

# Limitování rizik z ionizujícího záření

VLADISLAV KLENER

**Ionizující záření je faktorem životního prostředí, na kterém lze dobře demonstrovat vývoj přístupů k ochraně zdraví lidí vystavených jeho působení. Je to faktor, který se jako škodlivina výrazně uplatňuje a je explicitně sledován po dobu necelého století, neboť teprve r. 1895 objevil C. W. Röntgen záření X a r. 1896 H. Becquerel přírodní radioaktivitu. Rentgenová lampa byla v podstatě prvním z urychlovačů částic, jejichž vývoj dále pokračoval objemem cyklotronu, lineárních urychlovačů, betatronu a synchrotronu s jejich různorodými aplikacemi. Studium radioaktivity vedlo posléze k přípravě prvních umělých radioizotopů ve třicátých letech a k objevu štěpné řetězové reakce demonstrované E. Fermim r. 1942.**

Na rozvoji ochrany před zářením lze ukázat, jak usměrňování ozáření pracovníků a obyvatelstva je výsledkem pokroku na několika směrech bádání. Je podmíněno na jedné straně rozvojem aplikací ionizujícího záření, neboť odtud vzniká podnět zajímat se o ochranu zdraví. Klíčové je poznání biologických účinků za různých podmínek ozáření. Vzniká potřeba charakterizovat podmínky ozáření nejen kvalitativně, ale i kvantitativně. Toto úsilí se dále větví ve snahu vyvinout metody k měření zdrojů ionizujícího záření, k měření polí, ve kterých záření působí a konečně k měření odezvy v terčovém objektu a ve snahu — úzce navazující na metody měření — formulovat příslušné veličiny a definovat jednotky. Teprve potom je dán základ ke studiu vztahu mezi dávkou záření a jeho biologickým účinkem, vztahu, který se jako červená nit vine celou teorií a praxí ochrany před zářením. V této fázi rozvoje poznatků je již možno zabývat se koncepcí ochrany před zářením a propracovávat ji od stadia první aproximace k racionální a logické soustavě usměrňování expozice pracovníků a obyvatelstva.

Přesáhlo by rámec zadání věnovat se historii tohoto vývoje. V tab. 1 jsou uvedeny některé milníky vyznačující cestu k dnešnímu pojetí, jemuž se v dalším budeme věnovat.

Uvedli jsme již, že základem regulace ozáření je znalost vztahu mezi mírou ozáření a biologickým účinkem. Je přitom zvláštní předností, že v oblasti ochrany před zářením můžeme jakékoliv

podmínky ozáření převést na „společného jmenovatele“, totiž popsat je jedinou základní veličinou — dávkou v ozářené tkáni nebo orgánu. Dávka je vlastně „hustota“ absorpce zářivé energie, její jednotkou je J/kg se zvláštním názvem gray (Gy). Převodní vztah k dříve užívaným jednotkám:  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ . Ještě bližší korelaci s biologickými účinky má veličina dávkový ekvivalent, v níž je respektována rozdílná biologická účinnost různých druhů ionizujícího záření. Jeho jednotkou je opět J/kg, ale v tomto případě se zvláštním názvem sievert (Sv). Převodní vztah k dříve užívaným jednotkám:  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ .

Po zavedení vhodných jednotek lze zkoumat vztah mezi ozářením a jeho zdravotními následky. Tento vztah byl analyzován v nepřehledné řadě experimentů a i v pozorováních na lidských kolektivech nadměrně ozářených. Zobecnění takto získaných poznatků vede k vymezení dvou typů biologických účinků podle průběhu nalezené závislosti (obr. 1). Jednodušší je charakterizovat účinky nestochastické, jejichž příkladem je akutní nemoc z ozáření nebo akutní poškození kůže zářením. Platí pro ně vztah dávky a účinku schematicky vyjádřený esovitou křivkou v horní části grafu. V oblasti nejmenších dávek efekt vůbec nenastává. Se stoupaním dávky stoupá procento postižených jedinců, až při určité dávce onemocní (deterministicky) všichni ozáření. Hlavním parametrem umožňujícím hodnocení rizika je hodnota prahové dávky. Jako příklad lze uvést, že prahová dávka jednorázovo-

