popáleniny objavujú predovšetkým na miestach, kde prúd vstupuje do tela a vystupuje z neho. Teplo koaguluje cytosól buniek a poškodením cievnej steny vedie k trombózam. Úraz vysokým napätím alebo bleskom má skoro vždy za následok ťažké popáleniny tretieho stupňa.

Účinok elektrického prúdu na centrálny nervový systém sa využíva v liečbe niektorých psychických ochorení (**elektrošoková liečba**). Elektrošok spočíva v aplikácii striedavého prúdu o intenzite niekoľko sto mA transverzálne cez lebku. Dochádza ku krátkodobej strate vedomia a ku kŕčom, ale po návrate vedomia príznaky choroby ustupujú.

Elektrický prúd môže zapríčiniť fibriláciu srdca, ale na druhej strane zastavenie srdca môže byť úspešne liečené krátkymi impulzmi jednosmerného prúdu pri **defibrilácii**. Energia impulzov pre dospelých je medzi 200 - 360 Joule. Rovnaký princíp sa využíva v liečbe predsieňovej fibrilácie, ale v tomto prípade (**kardioverzia**) sú impulzy presne časované, aby nezastihli komory vo vulnerabilnej fáze. Udávače kroku srdca (**pacemakery**) vydávajú slabé elektrické impulzy, ktoré nahrádzajú chýbajúcu činnosť vodivého systému vlastného srdca.



Obr.2.7. Vulnerabilná fáza.

<sup>1</sup> Ohmov zákon:  $I = U/R$ . Čím vyššie je napätie, tým vyššia je intenzita. Čím nižší je odpor, tým vyššia je intenzita.

## 2.6. ÚČINKY ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA NA ĽUDSKÝ ORGANIZMUS

Medzi dvoma elektricky nabitými predmetmi opačného náboja vzniká elektrické silové pole a medzi dvoma pólmi magnetu magnetické pole. Fluktuácie intenzity magnetického alebo elektrického poľa vedú ku vzniku elektromagnetických vln. Elektromagnetické vlny sú charakterizované frekvenciou fluktuácií a intenzitou elektromagnetického poľa. Elektromagnetické vlny sa šíria rýchlosťou svetla, ktorá je vo vákuu  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a táto hodnota delená frekvenciou (počet vln za jednu sekundu) udáva vlnovú dĺžku žiarenia (tab. 2.7). Podľa teórie kvantovej fyziky sú elektromagnetické vlny zároveň častice - fotóny. Energia žiarenia je priamo závislá od jeho frekvencie.

Rozsah frekvencií elektromagnetických vln je extrémne široký. Striedavý elektrický prúd (50 Hz) vytvára vlny dlhé 6000 km. Vlny, ktoré sa využívajú vo vysielaní rozhlasu a v televízii sa začínajú v kilometrovej oblasti (kHz) a končia okolo niekoľkých centimetrov (stovky MHz). Človek a zvieratá vnímajú žiarenie o vlnovej dĺžke medzi 760 nm a 380 nm ako svetlo rôznej farby. Zelené rastliny využívajú energiu svetelných vln slnka na syntézu organického materiálu z vody a oxidu uhličitého v procese fotosyntézy. Umelo generované vlny v RTG prístrojoch, gama lúče vyžarované z rádioaktívnych látok a prichádzajúce z kozmu, majú vlnovú dĺžku menšiu ako 1 nanometer a frekvencie medzi  $10^{16}$  -  $10^{24}$  Hz. Energia týchto častíc je pomerne veľká a ohrozuje zdravie živých bytostí.

Tab. 2.7.  
Elektromagnetické vlny

ZDROJ	FREKVENCIA*	VLNOVÁ DĹŽKA
Striedavý elektrický prúd	16 - 50 Hz	18000 km - 6000 km
Rozhlas a TV		
dlhé	150 - 300 kHz	2 km - 1 km
stredné	500 - 2000 kHz	600 m - 150 m
krátke	6 - 20 MHz	50 m - 15 m
FM rozhlas	66 - 108 MHz	5 m - 3 m
TV pásma	49 - 12500 MHz	6 m - 24 mm
Mikrovlny a radar	0.3 - 1000 GHz	1 m - 300 mm
Svetlo		
infračervené	$10^{12}$ - $3.9 \cdot 10^{14}$ Hz	300 m - 760 nm
viditeľné	$3.9 \cdot 10^{14}$ - $7.8 \cdot 10^{14}$ Hz	760 nm - 380 nm
ultrafialové	$7.8 \cdot 10^{14}$ - $3.0 \cdot 10^{16}$ Hz	380 nm - 10 nm
X, gamma a kozmické žiarenie	$> 3 \cdot 10^{16}$ Hz	$< 10$ nm

\* Energia žiarenia je priamo závislá od jej frekvencie podľa vzorca  $E = hn$ , kde "n" je frekvencia žiarenia a "h" je Planckova konštanta:

$$h = 6.623 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Fotón rádiového signálu o frekvencii 100 MHz má energiu  $6.62 \cdot 10^{-26}$  J; fotón červeného svetla o vlnovej dĺžke 760 nm má energiu  $2.6 \cdot 10^{-19}$  J a fotón RTG žiarenia (vlnová dĺžka 10 nm) má energiu  $2 \cdot 10^{-17}$  J.

