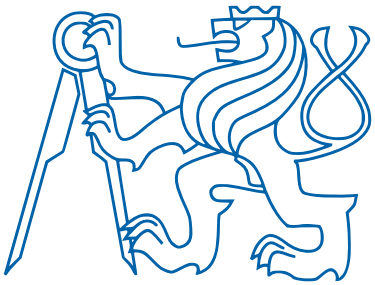
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

ÚSTAV LETECKÉ DOPRAVY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kosmické záření a jeho vliv na posádky letadel

Autor: Bc. Petr Ploc

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Ploc, Ph.D.

Ing. Anna Polánecká, Ph.D., MBA

Praha, 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K621..... **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Petr Ploc

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Kosmické záření a jeho vliv na posádky letadel**

Název tématu (anglicky): Cosmic Radiation and its Influance on Flight Crew Members

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Kosmické záření obecně
- Limity ozáření
- Měření kosmického záření na palubách letadel
- Zpracování rutinních výpočtů efektivních dávek
- Vliv kosmického záření na zdraví
- Úpravy plánů služeb letových posádek v případě překročení směrodatných hodnot

ČVUT FD

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Klener V. et al. Principy a praxe radiacni ochrany, SUJB

European Dosimetry Group (EURADOS), 2004, "Cosmic radiation exposure of aircraft crew"

Bartlett D. T., 2004, "Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew"

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Anna Polánecká, Ph.D., MBA**
Ing. Ondřej Ploc, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2016**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta dopravní
L. S.

Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy

prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Petr Ploc
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 30. června 2017

Poděkování

Děkuji vedoucím diplomové práce Ing. Ondřejovi Plocovi PhD. a Ing. Anně Polánecké PhD., MBA za vstřícnost, vedení mé práce, ochotu a za cenné rady a připomínky, které tuto práci obohatily. Děkuji Ing. Jánu Kubančákovi za konzultace a pomoc s výpočty efektivních dávek a prostorových dávkových ekvivalentů z experimentu na sérii letů kolem světa. Děkuji Ing. Štefanovi Kukurovi za jeho vstřícnost a svolení provádět experimentální měření na letech s letadlem Embraer Legacy 600. Děkuji mamince MUDr. Renatě Školoudové za kontrolu gramatiky a své manželce Bc. Ireně Plocové za dokonalé rodinné zázemí a pomoc s finální úpravou práce.

Prohlášení

„Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).“

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 20. 11. 2017

Petr Ploc

Název práce: **Kosmické záření a jeho vliv na posádky letadel**

Autor: Bc. Petr Ploc

Obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Ploc, Ph.D.
Oddělení dozimetrie záření, Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i.
Ing. Anna Polánecká, Ph.D., MBA
Ústav letecké dopravy, Fakulta dopravní, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Ing. Ján Kubančák
Oddělení dozimetrie záření, Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i.

Abstrakt: Posádky letadel jsou vystaveny zvýšené úrovni kosmického záření. Roční dávky posádek letadel běžně přesahují stanovenou úroveň, která je pro veřejnost 1 mSv. Provozovatelé letadel jsou proto ze zákona povinni dávky monitorovat a zajistit optimalizaci radiační ochrany. Vzhledem ke složitosti radiačního pole v letových hladinách, obsahujícího velké množství různých částic v širokém rozsahu energií, to však není lehký úkol. Cílem této diplomové práce je objasnit problematiku čtenáři. Práce čtenáře seznamuje s kosmickým zářením, s historií jeho objevu a s problémem radiační zátěže posádek letadel. Ukazuje vliv ionizujícího záření na lidské zdraví a porovnává hodnoty efektivních dávek kosmického záření s hodnotami efektivních dávek ozáření obyvatel z jiných zdrojů. Práce shrnuje základní informace o dozimetrii posádek letadel, uvádí stanovené limity ozáření a zasazuje problematiku do legislativního rámce v evropském i českém kontextu. Vysvětluje metodiku výpočtu efektivních dávek, porovnává výpočty ozáření v závislosti na zvolených letových parametrech. Navrhuje leteckým provozovatelům, jak upravit plány a rozpisy služeb posádek letadel v závislosti na jejich radiační zátěži. Úvodní část práce je psána formou rešerše. Druhá část práce je vlastní tvorbou s provedením experimentálního ověření vypočtených efektivních dávek, které byly obdrženy během konkrétních letů letadla Embraer Legacy 600.

Klíčová slova: ionizující záření, kosmické záření, geomagnetismus, radiační zátěž, limity ozáření, dozimetrie posádek, efektivní dávky, zdravotní rizika z ozáření

Title: **Cosmic radiation and its influence on flight crew members**

Author: Bc. Petr Ploc

Abstract: Aircrew members are exposed to the increased levels of cosmic radiation. Their annual effective doses normally exceed the specified level of 1 mSv for the public. It is considered as a planned exposure situation at a workplace with possible increased radiation exposure from a natural source of radiation. Air operators are therefore legally obliged to monitor crew's effective doses and ensure optimization of radiation protection. The mixed radiation field at flight altitudes contains due to its complexity many different particles in a wide range of energies, and that's why the optimization of radiation protection is not an easy task. This diploma thesis aims to bring more understanding into this subject, so readers first learn about cosmic rays, the history of their discovery and the issue of the radiation load of aircraft crews. It also mentions the effect of ionizing radiation on human health and compares the values of common effective doses of cosmic rays received by flight crews with effective doses of human exposure from other sources (for example from medical diagnostics). It summarizes the basics of aircraft crew dosimetry and limits of radiation exposure according to European and Czech laws. It explains the methodology of effective dose calculation, compares how particular irradiation calculations depend on selected flight parameters, and suggests to airline operators how to amend flight crew rosters according to crew's radiation load. The introductory part of the thesis is written in the form of a literature search work and the second part is author’s own work with the experimental verification of the calculated effective doses received on particular flights of the Embraer Legacy 600 aircraft.

Key words: ionizing radiation, cosmic radiation, geomagnetism, radiation load, radiation exposure limits, aircrew dosimetry, effective doses, radiation health risks

Obsah

1 Historie 10

1.1 Objev kosmického záření - Victor Franz Hess 10

1.2 Zkoumání závislosti kosmického záření na zeměpisné poloze - František Běhounek 11

1.3 Objev nových částic 12

2 Kosmické záření a jeho původ 14

2.1 Galaktické kosmické záření 14

2.2 Sluneční kosmické záření 16

2.3 Van Allenovy radiační pásy 18

2.4 Blesky a gama záblesky v zemské atmosféře 21

3 Šíření kosmického záření 22

3.1 Druhy záření obecně 22

3.2 Průchod kosmického záření zemskou atmosférou 23

3.3 Závislost na vzdálenosti od povrchu Země 25

3.4 Závislost na geomagnetické poloze 28

3.5 Závislost na čase – období sluneční aktivity 33

4 Vliv ionizujícího záření na lidské zdraví 38

4.1 Deterministické účinky (nestochastické účinky, reakce tkání) 38

4.2 Stochastické účinky 42

4.3 Pravděpodobnost onemocnění 44

5 Definice a normy radiační ochrany 46

5.1 Definice veličin 47

5.2 Normy ISO 54

5.2.1 ISO 20785-1 (Conceptual basis for measurements) 55

5.2.2 ISO 20785-2 (Characterization of instrument response) 55

5.2.3 ISO 20785-3 (Measurements at aviation altitudes) 55

5.2.4 ISO 20785-4 (Validation of codes) 56

6 Zdroje ozáření v běžném životě 56

6.1 Ozáření z přírodních zdrojů okolního prostředí 56

6.2 Dodatečné ozáření při lékařské diagnostice a terapii 58

6.3 Dodatečné ozáření v závislosti na pracovní činnosti 61

7 Radiační ochrana posádek letadel 63

7.1 Organizace, vyhlášky a stanovené limity 63

7.1.1 International Commision on Radiological Protection 63

7.1.2 European Atomic Energy Community 64

7.1.3 Státní úřad pro jadernou bezpečnost 65

7.2 Stanovení radiační zátěže výpočtem 66

7.3 Stanovení radiační zátěže měřením 68

7.3.1 Používané detektory 68

7.3.2 Porovnání výpočtu a měření 70

8 Zpracování rutinních výpočtů a měření 71

8.1 Efektivní dávky stanovené výpočtem u testovaného provozovatele 71

8.2 Experimentální ověření výpočtu dávek u testovaného provozovatele 75

9 Úpravy plánů služeb letových posádek 83

10 Závěr 87

Seznam literatury 89

Příloha A 93

Příloha B 94

Příloha C 97

Příloha D 104

Příloha E 107

Příloha F 121

Úvod

Naše planeta je ze všech stran vesmíru neustále ostřelována ionizujícím zářením s vysokou energií. Veškerá živá stvoření na Zemi jsou vystavena účinkům kosmického záření, zejména sekundární radiaci, která vzniká v atmosféře. Záření má vliv na zdraví. Naše planeta nám poskytuje díky své atmosféře a magnetickému poli vynikající štít. Žijeme v nízkých nadmořských výškách a jsme s rostoucí vzdáleností od magnetických pólů poměrně dobře chráněni.

S použitím letecké dopravy se ovšem tohoto přirozeného štítu dobrovolně zbavujeme a dostáváme se do míst, kde se přirozeně živé organismy nevyskytují. Posádky letadel a všichni cestující jsou při létání ve vysokých nadmořských výškách vystaveni větší intenzitě kosmického záření, než při povrchu země. Navíc však má na míru ozáření, kromě nadmořské výšky a geomagnetické polohy, vliv ještě sluneční a bouřková aktivita, převoz radioaktivních materiálů apod. Efektivní dávky se sčítají a kumulují po celý život každého jedince. Na základě jejich velikosti lze následně odhadnout, zda mohou mít vliv na naše zdraví.

Během jednoho zpátečního transatlantického letu obdržíme dávku přibližně 60 μSv. Lze jednoduše spočítat, že posádky letadel na těchto tratích mohou obdržet dávku i několik mSv za rok. Ve zprávě UNSCEAR 2000 řadí Vědecký Výbor Spojených Národů pro Účinky Atomového Záření posádky letadel na čtvrtou pozici zaměstnanců nejvíce vystavených ionizujícímu záření [1, 22]. S uzavřením posledního uranového dolu Rožná I dne 27.4.2017 se členství v letové posádce stává zaměstnáním, při kterém je možné obdržet nejvyšší průměrné dávky ionizujícího záření v České Republice.

Na doporučení Mezinárodní Komise pro Radiologickou Ochranu (ICRP) vydala Evropská Unie bezpečnostní směrnici, ve které je vystavení se ionizujícímu záření z přírodních zdrojů včetně kosmického záření uvažováno jako expozice na pracovišti. Tak je tomu právě u posádek letadel, jejichž obdržené dávky je tedy nutné monitorovat [1].

Tato diplomová práce si klade za cíl seznámit letecký personál, manažery leteckých dopravců, dispečery a plánovače služeb posádek letadel s problematikou kosmického záření a s jeho vlivem na lidské zdraví. Dále si klade za cíl ověření správnosti výpočtu efektivních dávek za pomoci měření prostorových dávkových ekvivalentů na sérii letů letadla Embraer Legacy 600 při jeho cestě okolo světa. Konečně si klade také za cíl, navrhnout leteckým provozovatelům, jak by bylo vhodné postupovat při tvorbě rozpisu služeb letových posádek s ohledem na snížení radiační zátěže.