Tab. 1. Významné milníky rozvoje ochrany před zářením

Roky
1905 — C. E. S. Phillips navrhl využití ionizace vzduchu k měření ionizujícího záření
1910 — přijata jednotka curie (Ci) odpovídající aktivitě 1 g <sup>226</sup> Ra
1925 — A. Mutscheller stanovuje první „toleranční dávku“, 1/100 kožní erytérové dávky za 30 dní, tj. asi 0,2 R denně
1928 — přijetí jednotky rentgen (R)
1944 — definice jednotky rem
1950 — Mezinárodní komise radiologické ochrany (ICRP) stanovuje limit 0,3 rem týdně pro celé tělo a 1,5 rem týdně pro kůži a ruce
1977 — vychází základní doporučení ICRP 26, které formuluje požadavky „systému limitování dávek“ — v rámci mezinárodní soustavy jednotek SI se rozšiřuje užívání zvláštních názvů becquerel (Bq) pro aktivitu, gray (Gy) pro dávku a sievert (Sv) pro dávkový ekvivalent
1978 — navržena veličina efektivní dávkový ekvivalent H <sub>E</sub>

vého ozáření pro vznik kožního erytému činí při rentgenovém ozáření asi 2—3 Gy, pro akutní nemoc z ozáření při celotělovém ozáření gama asi 2 Gy.

Pro účinky stochastické, které se projevují pozdním výskytem nádorů a genetickými projevy u potomstva, vychází se ze vztahu, který je vyjádřen přímkou na dolní části grafu. Každé zvýšení dávky je spojeno s úměrným zvýšením pravděpodobnosti výskytu změn vázaných na ozářenou tkáň nebo orgán, a tato představa platí i pro oblast nejnižších