Na ohriatie 1 g vody o 1°C je potrebné 4.2 J, t.j.  $1.6 \cdot 10^{19}$  fotónov červeného svetla alebo  $2.1 \cdot 10^{17}$  fotónov RTG žiarenia.

Elektromagnetické žiarenie, ktoré pochádza z prirodzených a umelých zdrojov, obklopuje každý predmet a každú živú bytosť na Zemi. Ak uvažujeme o biologických a prípadných škodlivých účinkoch elektromagnetických vln, nesmieme zabudnúť na základné (zástancami nevedeckých teórií často zabudnuté) pravidlo, ktoré je veľmi jednoduché: **Len absorbované žiarenie môže mať účinok.**

### RÁDIOVÉ FREKVENCIE

Ľudské telo je relatívne transparentné pre tieto vlny. Absorbovaná časť radiácie má tepelný účinok, ktorý sa využíva vo fyzioterapii na liečbu bolestivých afekcií svalov a kĺbov (**krátkovlnná diatermia** - používajú sa frekvencie 40.68, 27.12 a 13.56 MHz).

V histórii medicíny boli magnetickým poľami a neviditeľnému elektromagnetickému žiareniu opakovane pripisované mystické liečivé alebo škodlivé účinky (napr. patologické "geomagnetické zóny") a tieto nepotvrdené účinky boli a dodnes sú zneužívané šarlatánmi. Seriózny vedecký výskum tejto oblasti sa začal len nedávno a výsledky ešte nie sú jednoznačné.

Ľudia, žijúci v blízkosti rozhlasových a televíznych vysielačov, radarových staníc a pracujúci v blízkosti takýchto zdrojov žiarenia, sa často sťažujú na rôzne nešpecifické príznaky (bolesti hlavy, psychická únava, atď.). Výsledky niektorých štúdií nevylučujú, že silné elektromagnetické polia môžu mať vplyv na sekréciu hormónov v ľudskom organizme a na metabolizmus vápnika v bunke. Študuje sa aj prípadný účinok elektromagnetického poľa na malígnu proliferáciu buniek.

### MIKROVLNY A INFRAČERVENÉ VLNY

Každé teplé teleso vyžaruje infračervené žiarenie.

Chronická expozícia infračervenej radiácie môže viesť k zákalu očnej šošovky (**katarakta fúkačov skla**).

V poslednom čase sa značne rozšírili mikrovlnné prístroje v domácnostiach, ktoré vyžarujú o niečo dlhšie vlny ako sú infračervené. Biologické štruktúry absorbujú tento typ radiácie, čo je základ ich termálneho účinku. Nebezpečie vzniká z toho, že značná časť tejto radiácie prejde kožou a je absorbovaná v hlbších štruktúrach, ktoré nemajú termoreceptory. Môže tak dôjsť k prehriatiu a poškodeniu tkanív bez poplachových signálov z receptorov.

### VIDITEĽNÉ SVETLO

Oko je optický prístroj, ktorý premieta svetlo vonkajšieho sveta na retinu. Viditeľné svetlo vysokej intenzity (slnko pozorované ďalekohľadom bez filtra, svetlo laserov a nukleárnych výbuchov) môže zapríčiniť ireverzibilné poškodenie retiny (**slepé škvrny**). Na druhej strane liečba laserovými lúčmi v oftalmológii zachraňuje zrak mnohých chorých s diabetickou retinopatiou, glaukómom alebo trhlinami retiny.

### ULTRAFIALOVÉ SVETLO

Ultrafialové (UV) pásmo je rozdelené do troch oblastí:

- \* **UV-C : 100 - 280 nm**
- \* **UV-B : 280 - 315 nm**
- \* **UV-A : 315 - 380 nm**

Táto forma žiarenia pochádza zo slnka, je pre ľudské oko neviditeľná, ale je dobre absorbovaná v biologických štruktúrach. Energia UV-C vln je taká vysoká, že je schopná rozbiť kovalentné chemické väzby a poškodí aj nukleové kyseliny, bielkoviny a iné biologické makromolekuly. Kyslík pohlcuje vlny kratšie ako 240 nm a ozónová vrstva ionosféry vlny kratšie ako 290 nm. Vodná para a prach v atmosfére filtrujú značnú časť tých UV lúčov, ktoré prejdú do nižších vrstiev atmosféry. To, čo sa dostane z UV-A a UV-B lúčov na povrch Zeme, stačí na premenu provitamínu na vitamín D v koži a na mierne podráždenie kože, čím sa aktivuje tvorba melanínu a vzniká zdravo opálená farba kože v lete.