V kapitolách 1-3 shrnuje práce základní informace o kosmickém záření. V kapitolách 4-6 uvádí vliv ionizujícího záření na lidské zdraví, definuje veličiny a porovnává efektivní dávky obyvatel v běžném životě s dávkami ozáření při zaměstnání, lékařské diagnostice apod. V kapitole 7 práce shrnuje základní informace o dozimetrii posádek letadel a uvádí zákony stanovené limity ozáření. Závěrem v kapitolách 8-9 vysvětluje zpracování rutinních výpočtů efektivních dávek na konkrétních příkladech, porovnává výpočty ozáření v závislosti na zvolených letových parametrech a navrhuje leteckým provozovatelům, jak postupovat při úpravě plánů a rozpisů služeb posádek v závislosti na jejich radiační zátěži. Pro lepší přehled a orientaci v textu jsou součástí práce také přílohy A-F. V přílohách se můžeme kromě výňatků atomového zákona a prováděcí vyhlášky seznámit s trasou letu letadla Embraer Legacy 600 na provedeném experimentu, s výpočty programem CARI-6 a CARI-7, s grafy s naměřenými dávkovými ekvivalenty a s použitými zkratkami.

1 Historie

Po objevu radioaktivity Antoine Henri Becquerelem a Marie Curie v roce 1896 se předpokládalo, že radioaktivita v zemské atmosféře je způsobena pouze zářením radioaktivních prvků ze zemské kůry, nebo radioaktivních plynů a izotopů radonu. V takovém případě by však radioaktivita se vzdáleností od povrchu Země měla klesat.

Roku 1909 německý fyzik Theodor Wulf vyvinul elektroskop, kterým se snažil dokázat, že na vršku Eiffelovy věže je větší úroveň záření než u jejích základů [2]. Princip měření byl založen na ionizaci atomů vzduchu díky průchodu nabitých částic. Vzniklé nosiče náboje pak vybíjely elektroskop a rychlost jeho vybíjení byla úměrná intenzitě ionizujícího záření [7].

V roce 1911 italský fyzik Domenico Pacini pozoroval současné změny míry ionizace nad vodní hladinou jezera a moře a v hloubce 3 m pod hladinou. Pacini tak z poklesu radioaktivity pod vodní hladinou dospěl k závěru, že určitá část ionizace musí pocházet i z jiných zdrojů než ze Země [2].

1.1 Objev kosmického záření - Victor Franz Hess

Radioaktivní záření je na Zemi neustále přítomné. Vědci na přelomu 20. století řešili dvě teorie, a to, zda pochází toto záření ze Země anebo z kosmu. Rakouský fyzik Victor Franz Hess (*Obrázek 1*) se vzhledem k teorii, že záření pochází ze Země, snažil zjistit, zda jeho intenzita bude s výškou klesat. Rozhodl se tedy, že bude létat balónem a bude měřit rozdíly intenzity záření v závislosti na výšce. Vzhledem k vyslovené teorii předpokládal, že když poletí vzhůru, tak bude rychlost vybíjení elektroskopu použitého pro měření klesat. Ovšem od určité výšky (cca 500 m) začala rychlost vybíjení opět narůstat a stejné hodnoty jako u zemského povrchu dosahovala ve výšce přibližně 1500 m. Vyslovil tak teorii, že záření může mít extraterestriální původ. Své měření prováděl převážně ve Vídni, kde také žil. Ve Vídni ovšem létal s balónem, který byl naplněný svítiplynem a nedosahoval tak větších výšek než kolem 2,5 km. Do této výšky se mu však nepodařilo prokázat žádné významné rozdíly ve změnách intenzity ionizujícího záření. Rozhodl se, že vykoná extrémní let do větší výšky s balónem plněným vodíkem. Protože byl zároveň občanem rakousko-uherské monarchie, do které spadala i Česká země, naskytla se mu příležitost využít letu balónem z Ústí nad Labem. V Ústí nad Labem byla tehdy největší chemička v Rakousko-Uhersku, která vyráběla vodík, a současně zde měli zkušenosti s lety balónem plněným vodíkem.

Hess doufal, že díky čistotě a množství vodíku v balónu bude schopen vystoupat až do výšky 6 km. Na let do takové výšky se pečlivě připravil. Měl s sebou láhve s kyslíkem, který začal

dýchat již ve výšce 4 km. Dýchání kyslíku mu však příliš nepomohlo a Hess začal ztrácet vědomí a přestával tak zaznamenávat údaje ze svých přístrojů. I když mohl ještě stoupat, protože měl stále zátěž na odhození (pytle s pískem), rozhodl se raději pro návrat. Pokud by totiž pokračoval dál, mohlo by být jeho měření znehodnoceno. Zatáhli tedy s kolegou za ventil a ve výšce 5350 m začali klesat. Žádný takový další let už nepodnikl, ale díky tomuto letu ze dne 7. srpna 1912 dokázal, že hodnoty záření začínají s výškou razantně narůstat. Po přistání konstatoval, že záření přichází z kosmu a svou teorii podložil provedeným měřením [3]. Mimo jiné Viktor Franz Hess prováděl i lety balónem během slunečního zatmění, při kterých nenaměřil žádnou změnu oproti letům za normálních podmínek. Vyvodil z toho, že kosmické záření nemá sluneční původ. Dnes však víme, že magnetické pole má schopnost změnit dráhu nabité částice. Díky tomu je pro částici slunečního původu možné dostat se do zemské atmosféry i při slunečním zatmění [7]. Victor Franz Hess se tak stal objevitelem kosmického záření. Jeho objev měl zásadní význam pro rozvoj fyziky elementárních částic a Hess za něj v roce 1936 obdržel Nobelovu cenu [3].

Obrázek 1 – Balónový let Viktora Franze Hesse [8].

1.2 Zkoumání závislosti kosmického záření na zeměpisné poloze - František Běhounek

Mezi významné fyziky, kteří se zabývali kosmickým zářením a jsou spjatí s Českem, patřil také akademik František Běhounek, který studoval radiologii pod přímým vedením paní Marie

Curie. Tento fyzik, spisovatel, dobrodruh a cestovatel, měřil a zkoumal změnu intenzity záření na změně zeměpisné polohy. Jako první Čech a specialista na kosmické záření se tak roku 1928 dostal, jako člen posádky vzducholodi Italia (*Obrázek 2*), až na severní pól. I když závislost intenzity záření na zeměpisné poloze nebyl přímo objev akademika Františka Běhounka, jeho zkoumání se proslavilo především tím, že mise byla neúspěšná. Vzducholoď Italia totiž při cestě zpět havarovala. Devět členů posádky nehodu přežilo a mezi nimi byl i František Běhounek. Trosečníci přežívali na ledové kře, dokud nebyli zachráněni sovětským ledoborcem Krasin. Během čekání na záchranu nechal akademik František Běhounek zapnuté své přístroje a jím naměřené hodnoty se po zpracování staly hlavním vědecky přínosným výsledkem celé výpravy. František Běhounek popsal cestu i ztroskotání vzducholodi Italia ve své knize *Trosečníci na kře ledové* [32].

Obrázek 2 – vzducholoď Italia (vlevo) a František Běhounek (vpravo) [32].

1.3 Objev nových částic

V roce 1935 předpověděl japonský vědec a nositel Nobelovy ceny za fyziku Hideki Yukawa, na základě teoretického výzkumu jaderných sil, existenci nových částic - mezonů. Do doby, než byly postaveny urychlovače, atmosférické kosmické záření sloužilo jako jediný zdroj urychlených částic. Díky tomu mohly být studovány reakce na subatomární úrovni a byly pozorovány teoreticky předpovězené částice. Roku 1947 teorii japonského vědce potvrdila spolupráce vědců Celila Powella, Césara Lattese a Giuseppe Occhialiniho. Díky experimentům s kosmickým zářením se jim podařilo objevit první opravdový mezon, nazývaný jako mezon π, neboli pion. K objevu využili fotografické emulze, které umístili na dlouhou dobu do hor v Pyrenejích a později i v Andách. Tam byly tyto emulze zasaženy kosmickým zářením, které

v nich zanechalo stopu. V roce 1950 byla proto Nobelova cena udělena také Cecilu Powellovi za vývoj a aplikaci detekce částic pomocí fotografických emulzí.

Při zkoumání kosmického záření objevili v roce 1936 vědci Carl D. Anderson a Seth Neddemayer negativně nabité částice, které se při průchodu magnetickým polem stáčely pod menším úhlem než elektrony, ale pod větším úhlem než protony. Vědci předpokládali, že tyto částice mají stejnou velikost negativního elektrického náboje jako elektron. Aby došlo k rozdílu v zakřivení trajektorie při průchodu magnetickým polem, musely mít tyto částice hmotnost větší než elektron, ale menší než proton. Carl D. Anderson původně částici nazval "mezotron". Ze začátku se domnívali, že se jedná o částici předpovězenou vědcem Hideki Yukawou, ale později se ukázalo, že neodpovídá všem parametrům. Po objevení mezonu π roku 1947 byl mezotron přejmenován na mezon μ. Částice nazývané mezon tak označovaly jakékoliv částice mající hmotnost nižší než proton, ale větší než elektron. Po objevu dalších mezonů bylo zjištěno, že se mezon μ svými vlastnostmi značně odlišuje od ostatních, a tak byl po zavedení Standardního Modelu Částic přejmenován na mion.

Neutrony byly sice objeveny nezávisle na kosmickém záření, ale je méně známou skutečností, že na Zemi můžeme detekovat neutrony, které mají svůj původ ve Slunci [35]. Jedná se pouze o vysoko energetické neutrony, protože volný neutron je nestabilní. Rozpadá se se střední dobou života 14,7 minuty a vzhledem ke vzdálenosti Země - Slunce se všechny pomalé neutrony rozpadnou na proton, elektron a elektronové antineutrino dříve, než k Zemi dolétnou. Objev těchto energetických neutronů ze Slunce v měřeních na zemském povrchu je spjat se jménem českého vědce žijícího na Slovensku - Prof. Karla Kudely [36], který se zasadil o provoz a fungování neutronového monitoru v observatoři na Lomnickém Štítě.

Některé částice kosmického záření mají ty nejvyšší energie, které kdy vůbec byly pozorovány. Přišel na to Pierre Auger, který umístil částicové detektory vysoko v Alpách. Zjistil, že dva detektory umístěné daleko od sebe (desítky metrů) zaznamenávají signály od přicházejících částic přesně v tom samém čase. Auger tím objevil tzv. rozsáhlé atmosférické spršky (extensive air showers - EAS), tj. sekundární subatomové částice generované při srážkách primárních vysokoenergetických částic s atomy, resp. molekulami ve vzduchu. Na základě těchto měření Auger přišel k závěru, že EAS jsou iniciované primárními částicemi s energií až 10^{15} eV - deset milionkrát vyšší, než měly částice pozorované do té doby. Dnes je největším zařízením na pozorování EAS projekt nazvaný Pierre Auger Observatory se sítí masivních detektorů umístěných na náhorní planině v Argentině v nadmořské výšce 1330 m – 1620 m. Nejvyšší

energie kosmického záření $3x10^{20}$ eV byla naměřena v roce 1991 na experimentu Fly's Eye v USA a byla nazvána Oh-My-God particle.