dávek. Představa lineární a bezprahové závislosti je hypotetická, ovšem řada argumentů, m.j. i praktických, svědčí pro zavedení a uplatňování této hypotézy v ochraně před zářením. Kvantitativním parametrem umožňujícím hodnotit rizika jsou koeficienty rizika pro jednotlivé účinky, jimž by v grafickém vyjádření odpovídala různá strmost přímek. Koeficient rizika pro sumu všech stochastických účinků je konvenčně stanoven na  $1,65 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ .

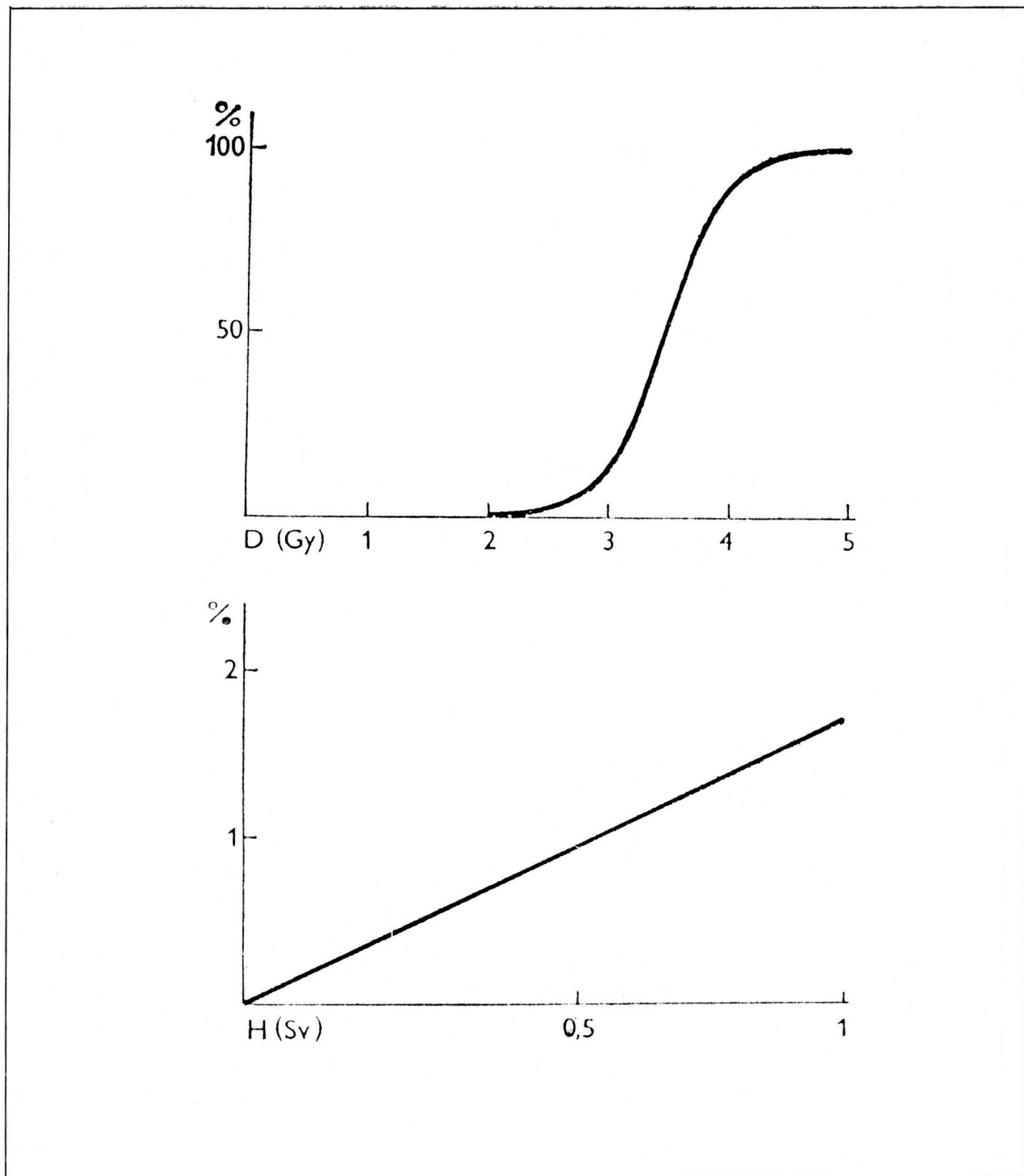
Zamyšlení nad grafy na obr. 1 objasní odlišné přístupy k usměrňování ochrany ve vztahu ke dvěma základním typům účinku. V případě nestochastických účinků lze ochranu zdraví plně zabezpečit stanovením nejvýše přípustných dávkových ekvivalentů na úrovni dostatečně vzdálené směrem dolů od hodnot prahových dávek. Naproti tomu u účinků stochastických, jimž hypoteticky připisujeme lineární a bezprahovou závislost na dávce, nelze stanovit žádný dávkový ekvivalent, který by byl absolutně bezpečný, neboť každému i sebemenšímu dávkovému ekvivalentu připisujeme proporcionálně určité zvýšení pravděpodobnosti pozdních následků. Jedinou alternativní koncepcí pro zajištění ochrany zdraví je v této situaci opuštění kritéria absolutní bezpečnosti a nastolení kritéria přijatelnosti rizika, tedy pravděpodobných důsledků ozáření.