Príliš dlhý pobyt na slnku (citlivosť je individuálna a závisí od farby kože) vedie k poškodeniu kože, ktoré sa začína bolestivým erytémom (trvá 8 - 24 hodín), potom môže dôjsť k vzniku pľuzgierov (sú to povrchové popáleniny druhého stupňa). Pre hojenie procesu je charakteristické silné olupovanie a svrbenie kože. Postupné zvyšovanie dávok UV lúčov umožňuje adaptáciu kože na

žiarenie a nedochádza k takýmto problémom. Pobyt vo vode nezabráni opáleniu, lebo voda chladí kožu, ale prepúšťa UV lúče. Koža vystavená dlhoročnému nadmernému účinku slnečných lúčov (napr. u ľudí pracujúcich v poľnohospodárstve a u tých, ktorí prehánajú pobyt na slnku) predčasne starne, dochádza k jej degenerácii a k častejšiemu výskytu rakoviny kože. UV a slnečné lúče sú okrem toho dôležitým (ale nie jediným) činiteľom zvrhnutia pigmentových névov na malígnu melanóm.

Tieto nebezpečia sa zvýraznili v uplynulých rokoch kvôli poklesu hrúbky ozónovej vrstvy ionosféry. Na povrch Zeme (hlavne v blízkosti pólův, na jar a v lete a okolo poludnia) sa dostane viac krátkovlnného UV žiarenia ako predtým. Ľudia a zvieratá vystavení slnečnému žiareniu sú ohrození zvýšeným výskytom rakoviny kože a melanómu a sivého zákalu očnej šošovky. Prvé správy o slepých zvieratách z Austrálie potvrdzujú pravdivosť nepriaznivých prognóz. Ak sa deplécia ozónovej vrstvy nezastaví, v budúcnosti možno predpokladať aj iné následky, ako napr. poruchy obranného systému a zvýšený počet mutácií v genóme rastlín, zvierat a človeka.

## 2.7. VPLYV IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA NA ORGANIZMUS

Ľudský organizmus môže byť zasiahnutý ionizujúcim žiarením z dvoch zdrojov:

- ♦ **vnútorná kontaminácia**, ožiarenie emitované inkorporovanými radionuklidmi buď prostredníctvom potravinových reťazcov, vdychovaním (napr. pri fajčení) alebo pri iatrogénnom zásahu (izotóповé vyšetrenie), kontaminácia štiepnymi produktami zo skúšok jadrových zbraní alebo z havárií jadrových zariadení,
- ♦ **vonkajšie ožiarenie** pochádza z vonkajších zdrojov najmä kozmické žiarenie, terestriálne žiarenie, povrchová kontaminácia radionuklidmi, lekárska aplikácia (rtg vyšetrenie, terapeutické ožarovanie a pod.), práca s uzatvorenými žiaričmi (rtg pracovníci, defektoskopia, nukleárne zariadenia, skúšky jadrových zbraní) a pod.

### VELIČINY POUŽÍVANÉ V RÁDIOBIOLOGII

Radioaktívne prvky emitujú radioaktívne žiarenie, dochádza pritom k samovoľnej premene atómov radioaktívneho prvku na atómy iného prvku. Radioaktívnu premenu môžeme vyjadriť exponenciálnou rovnicou:

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

$N_t$  = počet nerozpadnutých radioaktívnych atómov za čas  $t$

$N_0$  = východiskový počet radioaktívnych atómov v čase  $t_0$

$e$  = základ prirodzených logaritmov

$\lambda$  = rozpadová konštanta.

**Fyzikálny polčas rozpadu** ( $T_f$ ) je doba, za ktorú sa rozpadne polovica východiskového počtu radioaktívnych atómov  $N_0$ .

$$T_f = \ln 2 / \lambda$$

**Biologický polčas** ( $T_b$ ) je doba, za ktorú sa vylúči polovica radioaktívnej látky vpravenej do organizmu.

Pri hodnotení biologických pokusov, ako aj reálnych prípadov vnútornej kontaminácie, je často počítaný tzv. **efektívny polčas** ( $T_{ef}$ ), ktorý zohľadňuje nielen fyzikálny polčas daného radionuklidu, ale aj jeho biologický polčas:

$$T_{ef} = T_f \cdot T_b / T_f + T_b$$

**Aktivita radioaktívnej látky** ( $A$ ) je podiel stredného počtu radioaktívnych premien  $dN$  a časového intervalu  $dt$ , v ktorom k týmto premenám v danom množstve radionuklidu došlo:

$$A = dN/dt$$

Jednotkou aktivity radioaktívnej látky je **1 Bequerel (Bq)**, pôvodná jednotka bola 1 Curie (Ci).

1 Bq = jedna radioaktívna premena za sekundu

1 Bq = 27,027 pCi; 1 Ci = 37 GBq

Ďalšie odvodené jednotky sú **hmotnostná** alebo **merná aktivita**  $a_m$  (Bq/kg), **objemová aktivita**  $a_v$  (Bq/m<sup>3</sup>), **molárna aktivita**  $a_n$  (Bq/mol), **plošná aktivita**  $a_s$  (Bq/m<sup>2</sup>), **lineárna aktivita**  $a_l$  (Bq/m), **rýchlosť emisie** alebo **emanácia aktivity** (Bq/s), rýchlosť plošnej emisie aktivity (Bq/s.m<sup>2</sup>).