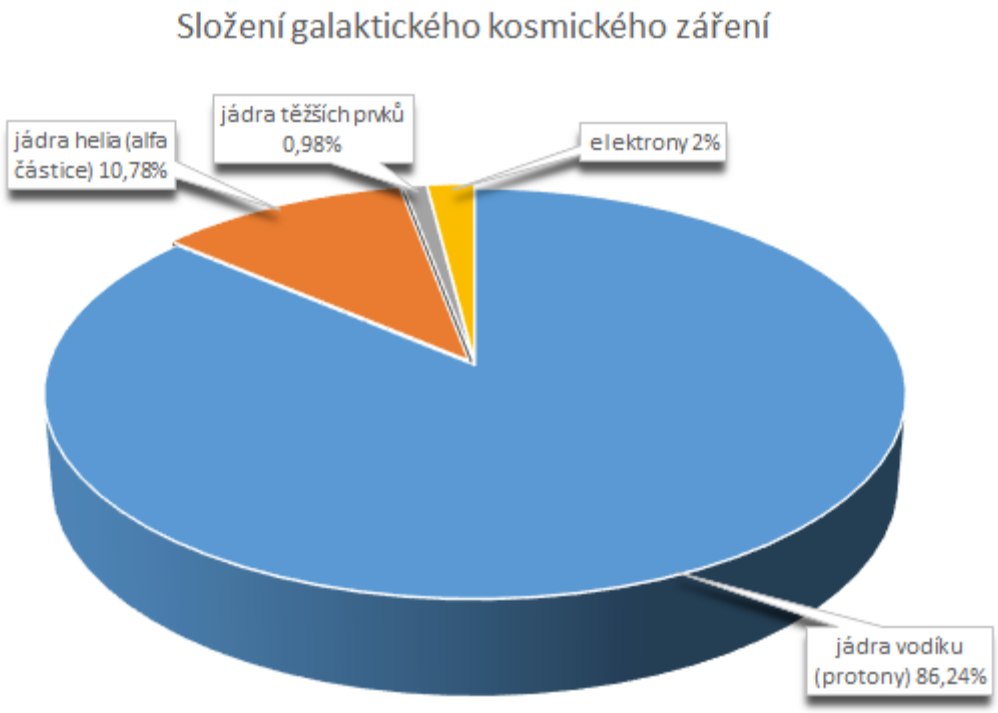
2 Kosmické záření a jeho původ

Jednou z nejvýznamnějších složek přírodního radiačního pozadí je právě kosmické záření. Jedná se o vysokoenergetický proud částic, který do atmosféry proniká z kosmického prostoru. Takovéto záření označujeme jako primární kosmické záření s hustotou okolo 20 až 40 tisíc částic na 1 m^2. Tato hustota se vztahuje pouze na částice, které proniknou až do atmosféry a neskončí v radiačních pásech Země. Primární záření dále interaguje (sráží se) s atomovými jádry v zemské atmosféře. Díky těmto srážkám vznikají další a další částice. Celá reakce se rozvětvuje a výsledkem je pak sprška takzvaného sekundárního kosmického záření dopadajícího na povrch Země [4]. Toto záření má vliv na všechny živé bytosti na Zemi a zvláště významně se podílí na ozáření posádek letadel, kosmických lodí a vesmírných stanic. Z hlediska radiační zátěže člověka na Zemi a v jejím blízkém okolí jsou nejdůležitější tři složky kosmického záření:

a) galaktické kosmické záření,
b) sluneční kosmické záření,
c) záření van Allenových (radiačních) pásů Země.

2.1 Galaktické kosmické záření

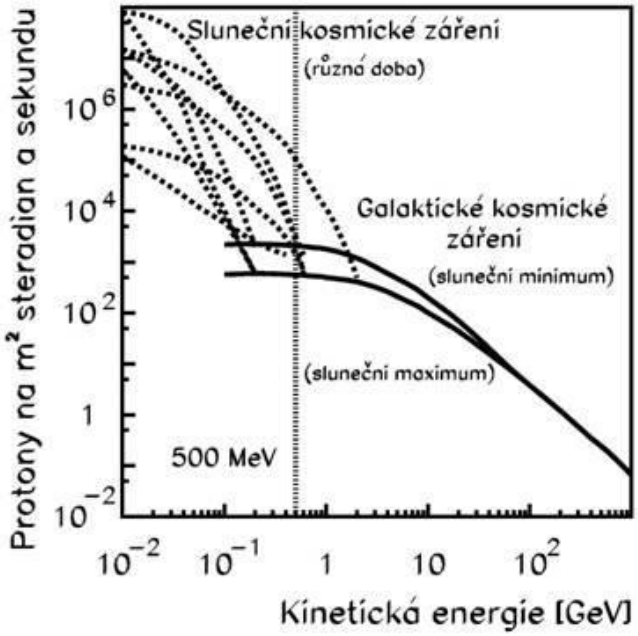
Galaktické kosmické záření (GKZ) k nám přichází z hlubokých oblastí vesmíru mimo naší sluneční soustavu. GKZ je považováno za mezihvězdnou hmotu, která je urychlena v důsledku exploze hvězd (supernov). V prostředí sluneční soustavy je GKZ složeno z jader (∼98 %) a elektronů (∼ 2%). Přibližně 88 % jader tvoří protony, ∼11 % jádra helia (alfa částice) a ∼1 % jádra všech známých těžších prvků [1]. Složení GKZ můžeme vidět na *obrázku 3*.



Obrázek 3 - Složení galaktického kosmického záření v prostředí sluneční soustavy [1].

Pole GKZ v mezihvězdném prostoru se v časovém úseku milionu let mění jen velmi málo a má stejnou intenzitu bez ohledu na směr měření – je izotropní. Dávkový ekvivalent z GKZ v mezihvězdném prostoru dosahuje hodnot přibližně 1 Sv za rok. Energetické spektrum GKZ jen málo závisí na typu částice a byla u něj naměřena nejvyšší energie 10^{20} eV [5].

Maximum počtu částic GKZ je u energie zhruba 10^{3} MeV, poté klesá počet částic s třetí mocninou energie. Například hustota částic s energií 10^{3} MeV je 104 m^{-2} s^{-1} (zhruba 3 x 10^{11} m^{-2} rok^{-1}). U energie 10^{10} MeV je už hustota částic přibližně 3 m^{-2} rok^{-1} a pro energii 10^{13} MeV je hustota částic pouze 10^{-6} m^{-2} rok^{-1} (přibližně jedna událost na km^{2} za rok) [7].



Obrázek 4 – Počet protonů v závislosti na energii pro variabilní situaci slunečního záření (přerušované čáry) a počet protonů v závislosti na minimu a maximu GKZ (plné čáry) [7].

V blízkosti Země dochází k interakcím mezi GKZ, magnetickým polem Země, zemskou atmosférou a slunečním větrem. V závislosti na těchto faktorech dochází k variaci v jeho intenzitě a složení. Sluneční vítr, který se skládá z nízkoenergetických protonů a elektronů, funguje jako stínění a znesnadňuje svým magnetickým vlivem vstup GKZ do blízkosti planety Země [5]. GKZ s energií do 10^2 MeV nepronikne přes sluneční vítr. Částice s energií 10^3 MeV a vyšší proniknou naopak i zemským magnetickým polem a dostanou se do atmosféry [7]. Intenzita slunečního větru je významně vyšší v období vyšší sluneční aktivity a stínění v tomto období je ještě silnější. V období nižší sluneční aktivity je intenzita slunečního větru nižší a díky tomu je zase naopak intenzita GKZ a úroveň ozáření vyšší. Takovéto sluneční cykly se opakují s periodou přibližně 11 let [5].

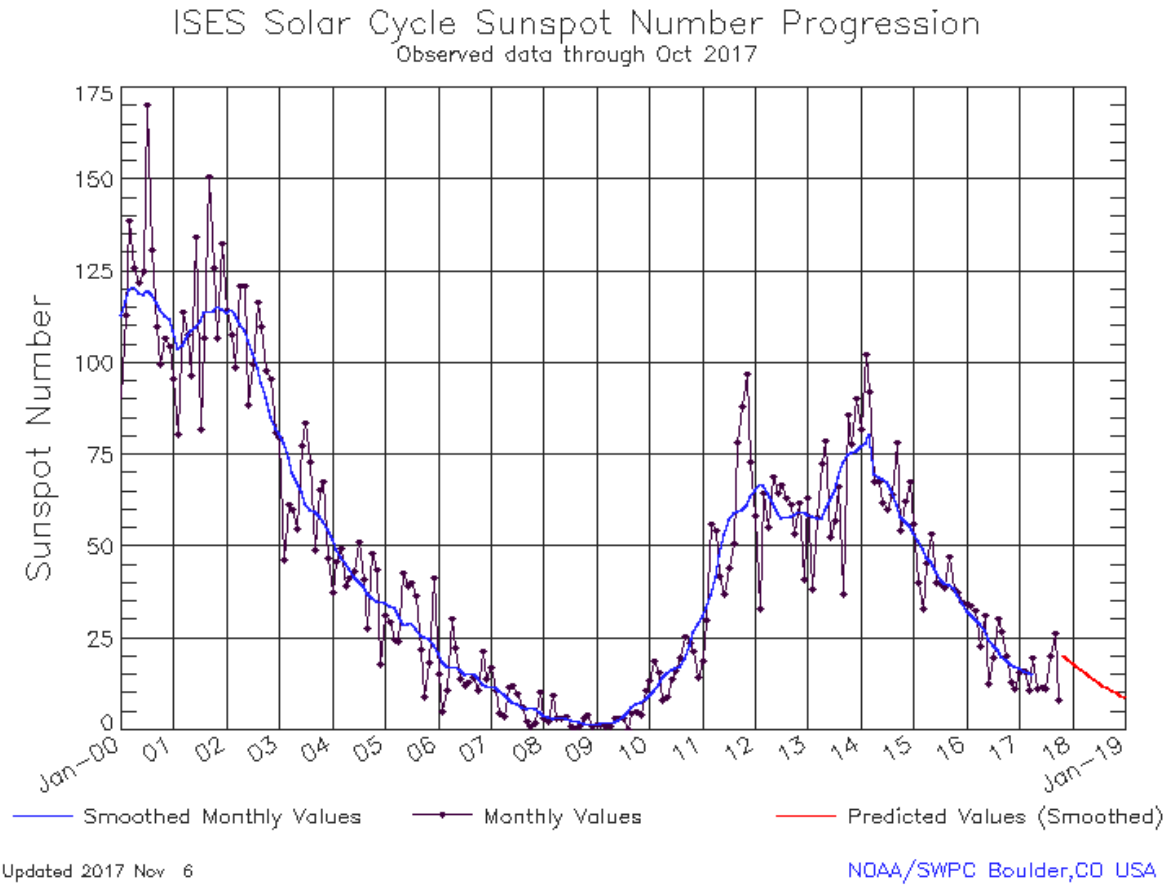
2.2 Sluneční kosmické záření

Radiační zátěž populace na Zemi způsobená slunečním kosmickým zářením pochází převážně ze slunečních událostí - výronů koronální hmoty (Coronal Mass Ejection - CME) a erupcí na Slunci (Solar Flares - SF). Doba trvání události výronu koronální hmoty se pohybuje v řádu dní a je pro ni typická vysoká fluence[1] protonů. Sluneční události ve formě erupcí trvají obvykle v řádu hodin a je pro ně typická vysoká fluence elektronů. Vznik slunečních událostí, jejich

[1] Fluence vyjadřuje množství částic proudících prostorem a definuje se jako podíl počtu částic, které dopadly v daném bodě prostoru na kouli, a obsahu jejího příčného řezu.

energie a tok částic není zatím možné předpovědět. Víme však, že častěji se vyskytují v období maximální sluneční aktivity a nejintenzivnější události pozorujeme převážně ke konci tohoto období [5]. Sluneční cyklus je možné sledovat neutronovými monitory na Zemi, nebo odvodit z počtu slunečních skvrn. V minimu sluneční aktivity máme maximální odezvu neutronového monitoru a nejmenší počet skvrn a naopak. Může se tak stát, že v průběhu sluneční události bude emitované záření nasměrované i k naší planetě Zemi. Pokud Zemi zasáhnou, prudce se zvýší odezva neutronového monitoru (tzv. Ground Level Enhancement), a pokud Zemi minou, odezva neutronového monitoru se sníží (tzv. Forbushovská deprese) [16].