Přijetí rizika ohrožení zdraví a života z určité činnosti se klade jako výzva jednotlivci i společnosti od počátku historie člověka.

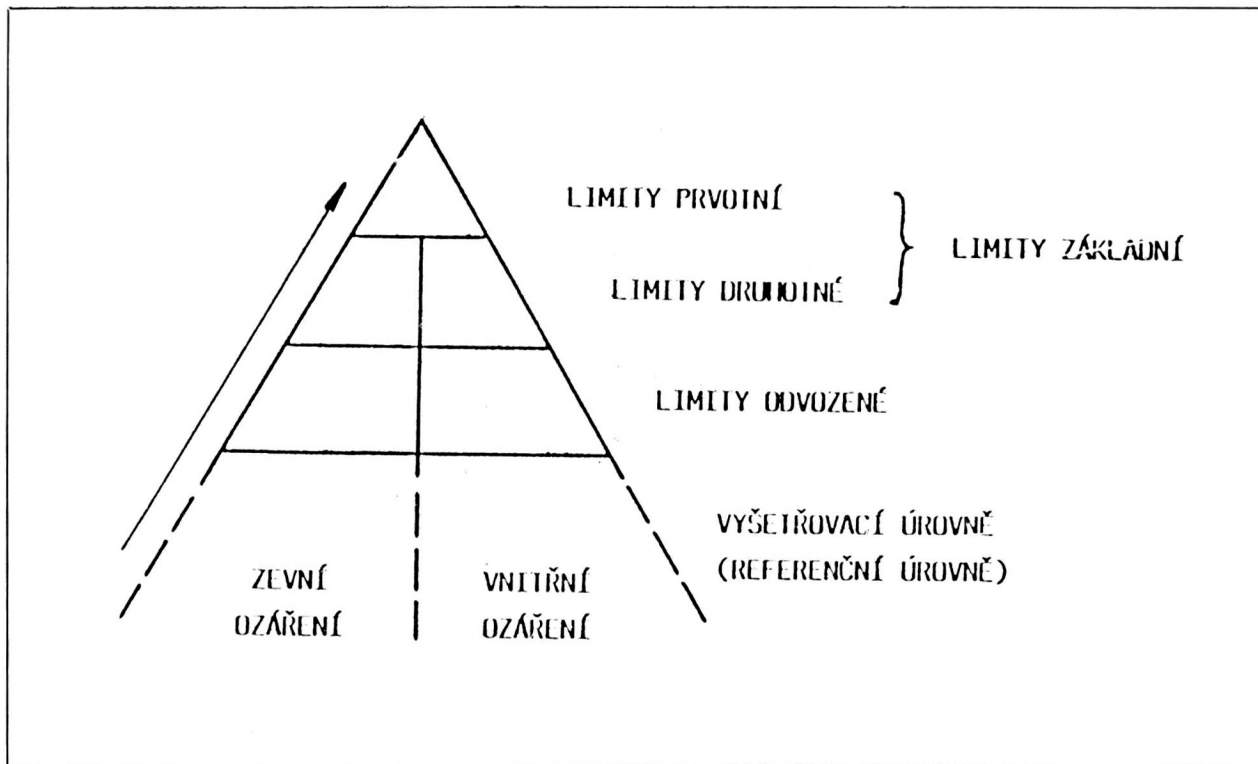
Pro opatřování životních potřeb a naplňování aspirací lidského ducha podstupoval člověk vždy akce spojené s ohrožením zdraví. Přitom si zpravidla neuvědomoval, že jde o volbu mezi různými alternativami a intuitivně sledoval svůj cíl. V minulosti se rovnováha mezi rizikem a přínosem ustálila nejednou až dodatečně, jak lze sledovat např. v automobilové dopravě. Její nesmírný národohospodářský a kulturní přínos je třeba vážit proti vysoké dani na ztracených životech a poškození zdraví. V hygieně záření je v současné době rozhodování o přijatelnosti rizika rozpracováno explicitně a promítá se do tří hlavních požadavků — principů — systému limitování dávek, jak bude dále uvedeno.

Přijatelnost je třeba posuzovat z hlediska jednotlivce i společnosti. Jde o to, že jednotlivec je často ochoten přijímat ve vztahu k sobě i zvýšené riziko a že i společnost může pokládat za přijatelné takové zvýšené riziko, týkající se mladého souboru jedinců v populaci. Kdyby se však mělo zvýšené riziko týkat všech členů populace, mohlo by být celkové zvýšení pravděpodobnosti zdravotních následků pro společnost nepřijatelné. Přijatelnost ozáření lidí při řešení ochrany vychází tedy jak ze zájmu jednotlivce s respektováním jeho psychologických a emotivních postojů, tak i ze zájmu celé společnosti.

Požadavek omezovat u jednotlivce i ve vztahu ke společnosti výskyt účinků nestochastických i stochastických vedl i k tvorbě dalších veličin v ochraně před zářením. Dávka a dávkový ekvivalent jsou veličiny vhodné k hodnocení rizika z ozáření jednotlivé tkáně nebo orgánu, tedy především nestochastických účinků. K hodnocení rizika účinků stochastických byla zavedena veličina efektivní dávkový ekvivalent H<sub>E</sub> (Sv). Tato převádí ktereokoliv lokalizované ozáření na fiktivní ozáření celého těla, které by vedlo ke stejnému výskytu stochastických účinků jako ozáření jednotlivé tkáně. Zavedením této veličiny je umožněno sčítání dávkových ekvivalentů realizovaných v různých částech těla,



Obr. 1. Grafické vyjádření vztahu dávky D (resp. dávkového ekvivalentu H) a účinků pro projevy nestochastické (nahore) a stochastické (dole). Hodnoty na svislé ose označují procento jedinců postižených sledovaným účinkem, jsou-li velké skupiny biologických objektů ozářeny dávkami (dávkovými ekvivalenty) vyznačenými na vodorovné ose.