Špeciálnou oblasťou radiobiológie je **dozimetria**, ktorá sa zaoberá stanovením a meraním množstva energie odovzdanej žiarením ožarovanému objektu. Keď sa zistilo, že biologický účinok je priamo úmerný absorbovanej energii žiarenia, stala sa absorbovaná dávka ako špecifická hustota absorbovanej energie základnou dozimetrickou veličinou. Analýzou sa zistilo, že rovnaká dávka rôznych typov žiarenia (napr. protóny, žiarenie gama) spôsobuje rozdielny efekt. Tento fakt súvisí okrem iného s rozdielmi v hodnotách lineárneho prenosu energie (**LPE**) nabitých častíc, tj. množstva energie častice skutočne odovzdanej absorbátoru po dráhe častice.

Radiobiologické štúdie ukázali, že biologické efekty na molekulovej a submolekulovej úrovni nie je možné vysvetliť ani na základe koncepcie LPE. Diskrétny charakter interakcie žiarenia s látkou má za následok, že niektoré veličiny môžu byť definované len na základe matematickej štatistiky. Rozlišujeme preto dva typy radiobiologických veličín, a to stochastické (náhodné) a nestochastické (nenáhodné):

#### Stochastické veličiny:

- ♦ Sú definované len pre konečné objemy. Sú nespojité v priestore a čase a nie je možné hovoriť o rýchlosti ich zmeny.
- ♦ Pravdepodobnosť určitej hodnoty tejto veličiny je určená distribúciou pravdepodobnosti.
- ♦ Principiálne môžu byť hodnoty takejto veličiny merané s ľubovoľne malou chybou.

#### Nestochastické veličiny

- ♦ Vo všeobecnosti sú spojitémi a diferencovateľnými funkciami v priestore, čase, je možné definovať rýchlosť ich zmeny.
- ♦ Za daných podmienok môžu byť ich hodnoty vypočítané.
- ♦ Môžu byť odhadnuté ako stredné hodnoty nameraných (výberových) hodnôt stochastických veličín.

Dôležité sú najmä dve stochastické veličiny: **odovzdaná energia** (*energy imparted*) a **špecifická energia** (*specific energy*). Na základe uvedených charakteristík stochastických a nestochastických veličín je možné k uvedeným stochastickým veličinám priradiť nestochastické veličiny - strednú odovzdanú energiu  $E$ , strednú špecifickú energiu  $Z$ . Tieto nestochastické veličiny umožňujú definovať **dávku D**. Hlavnou jednotkou dávky je **1 Gy (Gray)** = 1 J/kg, staršia jednotka bola rad. 1 Gy = 100 rad.

**Expozícia** je definovaná:

$$X = dQ/dm$$

kde dQ je absolútna hodnota celkového elektrického náboja všetkých iónov jedného znamienka vzniknutých vo vzduchu pri zabrzdení všetkých elektrónov uvoľnených fotónmi v objemovom elemente vzduchu dm. Jednotkou expozície je **Coulomb (C)** na kilogram. Staršia jednotka je röntgen (R):

$$1 \text{ C/kg} = 3,876 \text{ kR} \quad 1 \text{ R} = 0,258 \text{ mC/kg}$$

**Expozičná rýchlosť** alebo **expozičný príkon** sa udáva v A/kg.

**Jednotky energie** sú joule a eV:

$$1 \text{ eV} = 0,16021892 \text{ aJ}; \quad 1 \text{ J} = 6,2415 \text{ EeV}$$

$$(\text{aJ} = \text{attojoule, tj. } 10^{-18} \text{ J EeV} = 10^{18} \text{ eV})$$

Vzhľadom na to, že v radiobiológii sa začali intenzívne skúmať biologické účinky aj iných typov žiarenia, najmä vysokoenergetických elektrónov (betatróny) a neutrónov (terapia a diagnostika nádorov), bolo potrebné z hľadiska možnosti porovnania biologických účinkov rôznych typov žiarenia nájsť veličinu, ktorá by umožnila nájsť priamy vzťah medzi množstvom energie absorbovaného žiarenia v biologickom objekte (dávka) a jeho biologickým účinkom. Nájdenie vzťahu medzi biologickým účinkom a množstvom energie žiarenia absorbovaného v danom biologickom systéme viedlo k zavedeniu veličiny **relatívnej biologickej účinnosti (RBÚ)**. Hodnota RBÚ závisí nielen od radu fyzikálnych faktorov (dávkovej rýchlosti, ožarovacích podmienok, typu zdroja, časového faktora a pod.), ale aj na komplexe biologických faktorov, takže voľba odozvy na

daný podnet je veľmi problematická. Z uvedeného dôvodu je vysvetliteľné, prečo sa nepodarilo zatiaľ nájsť vhodný biologický dozimeter, ktorý by bol nezávislý od typu žiarenia a meraného biologického javu (odozvy). Rôzne biologické javy vyžadujú pre svoj vznik rôznu stupeň lineárnej ionizácie (či excitácie) atómov a molekúl prostredia, čo zodpovedá vzťahu veličiny LPE a dávky. V súčasnej dobe sa **RBÚ** definuje ako pomer absorbovaných dávok rôznych typov žiarenia (rôznych energií rovnakého typu žiarenia) potrebných na vyvolanie daného biologického účinku. Na to sa používa **akostný faktor** (faktor kvality) pre jednotlivé typy žiarenia ( $Q$ ), ktorý je pre:

- fotóny gama a elektróny  $Q = 1,0$
- tepelné neutróny  $Q = 2,3$
- neutróny a protóny s neznámou energiou  $Q = 10,0$
- častice  $\alpha$  a iné ťažké častice s neznámou energiou  $Q = 20,0$ .

Biologická odpoveď na ožiarenie musí byť hodnotená len za presne definovaných experimentálnych podmienok, tj. musia byť definované kritériá sledovaných biologických parametrov a úplne jednoznačne uvedené dozimetrické špecifikácie ožarovania. Pod **špecifikáciou ožarovania** sa rozumie súbor údajov, ktorými popisujeme ožiarenie.

**Charakteristiky expozície (ožarovania) objektu** sú:

- zdroj žiarenia (vonkajšie, vnútorné ožiarenie),
- rozsah ožarovania (celotelové, parciálne),
- kvalita ožarovania (typ žiarenia, LPE, RBÚ),
- fyzikálna špecifikácia poľa ožarovania (fluencia, energia spektra, funkcia polohy a času),
- kvalita ožarovania (dávka, distribúcia dávky pozdĺž dráhy častice).

**Biologické charakteristiky ožarovného objektu:**

- biologická variabilita, špecifická odpoveď sledovaných dejov na ionizujúce žiarenie, stochastický charakter sledovaného deja,
- úroveň štúdia (prokaryontné, eukaryontné organizmy, celý organizmus, tkanivo, bunka, molekulová úroveň),
- reparačné schopnosti (ich rýchlosť a rozsah),
- úroveň poznatkov v oblasti sledovaného javu a vzájomné súvislosti s ostatnými procesmi na rôznych úrovniach štúdia,
- radiosenzitivita a radiorezistencia sledovaných objektov (ročné obdobie, denná doba ožarovania, vek, druh organizmu a pod.).

Z hľadiska radiačne hygienického je meradlom pre porovnanie biologických účinkov rôznych typov žiarenia dávkový ekvivalent. **Dávkový ekvivalent** je definovaný ako súčin dávky, faktoru kvality žiarenia a ďalších modifikujúcich faktorov, ktoré charakterizujú geometriu ožarovania, ožarovný objem a pod. Jednotkou dávkového ekvivalentu je **Sievert (Sv)**, čo je veličina zodpovedajúca ožiareniu dávkou  $1 \text{ Gy}$  ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) príslušného typu žiarenia. Staršia jednotka je rem,  $1 \text{ rem} = 10 \text{ mSv}$ ,  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ .

## RADIAČNÉ POZADIE

Poznanie dávok, ktoré obyvatelia štátu dostávajú z rôznych zdrojov, je atribútom kvalifikovanej ochrany pred žiarením a súčasťou informovanosti obyvateľov o stave ich životného prostredia. Radiačná záťaž pochádza najmä z:

- prírodného pozadia (prírodná záťaž),
- antropogénnej radiačnej záťaže (medicína, jadrový priemysel, letecká doprava a pod.).

Z prírodného pozadia sa uplatňujú najmä:

- kozmické žiarenie a kozmogénne radionuklidy ( $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ),
- terestriálne žiarenie (z radionuklidov v horninách a v pôde:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  a ďalšie).

Antropogénna radiačná záťaž môže byť:

- lekárska expozícia (radiodiagnostika - rtg vyšetrenie a izotópové vyšetrenia),
- ožiarenie z jadrovopalivového cyklu,
- ožiarenie z pokusných výbuchov jadrových zbraní,
- iné zdroje ožarovania obyvateľstva (hodinky s radioaktívnymi svietiacimi farbami, antistatické kefy so žiaričmi na zotieranie prachu z gramofónových platní),
- následkom brzdného rtg žiarenia

- farebné televízory pri pozeraní z menších vzdialeností ako 3 m,
- zvýšená inkorporácia  $^{210}\text{Pb}$ , resp.  $^{210}\text{Po}$ ,
- fajčenie (vyfajčenie 40 cigariet denne predstavuje asi 15 mSv radiačnú dávku v pľúcnom tkanive a hrtane, radiácia z panelov),
- profesionálna expozícia.