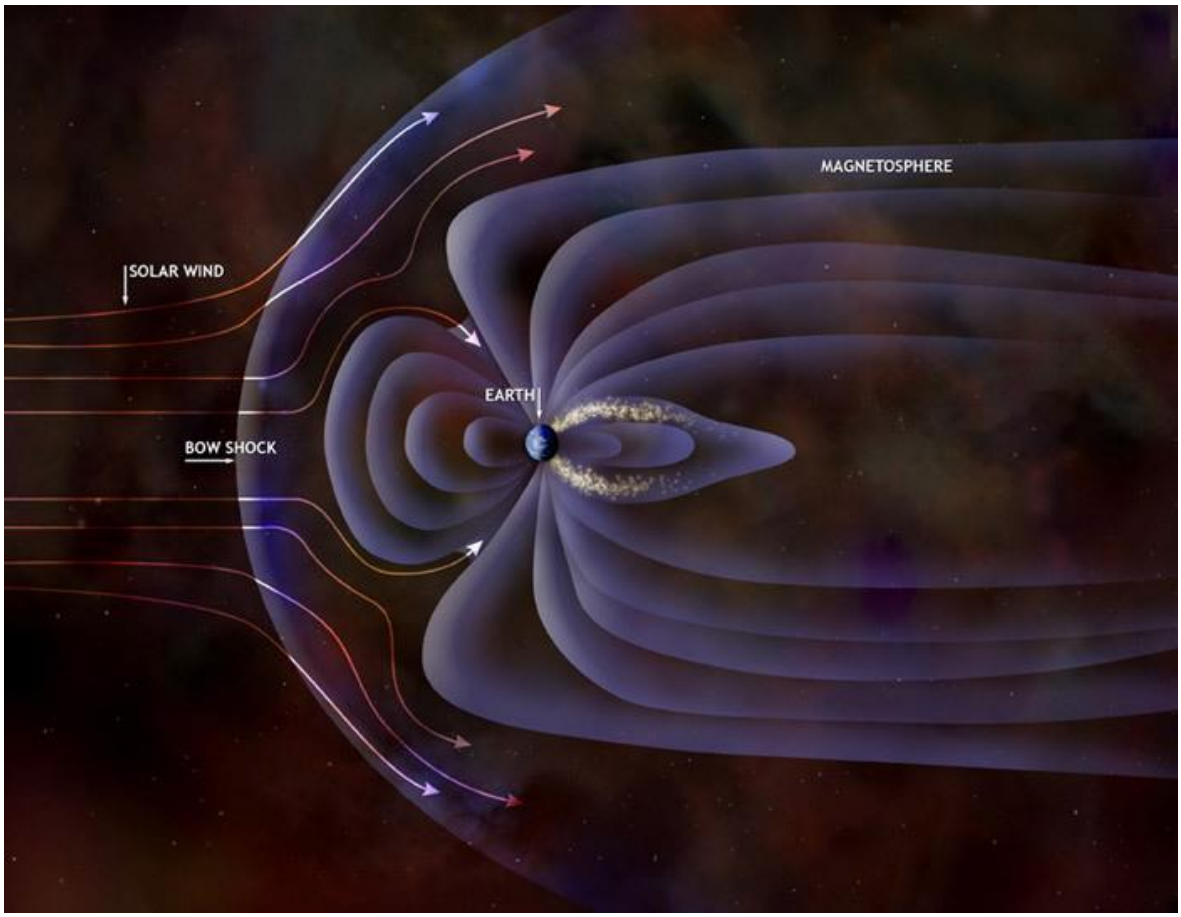
Sluneční kosmické záření (SKZ) se skládá převážně z protonů (99 %). Těžší nabité částice jsou v SKZ zastoupeny přibližně jen z 0,1 %. Hodnoty energií částic SKZ jsou velmi variabilní a většinou nepřesahují 100 MeV. Vyskytují se ovšem i velmi silné erupce, kde maximální energie dosáhla až 1 GeV [5]. Sluneční kosmické záření je tak většinou zadrženo magnetickým polem Země a zůstává ve van Allenových radiačních pásech. V případě intenzivní sluneční události může záření vzrůst o mnoho řádů a může dojít k vyvržení velkého množství protonů. Většina událostí nastává okolo slunečních skvrn, kde se vyvine intensivní magnetické pole ze slunečního povrchu do korony. Při tom jsou vyvrženy dvě základní třídy protonů určené jejich energií. Protony s největší energií přilétají k Zemi první přibližně 5-20 minut po světelném záblesku. Energie protonů v tomto případě dosahuje 200-300 MeV a protony se pohybují přibližně 60 % rychlosti světla. Druhá třída protonů přichází po více než 30 minutách. Tyto protony pak mají energii do 100 MeV. Ve výsledku sluneční kosmické záření přispívá k celkovému ozáření posádek přibližně pouze 5 % [7]. Na *obrázku 5* vidíme relativní čísla slunečních skvrn v průběhu slunečního cyklu [6].



Obrázek 5 – Relativní počet slunečních skvrn v průběhu slunečního cyklu [6].

2.3 Van Allenovy radiační pásy

Kromě zemské atmosféry je naše planeta chráněna i magnetickým polem, které má dipólový charakter. Toto magnetické pole způsobuje obtékání částic s energií do několika stovek MeV (energie SKZ). Interakcí slunečního větru s magnetosférou ve směru ke Slunci vzniká rázová vlna a ve směru od Slunce ohon (*obrázek 6*). Magnetosféra má průměr přibližně 20-30 poloměrů Země ve směru ke Slunci a až 100 poloměrů Země ve směru od Slunce [7].



Obrázek 6 – Magnetosféra planety Země [33].

V určitých vzdálenostech od povrchu Země jsou některé protony a elektrony zachyceny magnetickým polem Země. Na tyto nabité částice působí tzv. Lorentzova síla. Částice pak vykonávají tři různé pohyby:

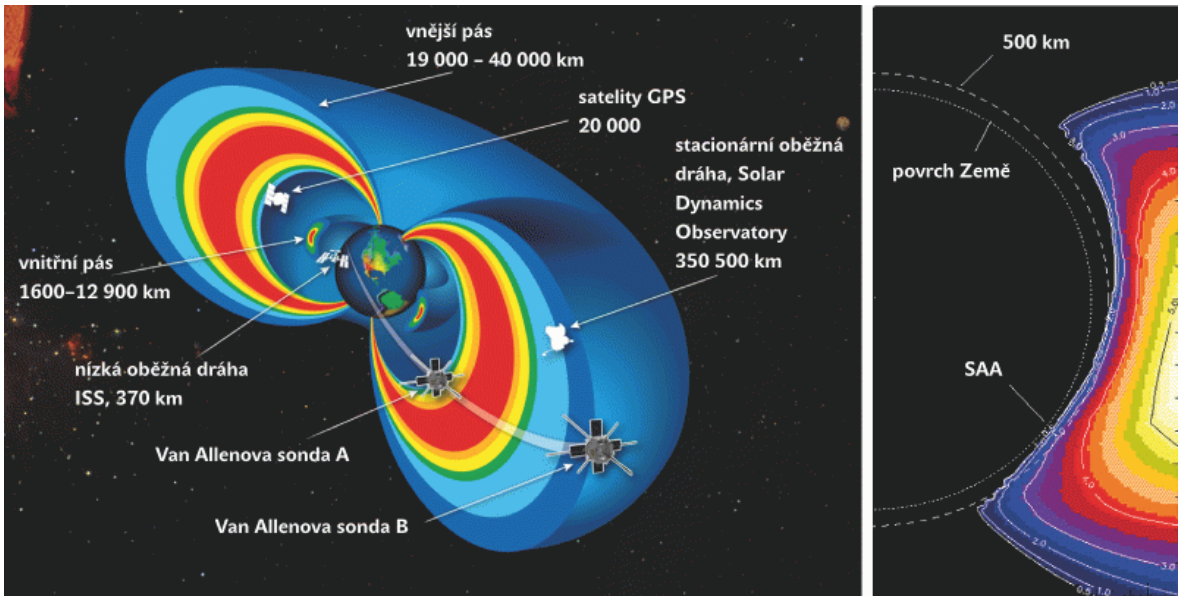
a) posuvný ohyb podél magnetických siločar (severojižní pohyb),
b) pohyb okolo magnetické siločáry s periodou několika mikrosekund až milisekund (cyklotronový pohyb),
c) kolmý pohyb na rovinu magnetického poledníku (posun protonů na západ a elektronů na východ) [16].

Tyto zachycené částice tvoří radiační pásy, obklopující naši planetu, a nazývají se Van Allenovy radiační pásy podle jejich objevitele, amerického vědce a astronauta, Jamese van Allena. Ten se na počátku kosmické éry zasloužil o jejich objev umístěním Geigerova-Müllerova počítače do sondy Explorer 1, která následně zaznamenala existenci vnitřního pásu. Vnější pás později zaznamenala sovětská měsíční sonda Luna 1 [7].

Geigerův-Müllerův počítač byl schopen zaznamenat každou částici zvlášť na rozdíl od elektroskopu, který byl schopný detekovat pouze přítomnost záření [9].

Energie částic zachycených v pásech se mění s časem a dosahuje u protonů i několik stovek MeV a u elektronů několik stovek keV. Vzdálenost radiačních pásů od zemského povrchu je 400 – 50 000 km. Vnější radiační pás má svůj střed vzdálený přibližně 20 tisíc km od zemského povrchu a vnitřní pás přibližně 3 tisíce km [5]. Vzdálenost pásů od zemského povrchu se liší se zeměpisnou šířkou tak, že nejblíže se dostávají v blízkosti magnetických pólů. Zhuštěné magnetické siločáry u pólů vytvářejí efekt magnetického zrcadla, a proto jím většina částic nemůže proniknout. Částice se tak od zrcadla odrazí zpět a putují k druhému pólu [16]. V případě silnější sluneční události proniknou částice v blízkosti pólů hlouběji do atmosféry, kde narážejí do molekul a atomů vzduchu. Částice tím předají atomům část své kinetické energie a atomy přejdou do excitovaného stavu. Při návratu na základní energetickou hladinu dojde k emisi fotonu viditelného světla – tzv. polární záři. V těchto pásech je úroveň radiace velmi silná. Plochou o velikosti 1 cm^2 může procházet až 50 000 částic za sekundu [7]. Vnitřní pás je nebezpečný pro vesmírné stanice, kosmonauty a družice kroužící okolo Země, zatímco vnější pás je nebezpečný spíše pro meziplanetární lety.

Střed magnetického pole Země je posunut vzhledem k zemskému středu. Magnetická osa je také odchýlena od osy rotace Země. Tato skutečnost má za následek přiblížení vnitřního van Allenova radiačního pásu k Zemi na jedné straně naší planety. Tím je intenzita a složení radiace v dané výšce narušena a vzniká zde oblast, kterou nazýváme Jihoatlantická anomálie. Střed této anomálie je přibližně 800 km na východ od města Porto Alegre v Brazílii. V tomto místě sestupuje vnitřní radiační pás až do výšky 400 km od zemského povrchu. Pro dráhy družic a kosmických letů tak může přispívat k celkové expozici až polovinou [5]!



Obrázek 7 – Van Allenovy radiační pásy a Jihoatlantická anomálie [10].