Obr. 2. Hierarchická soustava limitů v ochraně před zářením. Limity základní mají obecnou závaznost, limity odvozené a vyšetřovací úrovně platí jen pro jednotlivé konkrétní situace. Interpretace výsledků měření je usnadněna logikou této soustavy. Z nepřekročení ukazatelů nižší úrovně lze usuzovat přímo, nebo zprostředkovaně na nepřekročení prvotních limitů (šipka).

příp. správné hodnocení rizika geometricky nehomogenního ozáření. Dosud uvedené veličiny patří do skupiny veličin vztažených k jednotlivci. Pro účely hodnocení účinků na velké populační skupiny zavádíme veličinu kolektivní efektivní dávkový ekvivalent  $S_E$ , kterou pokládáme za veličinu vztaženou ke zdroji, neboť charakterizuje celkové negativní působení zdroje na populaci. Matematicky je kolektivní efektivní dávkový ekvivalent součtem (integrálem) všech individuálních efektivních dávkových ekvivalentů ve vymezeném okolí zdroje. Při znalosti koeficientů rizika lze potom z hodnoty  $S_E$  vypočítat prostým násobením i zdravotní ujmu obyvatelstva  $G$  v okolí zdroje. Zavedení veličin vztažených ke zdroji (patří k nim i veličina  $G$ ) představuje kvalitativní skok v hodnocení nepříznivých vlivů zdroje a v metodách jeho omezování.

Pojednali jsme o kritériu přijatelnosti rizika a můžeme nyní i formulovat cíl, jaký si ochrana před zářením klade: vyloučit zcela u pracovníků i obyvatelstva účinky nestochastické a omezit účinky stochastické na míru přijatelnou pro jednotlivce i společnost. V úsilí o dosažení těchto cílů už nestačí jen uplatňování

limitů (tj. nejvýše přípustných dávek záření, analogických NPK, které historicky byly prvním nástrojem regulace expozice), ale je třeba uplatňovat zásadu, aby dávky záření byly tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout. V uplynulém období byly původně neurčité pojmy, jako „přijatelnost expozice“ nebo „rozumně dosažitelná úroveň“, rozpracovány až do podoby matematických postupů použitelných v operativním rozhodování. Výsledkem tohoto vývoje je rozpracování systému limitování dávek, který stanovuje tyto požadavky:

- Žádná činnost vedoucí k ozáření lidí nesmí být zahájena ani prováděna, pokud nevede k čistému pozitivnímu přínosu (princip zdůvodnění).
- Všechny expozice musí být udržovány tak nízké, jak lze s uvážením ekonomických a společenských hledisek dosáhnout (princip optimalizace ochrany před zářením).
- Dávkové ekvivalenty nesmějí u jednotlivců překročit limity stanovené pro příslušné podmínky (princip nepřekročení limitů pro jednotlivce).

Jak je třeba rozumět jednotlivým principům a jejich vzájemnému vztahu? Princip zdůvodnění lze nejlépe vysvětlit na příkladu rozhodování centrálních orgánů o zahájení rozsáhlých investic spojených s rizikem zdravotních důsledků ozáření lidí. Potřeba zajistit dostatek energie je spojena s posuzováním alternativních energetických zdrojů a zvážení všech pro a proti vyústí v konečné rozhodnutí rozvíjet jadernou energetiku. Tento pragmatický postup lze převést na teoretický průkaz, že rozhodnutí je spojeno s čistým přínosem P pro společnost:

$$P = C - (N + X + Y),$$

kde C je hrubý přínos, odpovídající v našem příkladě ceně vyrobené energie, N jsou náklady na výstavbu a provoz jaderného zařízení, X plánované náklady na ochranu před zářením a Y ztráty pro společnost, vyplývající ze zdravotní ujmy z ozáření. Pokud výraz na pravé straně rovnice bude mít kladnou hodnotu, tedy když i P bude větší než nula, je podán důkaz čistého přínosu a požadavky prvního z uvedených principů jsou splněny.

Princip optimalizace ochrany před zářením znamená v nejšířším pojetí úsilí o to, udržovat ozáření lidí na nejnižší rozumně dosažitelné úrovni. Vzhledem k uvedenému vzorci se optimalizace zabývá vzájemným vztahem členů X a Y a hledá takové řešení ochrany, kdy součet těchto dvou členů dosahuje minima. Ke splnění tohoto úkolu v konkrétních situacích se užívá přípravných matematických postupů a metodických nástrojů systémového inženýrství. Je třeba mít na paměti, že úsilí o zajištění tak nízkého ozáření, jakého lze dosáhnout, se zaměřuje na skupiny lidí, na kolektivy, tedy konkrétně na dosažení co nejnižšího kolektivního dávkového ekvivalentu.