Sú určité oblasti, kde je radiačné pozadie vyššie, napr. ožiarenie obyvateľov Teheránu alebo Mexico City kozmickým žiarením je asi 2-3 násobne vyššie. Z terestriálneho žiarenia je vyššie pozadie v oblasti Denveru (USA), v oblastiach štátu Kerala a Tamil Nadu v Indii, v určitých oblastiach Francúzska, Iránu, Srí Lanky a Nigeru. S potravou prijímajú viac radionuklidov (vyššie hladiny vnútornej kontaminácie) v niektorých oblastiach Severu - Laponci a Eskimáci, ktorí sa živia mäsom sobov. Všeobecne vyššie radiačné pozadie je v oblastiach, kde došlo k havárii jadrového zariadenia (napr. Černobyl, Ukrajina), alebo v oblastiach, kde boli umiestnené experimentálne jadrové centrá (Semipalatinsk, Kazachstan a Lop Nor, Čína), alebo vykonané experimentálne jadrové výbuchy (Marshallové ostrovy, napr. atol Bikini).

Celkové zloženie radiačného pozadia je uvedené nižšie:

1. Prírodné pozadie 2,0 mSv
  - kozmické žiarenie 0,3 mSv
  - kozmogénne radionuklidy 0,015 mSv
  - terestriálne žiarenie 1,685 mSv
  - $^{40}\text{K}$  0,3 mSv
  - $^{87}\text{Rb}$  0,006 mSv
  - $^{238}\text{U}$  rad 1,04 mSv
  - $^{232}\text{Th}$  rad 0,33 mSv
2. Umelé radiačné pozadie 0,6 mSv
  - jadrové energetické prevádzky, využívanie ionizujúceho žiarenia a radionuklidov v priemysle, letecká doprava etc. <0,2 mSv
  - lekárske použitie 0,4 mSv
  - rtg diagnostika 0,3 mSv
  - terapeutické ožarovanie 0,05 mSv
  - izotopové vyšetrenia 0,05 mSv
3. Radioaktívny spád (*fall-out*) následkom skúšok jadrových zbraní a havárií jadrových zariadení a ponoriek <0,5 mSv
4. Konzumácia potravín kontaminovaných radionuklidmi, fajčenie, TV, panelové domy a pod. <0,5 mSv

## VPLYVY IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA NA ŽIVÚ HMOTU

**Všeobecný účinok na organizmus.** Ióny vznikajúce účinkom ionizujúceho žiarenia sú reaktívne, a sú schopné meniť také biologicky dôležité molekuly, ako sú nukleové kyseliny a enzýmy. Poškodenie je vyvolané zmenou intermediárneho metabolizmu. Po absorpcii žiarenia do objavenia sa príslušnej odpovede organizmu prebieha latentné obdobie, ktoré môže trvať niekoľko hodín až desaťročia.

Typy radiačného poškodenia môžu byť:

- radiačné poškodenie
  - somatické
    - včasné poškodenie
    - pozdné poškodenie
  - genetické.

Mladí jedinci sú vo všeobecnosti vnímavější, pretože ich bunky majú vyššiu mitotickú aktivitu.

Pri externom ožiarení je zdroj žiarenia mimo organizmu, a ako taký nie je zaujímavý. Pri vnútornom, sa radionuklidy správajú po chemickej stránke ako neradioaktívne prvky, a v metabolizme fungujú tak isto. V organizme sa časť radionuklidov rozpadne a vyvolá vnútornú radiačnú záťaž. Následkom toho vzrastie počet mutácií, čo sa často môže prejavíť až po niekoľkých generáciách. Zvyšujúca sa radiačná záťaž vyvoláva posun v spektre rastlinných a animálnych druhov. Pri dávke 0,02-0,03 Gy/deň sa znižuje počet zvierat, pri 0,2-0,3 Gy/deň sa znižuje odolnosť listnatých stromov voči hmyzu, čo môže viesť k vážnemu narušeniu ekosystémov. Okrem vonkajšej záťaže je mimoriadne dôležitá z hľadiska zvierat a človeka aj vnútorná záťaž vyvolaná potravinovými reťazcami, kedy aj relatívne neškodné množstvá radionuklidov v prostredí sa môžu cez potravinový reťazec koncentrovať do hladiny nebezpečnej pre človeka (napr.  $^{131}\text{I}$  a  $^{125}\text{I}$  a ich kumulácia v štítnej žľaze).

**Účinky žiarenia na človeka.** Hlavné druhy sú:

- ♦ **submerzia:** vonkajšia radiačná záťaž prostredníctvom vzduchu,
- ♦ **inhalácia:** vnútorná radiačná záťaž vdychovaním radioaktívnych látok,
- ♦ **ingescia:** vnútorná radiačná záťaž príjmom radionuklidov požívatínami.

Pri submerzii je zasiahnuté celé telo, pri inhalácii a ingescii radionuklidy kolujú v krvi. Dostanú sa do všetkých tkanív, resp. sa koncentrujú v určitých cieľových tkanivách (napr. jód v štítnej žľaze, stroncium v kostnej dreni a pod.).

Veľmi citlivé sú najmä hemopoetické tkanivá a gonády, po ožiarení často dochádza k leukémii a ku sterilite.