2.4 Blesky a gama záblesky v zemské atmosféře

Bouřkové mraky vyzařují rentgenové záření i gama záření. Tento jev je spojován převážně s bleskovou aktivitou. Každé komerční letadlo je v průměru přibližně jednou za 3000 letových hodin zasaženo bleskem. Ve vzácných případech je blesk spojen s velkým přechodovým pulsem gama paprsků. Od roku 1944 byly z kosmických prostředků pozorovány velké záblesky gama paprsků, vyzařované směrem nahoru ven z naší atmosféry, nazvané terestrické záblesky gama záření (Terrestrial Gamma-ray Flashes - TGF). TGF jsou stále předmětem výzkumu, o jejich původu toho moc nevíme. Předpokládá se, že jak u klasických blesků, tak i v případě TGF, se při výbojích vyskytují vysokoenergetické emise záření, které vznikají elektromagnetickými interakcemi elektronů, pohybujících se ve vzduchu rychlostí blízké rychlosti světla, s atomovými jádry vzduchu. Obecně se tomuto typu záření říká brzdné záření. Vzniká při pohybu nabité částice látkovým prostředím, ve kterém ztrácí svou rychlost. Energie, kterou částice ztratí, se vyzáří ve formě brzdného záření.

Existuje však stále mnoho neznámých, které zahrnují mimo jiné četnost výskytu TGF ve vztahu k bouřkovým bleskům, vliv letadel na vznik blesků, frekvenci a délku oblastí pro urychlení elektronů v bouřkách, atp.

Odhadovaná dávka, kterou by mohl jedinec obdržet v letadle zasaženém TGF, nebo energetickými elektrony blesků, je přibližně 30 mSv. Předpokládá se, že existují i velmi silné blesky, při kterých by bylo možné obdržet i dávku až 100 mSv. Značný počet cestujících a posádek letadel může obdržet poměrně velkou dávku radiace, která převyšuje průměrné

hodnoty dávek od kosmického záření, bylo-li by letadlo vystaveno působení TGF [18]. Přímá měření v letadle nebyla zatím provedena. Měření záření, které je generováno v bouřkových mracích, se provádí pomocí sítě objemných pozemních detektorů SEVAN, umístěných, mimo jiné, na observatoři na Lomnickém štítě ve Vysokých Tatrách na Slovensku. Další instalace právě probíhá i na Milešovce v ČR.

3 Šíření kosmického záření

Jak bylo zmíněno, přirozená radioaktivita byla objevena H. Becquerelem, čímž počátek jaderné fyziky datujeme od roku 1896. Příčinou přirozené radioaktivity je nestabilita a přeměny radioaktivních jader atomů některých látek.

3.1 Druhy záření obecně

Obecně můžeme radioaktivní záření dělit na tzv. přirozenou radioaktivitu a ostatní druhy záření. Mezi nejznámější druhy záření patří tyto tři:

a) Záření alfa – α

   Zářením α jsou kladné dvojmocné ionty helia, které jsou uvolňovány z jader atomů rozpadajících se prvků. Záření s sebou odnáší dva protony a dva neutrony. Prvek, který vyzářil částici α, se přemění na prvek s nižším nukleonovým číslem A-4 a protonovým číslem Z-2.

b) Záření beta – β

   Druhým typem záření je rozpad β. V tomto případě dochází k přeměně jádra vyzářením elektronu nebo pozitronu. Pozitronem rozumíme kladný elektron. Záření β můžeme dělit dále na dva druhy. Zářením β^- rozumíme záření, při kterém se z jádra uvolňují elektrony a protonové číslo se změní na Z+1. V případě záření β^+ se z jádra uvolní pozitron a protonové číslo se změní na Z-1.

c) Záření gama – γ

   Třetím typem záření je pronikavé elektromagnetické záření, při kterém se jádro ve vybuzeném energetickém stavu zbavuje energie vyzářením fotonu záření γ v důsledku přeskupení nukleonů v radionuklidu. Jádro se nemění, ale přeměna γ nastává většinou po přeměně α nebo β, jelikož při nich dojde k vybuzení jádra. Zářením γ tedy nedochází k přeměně prvku, ale dochází pouze ke snížení vnitřní energie nukleonů v jádře.

Při těchto procesech vzniká záření, které se skládá z jader helia, elektronů, pozitronů nebo fotonů záření gama. Jsou to procesy, v přírodě běžné, spojené s rozpadem jader přítomných v látkách. Proto se radioaktivitě α, β, γ společně říká přirozená radioaktivita.
Při různých reakcích vyšších energií však může vznikat i záření složené z protonů, neutronů a těžších atomových jader. Tak je tomu právě u kosmického záření, kde jsou obsaženy protony a těžší ionty. Neutrony dále vznikají jako sekundární složka díky srážkám KZ s jádry atomů obsažených v atmosféře [7].

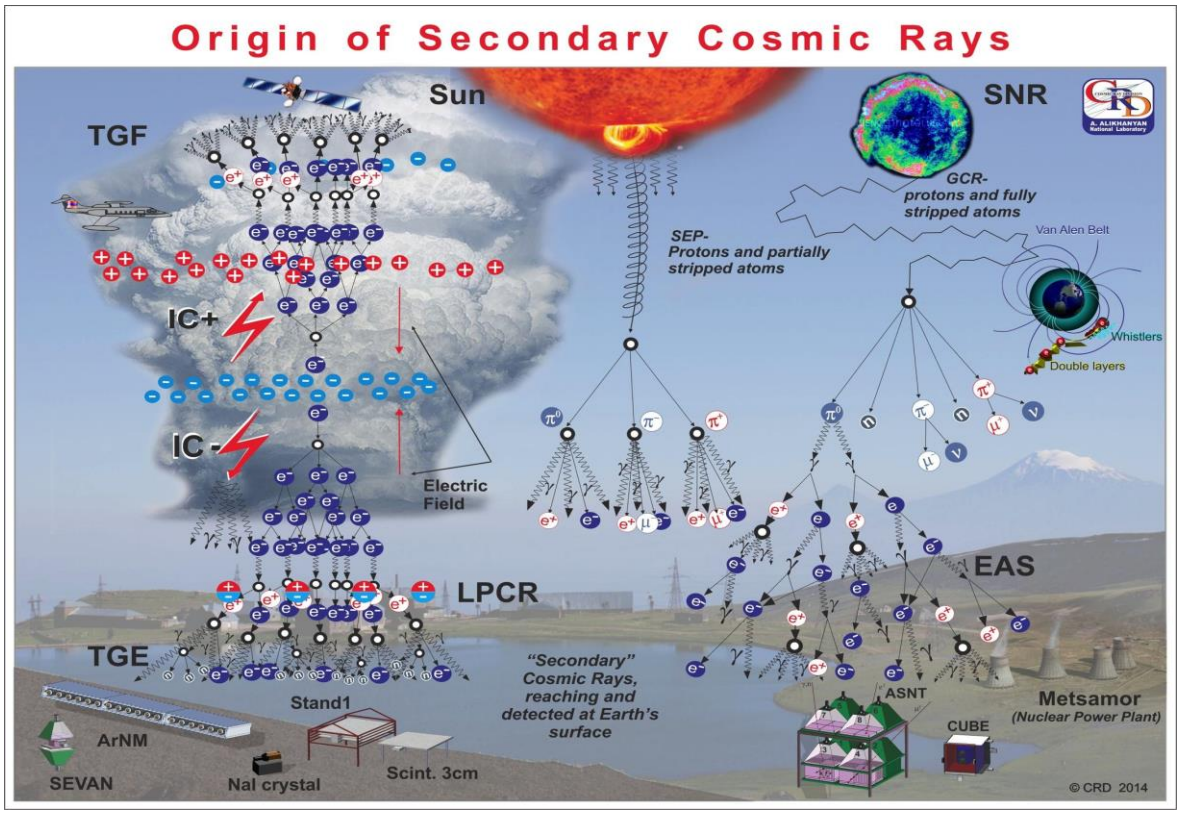
3.2 Průchod kosmického záření zemskou atmosférou

Částice kosmického záření, které nejsou zachyceny ve Van Allenových radiačních pásech (s energií vyšší než přibližně 10^3 MeV), se dostávají do zemské atmosféry. Zemská atmosféra by jistě zadržela i částice s nižší energií, takže reálný ochranný význam magnetického pole Země je relativně malý. Zemská atmosféra má sama o sobě zásadní význam pro ochranu před kosmickým zářením. Síla jejího štítu spočívá především v tom, že je dostatečně hustá. Sloupec atmosféry o ploše 1 m^2 má hmotnost přibližně 10^4 kg. Sekundární složka kosmického záření vzniká právě díky ochraně Země její atmosférou [7].
Částice kosmického záření, po vstupu do zemské atmosféry, interagují s atomy a molekulami vzduchu. Protony a jádra se tak srážejí s jádry v atmosféře a dochází k tříštění jader. Těžší jádra pronikají jen do vnějších vrstev atmosféry, částice vzniklé tříštěním zejména primárních protonů se dostávají až k zemskému povrchu [5]. Při tříštění jader je vyraženo značné množství protonů a neutronů a vznikají i nabité a neutrální mezony - π (piony). Tyto nově vzniklé částice mohou mít stále dostatek energie na to, aby dále interagovaly s jádry v atmosféře a způsobovaly další tříštivé reakce. Neutrální piony se rozpadají tak rychle, že je velmi nepravděpodobné, že by zasáhly další částice. Protony, neutrony a nabité piony interagují silnými jadernými silami a patří k částicím, které označujeme hromadně jako hadrony. Velké množství takto vzniklých částic nazýváme ***hadronovou sprškou***. Při rozpadu nabitých pionů vznikají miony - μ (kladné, záporné, neutrina a antineutrina). Při rozpadech mionů vznikají elektrony. Miony jsou částice, které se nejvíce podílejí na ozáření v nízkých nadmořských výškách. Neutrina a antineutrina procházejí hmotou téměř bez účinku a obvykle se ve výpočtech dávek neuvažují. Při rozpadu neutrálních pionů vznikají nejčastěji dva fotony záření gama - γ. V *tabulce 1* vidíme rozpad pionů a mionů na jednotlivé částice a poločas jejich rozpadu.

Tabulka 1 - Rozpad pionů a mionů a poločas jejich rozpadu [18].

Částice	Produkt rozpadu částice	Poločas rozpadu [s]
kladný pion	1 kladný mion + 1 mionové neutrino	$1{,}8 \times 10^{-8}$
záporný pion	1 záporný mion + 1 mionové antineutrino	$1{,}8 \times 10^{-8}$
neutrální pion	2 fotony záření gama	6×10^{-17}
kladný mion	1 pozitron + 1 elektronové neutrino + 1 mionové antineutrino	$1{,}5 \times 10^{-6}$
záporný mion	1 elektron + 1 elektronové antineutrino + 1 mionové neutrino	$1{,}5 \times 10^{-6}$

Po vstupu fotonu nebo elektronu s vysokou energií do zemské atmosféry je průběh srážek jiný, než je tomu u protonů a jader. Při interakci fotonu s jádrem se foton v poli jádra přemění na pár elektron a pozitron. Při interakci elektronu s jádrem se elektron naopak v poli jádra brzdí a vyzáří fotony brzdného záření. Vznikající elektrony, pozitrony a fotony mohou mít stále dostatečně vysokou energii na to, aby produkovaly další elektrony a pozitrony nebo brzdné fotony. Vzniklá směs značného množství elektronů, pozitronů a brzdných fotonů vytváří ***elektromagnetickou sprškou*** [7].



Obrázek 8 – Zdroje ionizujícího záření v atmosféře: TGF – terrestrial gamma-ray flashes, TGE – Thunderstorm ground enhancements, SEP – solar energetic particles, GCR – galactic cosmic ray, EAS – Extended Air Showers (sekundární složka kosmického záření dosahující až k povrchu Země) [31].