Princip nepřekročení limitů se vztahuje na ozáření jednotlivců a jeho aplikace má zaručit, aby za podmínek optimalizované ochrany nebyl žádný jednotlivec ozařován nad stanovenou úroveň. V kolektivu ozářených osob mají efektivní dávkové ekvivalenty příslušnou statistickou distribuci a bylo by možné si představit situaci, kdy dosažení nejnižšího kolektivního dávkového ekvivalentu by bylo dosaženo za cenu relativně vysokého ozáření menší skupiny jednotlivců. Takovému řešení ochrany brání právě požadavek nepřekročení limitu. Limity tedy představují strop individuálních dávek, pod kterým se odehrává úsilí o dosažení co nejnižšího ozáření, jsou tedy stropem optimalizace ochrany před zářením. Vztah principů optimalizace a nepřekročení limitů lze ukázat na řízení ochrany obyvatelstva v okolí jaderné elektrárny. Malá — nejvíce ohrožená — skupina obyvatelstva (tzv. kritická skupina) smí být ozářena do úrovně limitů platných pro obyvatelstvo. Bylo by však nepřijatelné, aby této úrovně dosáhli jednotlivci v celé populaci, např. do vzdálenosti 50 km. Její ozáření se řídí pravidly optimalizace, tj. vyvíjí se úsilí o dosažení co nejnižšího kolektivního dávkového ekvivalentu.

Limity v ochraně před zářením jsou logicky uspořádány v hierarchický systém, který lze znázornit jako pyramidu (obr. 2). Na vrcholu pyramidy jsou ukazatele, které mají obecnou a neměnnou platnost pro celý obor hygieny záření a jsou stanoveny ve veličinách, ze kterých lze přímo usuzovat na biologické důsledky. Tyto veličiny mají nevýhodu v tom, že je nelze za reálných expozičních situací přímo stanovit. Ukazatelé na vrcholu pyramidy se nazývají prvotní limity a jsou stanoveny v efektivním dávkovém ekvivalentu vzhledem ke stochastickým účinkům a ve středním dávkovém ekvivalentu v tkáni vzhledem k nestochastickým účinkům. Hodnoty těchto limitů jsou odlišné pro pracovníky a obyvatele. Druhé pořadí v pyramidě představují druhotné limity. Jsou zavedeny s ohledem na reálné množství měření a jsou stanoveny ve veličinách, které lze pomocí jednoduchého modelu převést na dávkové ekvivalenty. Vzhledem k tomu, že se metody měření zevního ozáření liší od metod měření vnitřní kontaminace, jsou zavedeny pro oba typy ozáření odlišné druhotné limity. Druhotným limitem pro vnitřní ozáření je roční limit příjmu radioaktivní látky, stanovený v jednotkách aktivity, v becquerlech (Bq). Hodnota tohoto limitu je pro jednotlivé radionuklidy odlišná a závisí i na cestě vstupu do organismu. Proto druhotné limity pro vnitřní kontaminaci jsou publikovány v obsáhlých tabulkách.

Do dalšího pořadí v pyramidě se řadí odvozené limity. Hlavní rozdíl proti uvedeným limitům spočívá v tom, že odvozené limity neplatí obecně, tj. pro všechny situace, naopak jsou stanoveny pro jednotlivé konkrétní podmínky expozice. Zavedení odvozených limitů umožňuje značnou pružnost v řízení ochrany při respektování nediskutovatelné závaznosti limitů prvotních a druhotných. Pracuje-li pracovník během roku menší počet hodin se zdroji záření, může být jeho ozáření v jednotlivých hodinách vyšší než u pracovníka celoročně zaměstnaného v obdobném prostředí. Toto pojetí je značně vzdálené od přístupů založených na obecné závaznosti nejvýše přípustných koncentrací (NKP). V ochraně před zářením se usměrňování na podkladě NPK aplikovalo ještě v šedesátých letech. Bylo však opuštěno a důvod nového pojetí vyplývá z celého dřívějšího textu.

Závěrem je třeba ještě připojit poznámku o tom, jak jsou v ochraně před zářením respektována jiná biota. Mezinárodní doporučení ICRP 26 z r. 1977 uvádí lakonicky toto stanovisko: Úroveň bezpečnosti požadovaná pro ochranu jednotlivých lidí je pravděpodobně dostatečná pro ochranu jiných živoucích druhů, i když nikoli nezbytně jednotlivých individuí těchto druhů; je-li dostatečně chráněn člověk, potom jsou pravděpodobně uspokojivě ochráněny i ostatní živé organismy.

Řada ekologů se staví polemicky k tomuto názoru. V posledních letech jsou proto zahajovány v širší míře studie, směřující k doplnění informací v této oblasti.