Somatické radiačné poškodenie môže byť pre jedinca tragické, má vážne následky na jeho genofond, a môže mať vplyv na budúce generácie. Pri zvýšenej radiačnej záťaži vzniká choroba z ožiarenia, ktorá môže mať rôzny obraz podľa veľkosti obdržanej dávky. Celotelové ožiarenie v priebehu niekoľkých hodín, resp. dní o cca. 0,5 Sv vyvolá radiačný syndróm s prvotnými príznakmi: nevoľnosť a hnačky. Pri dávkach vyše 2,0 Sv už môže ochorenie viesť aj k smrti a vyše 5,0 Sv väčšinou končí letálne ( $\text{LD}_{50}$  je odhadované na 3,5 Sv). Pozdne účinky sú reprezentované najmä leukémiou a rakovinou. Aby radiačná záťaž človeka bola udržaná v určitých prijateľných hladinách je potrebné sa pridrižovať odporúčaní **ICRP** (*International Commission on Radiological Protection*). Ako to ustanovuje základné pravidlo ICRP, je potrebné sa vyhnúť každej zbytočnej radiačnej záťaže, nakoľko dodnes **nie sú spoľahlivo určené prahové hodnoty, ktoré by vylúčili akékoľvek poškodenie organizmu**. Podľa doporučení ICRP je maximálne povolená dávka v priebehu 30 rokov 50 mSv. Podľa Vedeckého výboru pre účinky atomových zariadení (**UNSCEAR** - *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) je priemerný **ročný efektívny dávkový ekvivalent** udávaný hodnotou **2,2 mSv**. Osobitné odhady sú vypracované aj pre niektoré kritické orgány resp. tkanivá, napr.:

- vzduchom a vodou môže byť celotelová maximálna radiačná záťaž 0,3 mSv/rok,
- radiačná záťaž štítnej žľazy nemôže prevýšiť hodnotu 0,9 mSv/rok.

Vo všeobecnosti ionizujúce žiarenie pôsobí:

- ♦ **priamo** poškodením senzitívnych biomolekúl,
- ♦ **nepriamo** toxickým účinkom reaktívnych voľných radikálov, vznikajúcich pri radiolýze vody.  
Účinky ionizujúceho žiarenia je možné rozdeliť do štyroch fáz:
- ♦ **fyzikálna** - radiačný zásah atómov a molekúl,
- ♦ **fyzikálno-chemická** - tvorba voľných radikálov a ionizácia,
- ♦ **chemická** - reakcie voľných radikálov, poškodenie biologických makromolekúl a
- ♦ **biologická** - subcelulárne, celulárne a tkanivové poškodenie, choroba z ožiarenia alebo pozdne genetické následky (karcinogenéza, mutácie).

## **RADIAČNÉ POŠKODENIE BUNIEK A TKANÍV**

Na **bunkovej úrovni** vedie ožiarenie k funkčným a štrukturálnym zmenám biologických membrán, proteínov a nukleových kyselín. Z lyzozómov sú uvoľnené hydrolytické enzýmy a



v mitochondriách dochádza k poklesu syntézy ATP. Bunky sú schopné takéto poškodenie reparovať za pomerne krátky čas.

Jedným z kritických účinkov ionizujúceho žiarenia je poškodenie genetického kódu. Jednovláknové zlomy chromozómov sú reparovateľné, dvojitvlnkové zlomy vedú obyčajne k nereparovateľnému poškodeniu.

Ohľadom následkov radiačného poškodenia je ich možné zaradiť do troch typov:

- ♦ **čisté somatické poškodenie** (na bunkovej úrovni strata mitotickej schopnosti, poškodenie membrán, mitochondrií a ďalších organel),
- ♦ **genetické poškodenie ohraničené na somatické bunky** daného jednotlivca (možný následok: karcinogenéza),
- ♦ **genetické poškodenie gamét**, môže mať následky na budúce generácie (vznik nových mutácií v ďalších generáciách).

Prvý typ poškodenia si vyžaduje relatívne vysoké dávky žiarenia (okolo 2 Gy), kým nižšie dávky môžu viesť ku genetickým poškodeniam (2. a 3. typ) a k možnému vzniku pozdných poškodení.

Rozsah **tkanivového poškodenia** závisí od druhu a dávky ionizujúceho žiarenia, od celkového stavu organizmu a od dĺžky ožarovania. Jednorazové ožiarenie určitou dávkou je zhubnejšie než frakcionované ožiarenie takou istou dávkou (znížená, resp. neschopnosť regenerácie buniek). Oproti tomu vznik genetického poškodenia je pravdepodobnejší pri opakovanom ožiarení. Účinky žiarenia sú závislé aj od toho, či je ožarované celé telo, alebo ide len o lokálne ožiarenie.

Jednotlivé tkanivá alebo orgány vykazujú odlišnú senzitivitu k ionizujúcemu žiareniu. Vo všeobecnosti sú bunky s vysokou mitotickou aktivitou citlivejšie než postmitotické bunky. Senzitivita tkanív závisí aj od metabolickej aktivity a stupňa diferenciácie. Na základe uvedeného rozdeľujeme tkanivá tela na:

- ♦ **radiosenzitivné** (kostná dreň, lymfatické tkanivo, mukóza tenkého čreva, gonády),
- ♦ **radiorezistentné** (svalové tkanivo, obličky, pečeň, endokrinné orgány okrem gonád).