Sekundární složku kosmického záření lze také rozdělit podle její schopnosti pronikat materiálem na tvrdou a měkkou složku. ***Měkká složka*** se skládá z elektronů, pozitronů, protonů s nižší energií a fotonů. Tuto složku je možné odstínit už 10 cm olova. ***Tvrdou složku*** tvoří především miony s energii dosahující 600 MeV a dále mnohem menší počet protonů a pionů s velmi vysokou energií. Tato složka je schopna proniknout až do hloubky 1 km a nelze ji odstínit ani několik metrů silnou vrstvou olova [7,18].

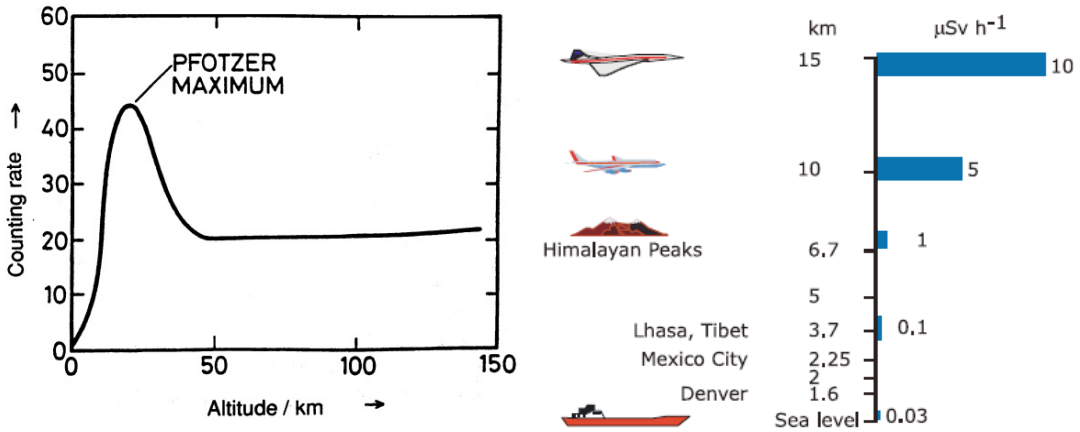
Složení pole a úroveň ozáření sekundární složky kosmického záření se mění se vzdáleností od zemského povrchu a s geomagnetickou polohou, viz. následující kapitoly.

3.3 Závislost na vzdálenosti od povrchu Země

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, částice kosmického záření po vstupu do atmosféry interagují s atomy a molekulami, čímž vzniká sekundární složka záření. Úroveň tohoto záření klesá s klesající výškou a je nejnižší u zemského povrchu. Tento průběh je nelineární a maximum intenzity se nachází ve výšce ~20 km (hustota atmosféry 50 g cm^{-2}), viz. *obrázek 9* vlevo. Bod s nejvyšší intenzitou nazýváme Pfotzerovým maximem. Pfotzerovo maximum bylo

objeveno v třicátých letech dvacátého století skupinou německých vědců vedených prof. Erichem Regenerem, podle kterého však nemohlo být v té době pojmenováno, neboť byl židovského původu. Název tedy získalo podle jeho studenta Georga Pfotzera, jenž se na objevu spolupodílel. Dle dat vypočítaných v době slunečního maxima roku 1989 a slunečního minima v roce 1996 dosahovalo Pfotzerovo maximum 17 km u rovníku. Ve vysokých zeměpisných šířkách v době slunečního maxima 20,7 km a 23,5 km v době slunečního minima.

Pouze nadzvuková letadla a kosmické prostředky se pohybují ve výškách okolo a nad Pforetzovým maximem, proto se pro běžné dopravní lety uvažuje pouze rostoucí intenzita kosmického záření v závislosti na stoupající nadmořské výšce, viz *obrázek 9* vpravo [1,11,18].



Obrázek 9 - Průběh intenzity kosmického záření v závislosti na nadmořské výšce (vlevo) [11], intenzita kosmického záření v závislosti na nadmořské výšce (vpravo) [1].

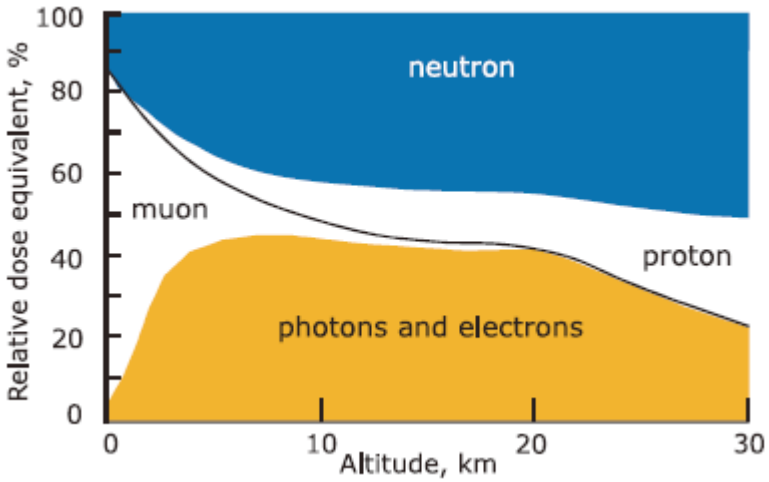
Na úrovni moře je dle komise OSN (UNSCEAR 1998) průměrná roční efektivní dávka z kosmického záření přibližně 260 μSv pro miony a 26 μSv pro neutrony, což je zhruba 15 % celkové roční dávky ozáření populace z přírodního pozadí. Se stoupající výškou intenzita kosmického záření narůstá, protože se štít, který nám atmosféra poskytuje, zmenšuje. V mírných zeměpisných šířkách (40-60°N) dosahuje intenzita v nadmořské výšce 8 km (FL260) hodnot přibližně 3 μSv h^{-1} a v nadmořské výšce okolo 12 km (FL 390) dosahuje přibližně dvojnásobných hodnot.

K radiační zátěži posádek letadel přispívají z více než 90 % sekundární částice. Spektrum částic a jejich příspěvek k dávkovému ekvivalentu v závislosti na vzdálenosti od povrchu Země vidíme na *obrázku 10*. Na povrchu Země je největší příspěvek spektra částic dán miony,

částicemi s nízkým lineárním přenosem energie (LPE)[2]. Menší měrou přispívají k zátěži neutrony, které představují komponentu s vysokým LPE. S rostoucí nadmořskou výškou se převážně pro neutrony zvyšuje dávkový ekvivalent. Budeme-li se tedy pohybovat například na horách ve výškách kolem 3 km nad mořem, bude spektrum neutronů podobné jako na palubě letadla.

Ve výškách letů dopravních letadel je pro mírné zeměpisné šířky spektrum částic složeno přibližně z 55 % neutronů, 15 % protonů, 20 % elektronů a pozitronů, 5 % mionů a 5 % fotonů (*obrázek 10*). Příspěvek mezonů je nepatrný a představoval by na obrázku jen velmi malou plochu o tloušťce čáry.

V nadmořských výškách větších než desítky kilometrů přispívají k ozáření především protony. Charakter a úroveň ozáření kosmických prostředků na oběžné dráze Země je dán primárním zářením slunečního nebo galaktického původu. Vliv na příspěvek jednotlivých částic k dávkovému ekvivalentu má skutečnost, o jakou složku kosmického záření se jedná. U galaktického kosmického záření dominují pro tenká stínění těžké nabité částice, pro silnější stínění dominují protony. V případě zátěže od slunečního kosmického záření dominují také protony. Na oběžné dráze protínající Jihoatlantickou anomálii se bude silně projevovat příspěvek vnitřního radiačního pásu Země. V případě meziplanetárního letu je nutné brát v úvahu průlet radiačními pásy Země. Hodnota dávkového ekvivalentu při průletu vnitřním radiačním pásem může být pro protony až okolo 8 Sv/den a pro elektrony až téměř 3000 Sv/den [1, 5].



Obrázek 10 - Spektrum částic dávkového ekvivalentu v závislosti na nadmořské výšce [1].

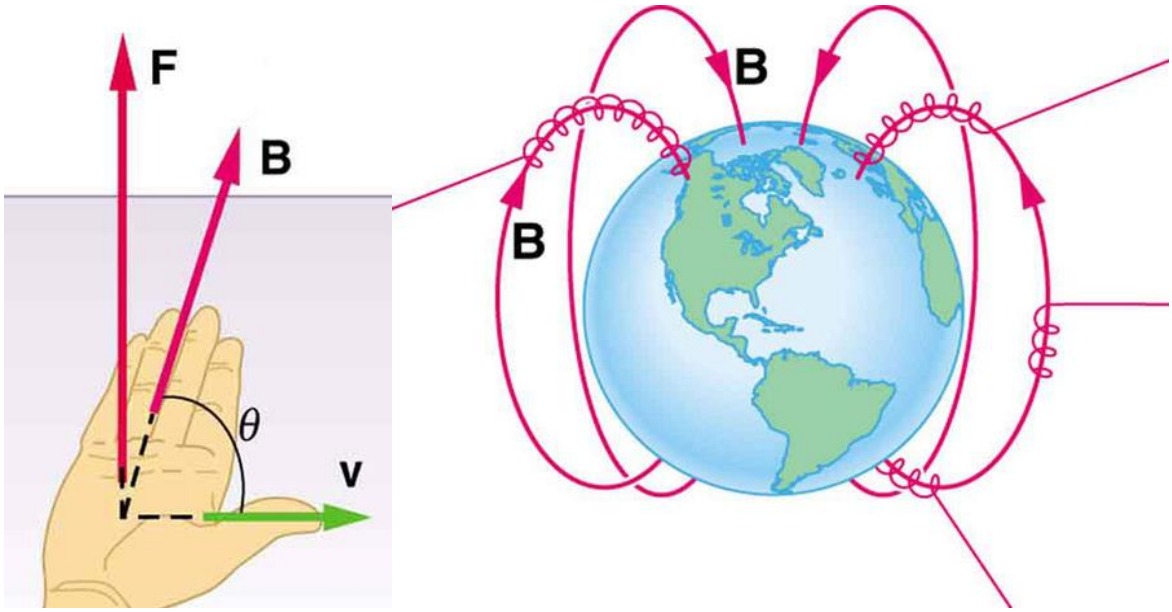
[2] LPE - Lineární přenos energie je nestochastická fyzikální veličina, která popisuje hustotu předávání energie prostředí ionizujícím zářením.

3.4 Závislost na geomagnetické poloze

V blízkosti Země je galaktické kosmické záření ovlivňováno zemským magnetickým polem a jeho směr je dán směrem jeho siločar. Obvykle se značí šipkami, které směřují od severního magnetického pólu (leží v blízkosti geografického jižního pólu) k jižnímu magnetickému pólu (leží v blízkosti geografického severního pólu). Geomagnetické pole Země není stálé a jeho geografická poloha se v čase mění. Magnetická polarita Země se v nepravidelných intervalech přibližně miliónu let měnila.

V současnosti magnetické pole Země slábne tak, že zhruba za 2000 let bude již neměřitelné, což může být jen krátkodobý, nikoli trvalý trend. Pokud by magnetické pole Země zaniklo úplně, zmizely by zároveň Van Allenovy radiační pásy Země. Dávky od galaktického kosmického záření by se celosvětově zvýšily na přibližně stejnou úroveň, jako jsou nyní v okolí magnetických pólů.

Směr síly magnetického pole na pohybující se nabitou částici je kolmý na směr jejího pohybu a na směr magnetických siločar viz. *obrázek 11*.



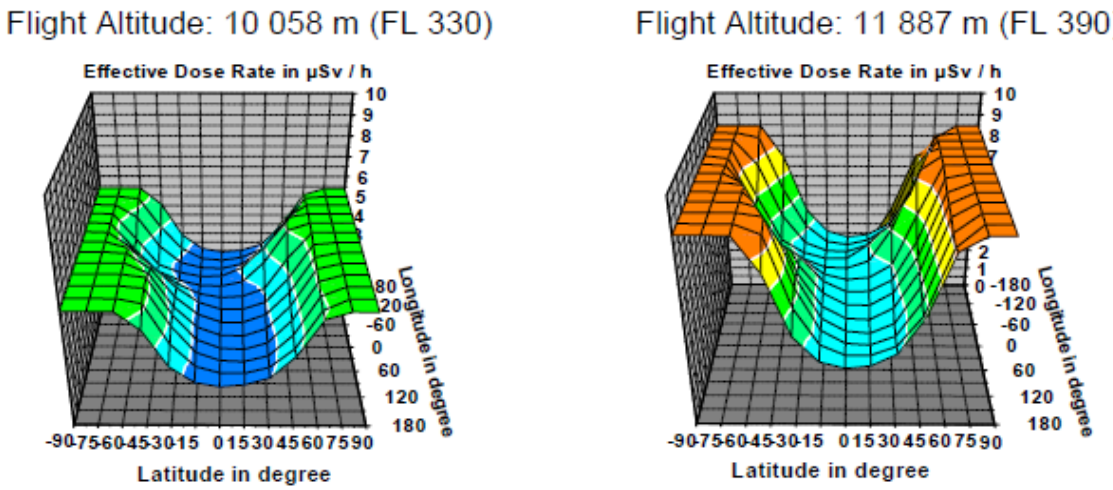
Obrázek 11 - Směr síly magnetického pole na pohybující se nabitou částici (vlevo) a spirálový pohyb nabitých částic podél magnetických siločar (vpravo) [34].

Velikost této síly je úměrná náboji částice, rychlosti částice, síle magnetického pole a sinu úhlu mezi směrem pohybu částice a směrem magnetického pole viz. *vzorec 1*.

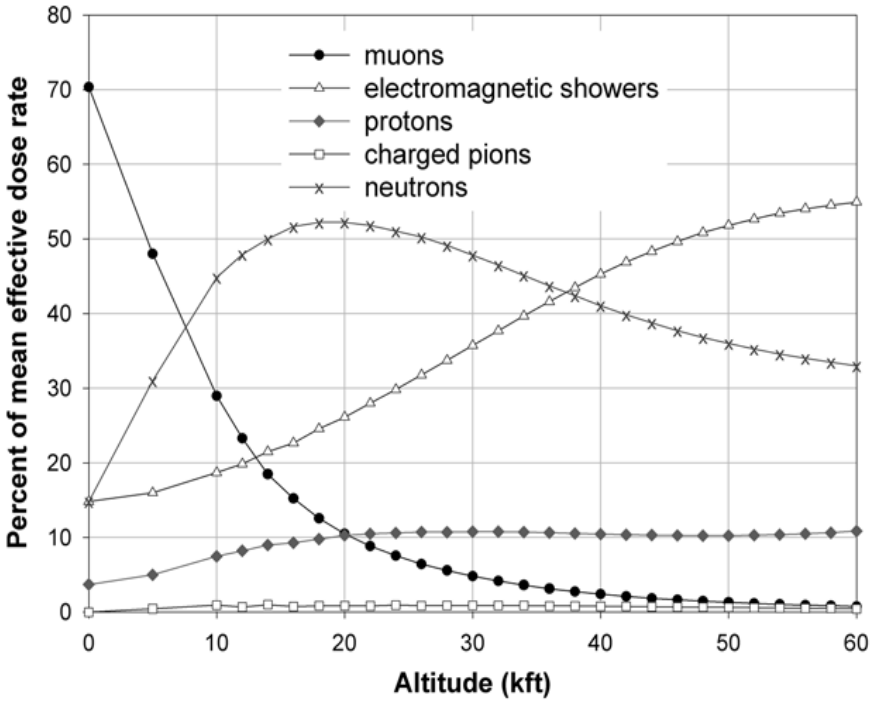
Vzorec 1: $F = |q| \times v \times B \times sin\ \alpha$

F - síla působící na částici
q - náboj částice
B - indukce magnetického pole
α - úhel mezi **v** a **B**

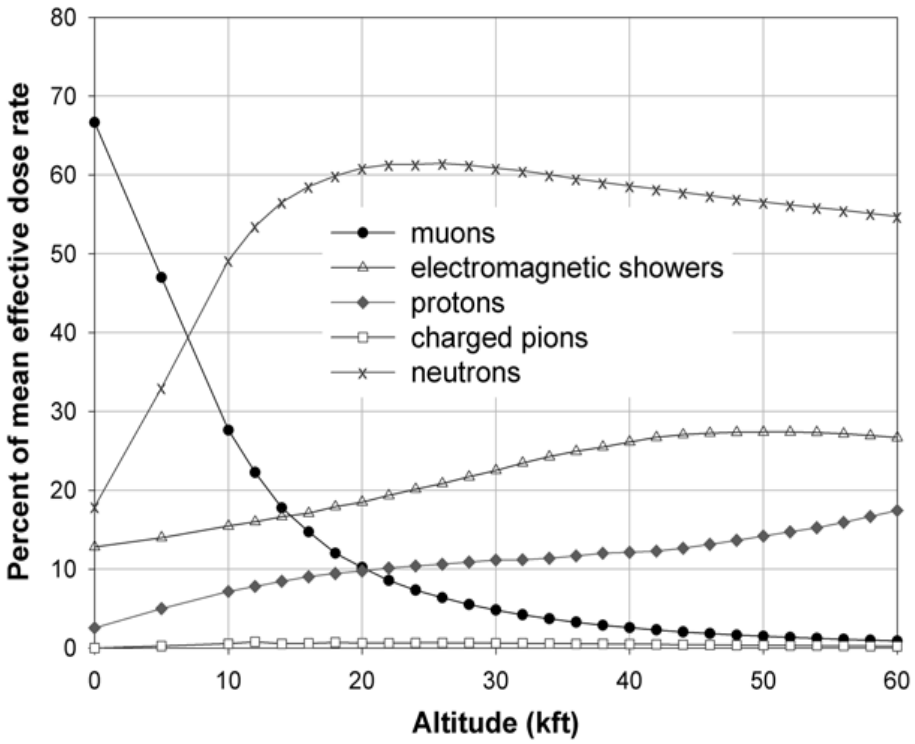
To znamená, že částice, která se pohybuje paralelně ke směru magnetického pole (v našem případě vstupující do atmosféry v oblasti magnetických pólů), nebude vychylována žádnou silou od směru svého pohybu, neboť *sin α* bude v tomto případě nulový. Naproti tomu, pokud bude částice vstupovat pod pravým úhlem (na úrovni magnetického rovníku), bude na ni působit maximální síla, vychylující částici od směru jejího pohybu (*sin α* bude roven jedné). Dávkový příkon pro lety dopravních letadel je pro zeměpisné šířky vyšší než 50° přibližně 2 až 4 krát vyšší (pro stejné letové hladiny) než v blízkosti rovníku. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, efektivní dávkový příkon ve výšce 8 km (FL260) v mírných zeměpisných šířkách je okolo 3 μSv/h, a v blízkosti rovníku je tedy pouze okolo 1-1,5 μSv/h. Na úrovni moře je v blízkosti pólů nárůst dávkového příkonu pouze asi o 10-20 % vyšší, avšak komponenta neutronů je zde přibližně dvojnásobná. Na *obrázku 12* můžeme vidět trojrozměrné mapy světa s rozložením vypočteného příkonu efektivní dávky pro dvě rozdílné letové hladiny s uvažovanou hodnotou heliocentrického potenciálu 500 MV. Z obrázku je zřejmé, že stínění magnetického pole je v oblastech okolo rovníku znatelně vyšší než okolo pólů. Závislost spektra částic na geografické poloze můžeme vidět na *obrázku 13 a 14*, kde je znázorněn vypočtený poměrný příspěvek všech hlavních částic kosmického záření k příkonu průměrné efektivní dávky v závislosti na nadmořské výšce pro **rovníkovou** a **polární** oblast od roku 1958 do roku 2008. Jak z rovníkových dat, tak z polárních dat je patrné, že pro výšky FL200 - FL400, ve kterých se nejčastěji pohybují dopravní letadla, bylo 88-97 % průměrné efektivní dávky od neutronů, protonů a elektromagnetických sprškek [1,12,18].



Obrázek 12 - Výpočet příkonu efektivních dávek pro standardní barometrické hladiny FL330 (vlevo) a FL390 (vpravo) a heliocentrický potenciál 500 MV [12].



Obrázek 13 - Příspěvek jednotlivých částic v průměrném příkonu efektivní dávky v závislosti na nadmořské výšce vyjádřené v tisících stop pro rovníkovou oblast (0°, 20°E) [18].

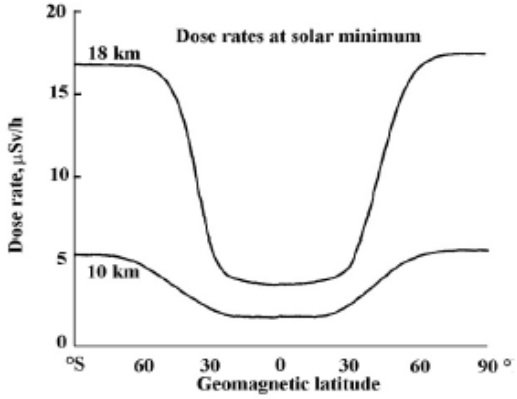


Obrázek 14 - Příspěvek jednotlivých částic v průměrném příkonu efektivní dávky v závislosti na nadmořské výšce vyjádřené v tisících stop pro polární oblast (80°N, 20°E) [18].

Efekt zemského magnetického pole závisí spíše na geomagnetické šířce než na šířce zeměpisné. Přesněji řečeno, závisí na vertikální kritické rigiditě Rc (Geomagnetic Cut-Off Rigidity), která určuje trajektorii částice. Efekt magnetického pole je větší pro částice s nižší energií - s nízkou rigiditou. Rigidita částice je výsledkem komponenty síly magnetického pole kolmé na hybnost částice a poloměr zakřivení její trajektorie, odpovídá podílu hybnosti částice vůči jejímu náboji. Vyjadřuje se v jednotkách GV. Vypočítáme ji podle *vzorce 2*, kde *p* je hybnost částice, *c* je rychlost světla ve vakuu a součin *Ze* vyjadřuje náboj částice.