Osobitné postavenie má nervové tkanivo, ktoré je na priame účinky ionizujúceho žiarenia rezistentné, oproti tomu na nepriame účinky (voľné radikály) mimoriadne citlivé.

Špecifickým prípadom extrémnej senzitivity je vyvíjajúci sa plod, najmä v prvých týždňoch intrauterinného života.

## CHOROBA Z OŽIARENIA

Choroba z ožiarenia (*morbus ex irradiatione*) môže byť vyvolaná vonkajším ožiarением alebo vnútornou kontamináciou organizmu a môže prebiehať v akútnej alebo v chronickej forme.

**Akútna choroba z ožiarenia** sa vyvíja po jednorazovom ožiarení celého tela vysokými dávkami ionizujúceho žiarenia. Rozlišujeme štyri štádiá akútnej choroby z ožiarenia a tri typy v závislosti od prevládajúcich symptómov:

**1. štádium - primárna reakcia** - nauzea a zvracanie (po dávke 2-3 Gy sa môžu manifestovať len tieto symptómy), hnačky, malátnosť, iritabilita, zvýšená teplota, zrýchlené dýchanie.

**2. latentné štádium** - nie sú prítomné výrazné klinické príznaky, ale sú zjavné zmeny v krvnom obraze následkom inhibície hemopoézy (leukopénia, trombocytopenia, retikulopénia).

**3. štádium zjavných klinických príznakov** - manifestácia hemoragickej diatézy, ďalšia inhibícia hemopoézy, zvýšená permeabilita bunkových membrán, znížená imunita s následnou sepsou.

**4. štádium rekonvalescencie alebo prechodu do chronickej formy, popr. smrť** postihnutého jedinca.

V závislosti od klinických symptómov rozlišujeme tri formy choroby z ožiarenia:

### **1. Dreňová (alebo krvná) forma akútnej choroby z ožiarenia.**

Vyskytuje sa pri ožiarení dávkami v rozsahu 2-10 Gy. Symptómy 1.štádia ustupujú za jeden-dva dni, ale po 2-3 týždňoch sa objaví purpura, petechie a známky poškodenej imunity (infekcie). Symptómy dobre korelujú so zmenami v krvnom obraze (postihnutie najmä lymfocytov a vývojových foriem krviniek).

**2. Črevná forma.** Pri dávke okolo 10-30 Gy sa začínajú odlupovať epiteliálne bunky črevnej mukózy, zastavuje sa absorpcia živín a vody. Z klinického hľadiska sú po krátkej asymptomatickej perióde typické úporné hnačky a strata tekutín spolu s hematologickými symptómami a infekciami. Dávky okolo 100 Gy vyvolávajú manifestáciu gastrointestinálnych príznakov okamžite. Tento typ

choroby z ožiarenia končí obyčajne smrťou aj napriek moderným terapeutickým technikám (transplantácia kostnej drene).

**3. Nervová forma.** Po dávkach 20-50 Gy ihneď po gastrointestinálnych symptómoch nasleduje ataxia, zvýšené potenie, psychická dezorientácia a zmätenosť, niekedy kŕče alebo bezvedomie. Smrť nastáva do niekoľkých hodín alebo dní. Obrovské dávky (300-500 Gy) môžu vyvolať okamžitú smrť spôsobenú dysfunkciou CNS.

**Chronická choroba z ožiarenia** vzniká po jednorazovom ožiarení subletálnou dávkou žiarenia alebo po opakovanom (frakcionovanom) ožiarení nízkymi dávkami, resp. po vnútornej kontaminácii radionuklidmi. Klinické symptómy sú reprezentované slabosťou, vyčerpanosťou a iritabilitou. Signifikantné sú zmeny v krvnom obraze - permanentná leukopénia, trombocytopénia, anémia a hypoplázia kostnej drene. Mesiace alebo roky po ožiarení sa môžu objaviť hepatopatia s portálnou hypertenziou, renálne poškodenie s proteinúriou, bolesti hlavy a pokles duševných schopností. Opakované stredné dávky žiarenia vedú k predčasnému starnutiu.

Symptómy po **lokálnom** alebo **regionálnom ožiarení** sú obyčajne málo výrazné a závisia od citlivosti a vlastností postihnutého orgánu.

**Pozdné účinky nízkych dávok** ionizujúceho žiarenia sa môžu manifestovať genetickými a karcinogénnymi následkami. Riziko vzniku karcinogenézy a vrodených defektov je 1 000 prípadov na 1 000 000 ľudí po ožiarení dávkou 1 Sv/rok.

Priemerná doba latencie medzi ožiarením a manifestáciou nádorov je okolo 10-15 rokov. Môže to byť urýchlené inými karcinogénnymi stimulmi.