Vzorec 2: $Rc = \frac{pc}{Ze}$

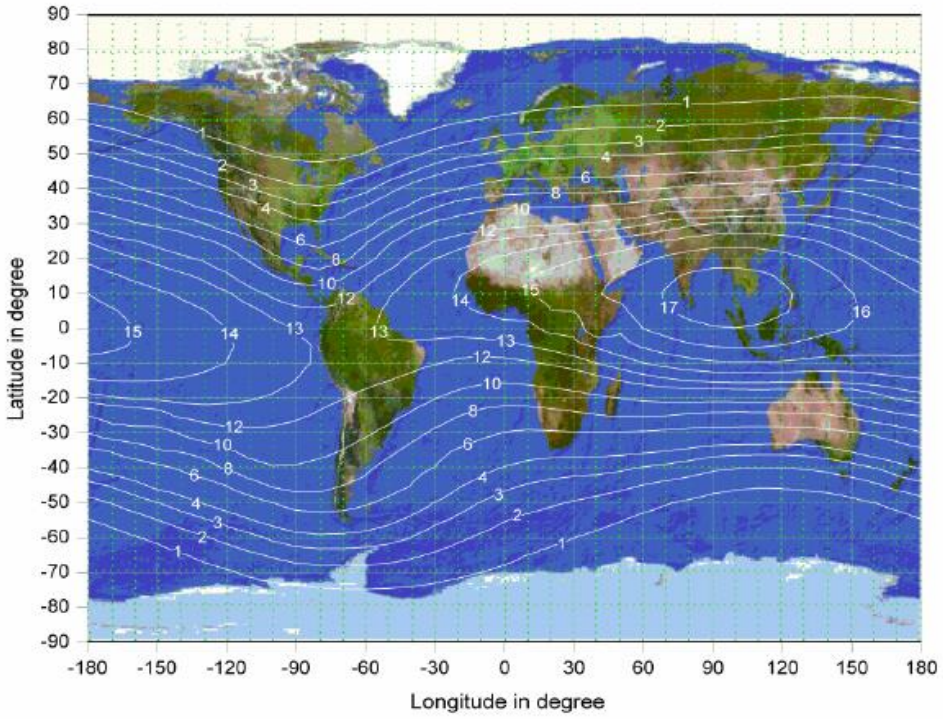
Vertikální kritická rigidita je minimální rigidita, při které částice pronikne do zemské atmosféry. Řečeno jinak: částice do atmosféry pronikne tehdy, má-li vyšší energii než je energie odpovídající vertikální kritické rigiditě v daném místě. Kritická vertikální rigidita je funkcí geomagnetické šířky λ a vypočítame jí pomocí *vzorce 3*. Závislost *Rc* na geomagnetické šířce je zobrazena na *obrázku 15*.



Obrázek 15 - Graf závislosti příkonu dávkového ekvivalentu na geomagnetické šířce v období slunečního minima (vliv vertikální kritické rigidity) [13].

Vzorec 3: $Rc(\lambda) = 14{,}9 \times cos^4(\lambda)$

Na *obrázku 16* vidíme rozložení vertikální kritické rigidity *Rc* v jednotkách GV založené na stavu zemského magnetického pole roku 1990 pro standardní barometrickou výšku 20 km. Nižší hodnoty *Rc* představují nižší stínění a vyšší hodnoty naopak stínění vyšší. Na pólech je kritická vertikální rigidita 0 GV a na úrovni rovníku dosahuje hodnoty přibližně 15 GV [1,12].



Obrázek 16 - Vertikální kritická rigidita *Rc* v GV založená na datech z roku 1990 pro výšku 20 km [12].

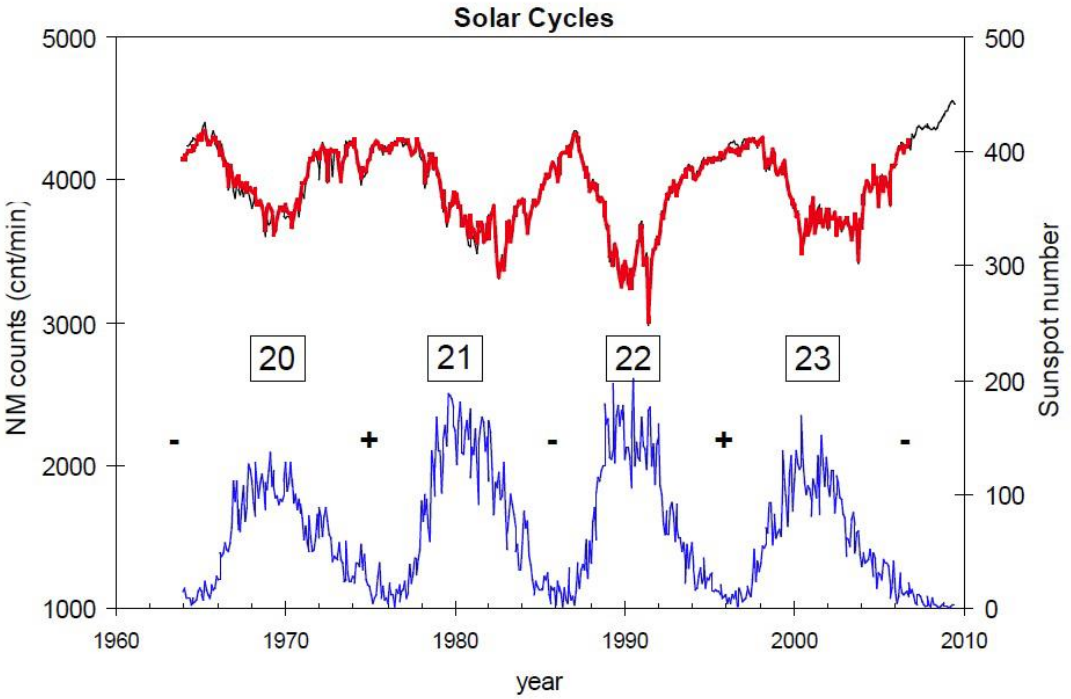
3.5 Závislost na čase – období sluneční aktivity

Závislost na času je dána především sluneční aktivitou. O slunečním záření a vlivu sluneční aktivity na galaktické kosmické záření pojednávají z části také předchozí kapitoly 2.1 a 2.2. V této kapitole si shrneme uvedené poznatky a některé aspekty detailněji rozebereme.

Kolem sluneční plazmy (sluneční vítr), pohybující se naší sluneční soustavou, se indukuje magnetické pole. Částice galaktického záření s nižší energií jsou tak odchylovány působením magnetického pole slunečního větru. Změnu intenzity slunečního větru v čase na stínění galaktického kosmického záření nazveme sluneční modulace. Sluneční modulace sleduje cyklus sluneční aktivity trvající přibližně 22 let. Tento sluneční cyklus je tvořen dvěma 11 letými cykly, které jsou od sebe odděleny pravidelnou změnou polarity magnetického pole Slunce. Sluneční aktivita stoupá přibližně po dobu 4,8 let a klesá po dobu přibližně 6,2 let.

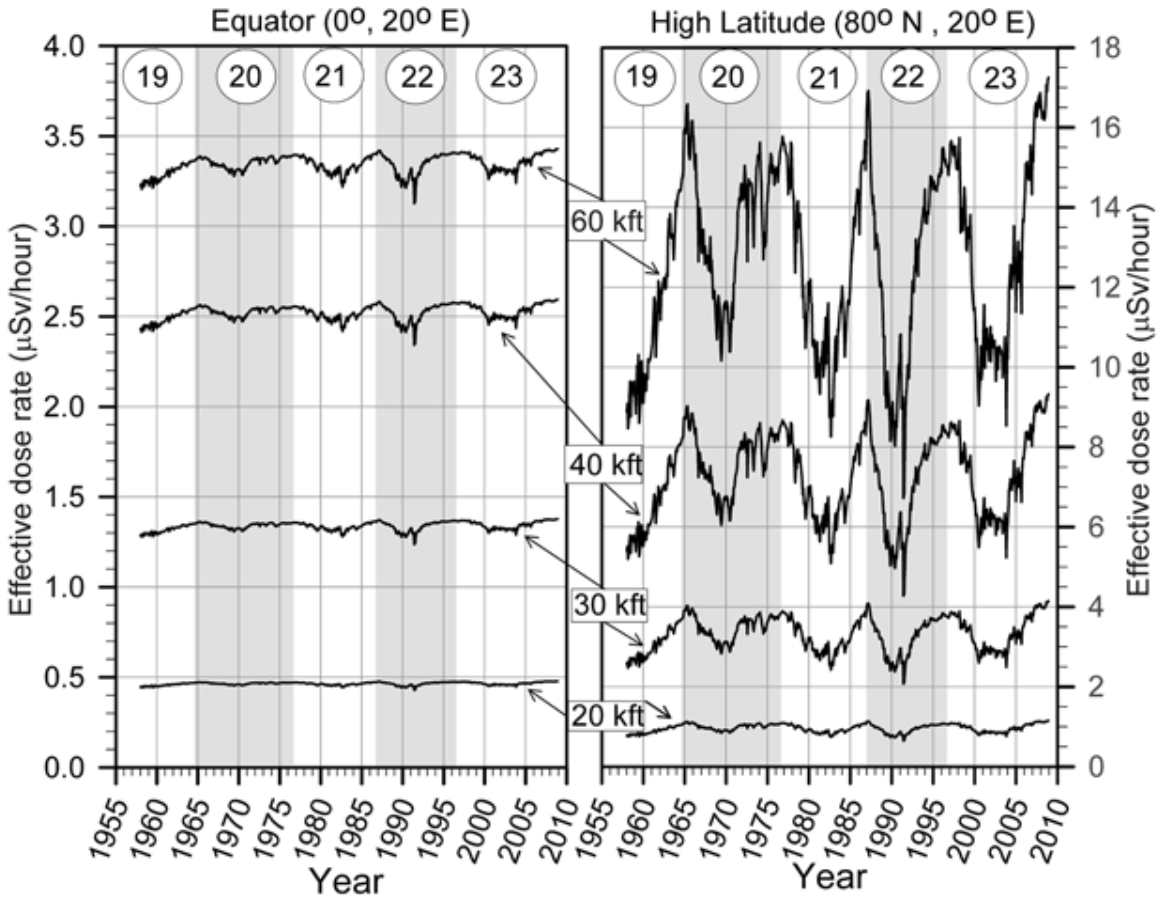
Na začátku slunečního cyklu je období slunečního minima. V tomto období je magnetické pole Slunce téměř magnetickým dipólem. Postupně dochází k reorganizaci magnetických siločar a vznikají malé dipóly, které se navzájem sčítají. V období slunečního maxima je celkové magnetické pole Slunce velmi nepravidelné. Většina magnetických dipólů se navzájem vyruší a dochází tak k rozpojování siločar. Toto rozpojování je doprovázeno masivními výrony plazmy s vysokou energií. V době slunečního maxima je tak stínění slunečním větrem vyšší než v období jeho minima.

Na *obrázku 17* vidíme, jak se mění odezva neutronového monitoru v závislosti na počtu slunečních skvrn za zhruba posledních 50 let. Sluneční aktivita se odráží v počtu slunečních skvrn a jimi proložená křivka slouží pro určení slunečního maxima a minima. Jsou zde také patrné náhlé poklesy neutronového monitoru jako důsledky zesíleného slunečního větru a s tím související nárůst magnetického stínění.



Obrázek 17 - Počet slunečních skvrn (modrá křivka a pravá stupnice) a měsíční průměr odezvy neutronového monitoru Climax v Coloradu (červená křivka a levá stupnice) pro sluneční cykly 20 až 23. Černá křivka zobrazuje odezvu neutronového monitoru v Oulu, která je přepočítána na geografickou polohu neutronového monitoru Climax. Znaménka +/- zobrazují změnu polarity magnetického pole Slunce [19].

Sluneční modulace má na dávkový příkon vliv přibližně ze 75 % mezi maximem a minimem. Při minimu sluneční aktivity je dávkový příkon přibližně o 25 % vyšší než průměr a při maximu sluneční aktivity naopak o 25 % nižší než průměr. Během slunečních událostí (sluneční erupce a výrony koronální hmoty) může dojít k náhlému zesílení stínění solárním větrem a k poklesu intenzity galaktického kosmického záření na Zemi - Forbushovské depresi. Velikost vlivu těchto událostí na dávkový příkon je dosti variabilní, závisí na aktuální fázi slunečního cyklu. Sluneční události jsou krátkodobé a nepředvídatelné a Forbushovské deprese jsou typicky v řádu 10 %. Zmenšení dávky pro jeden transatlantický let představuje přibližně pouze 5 µSv a při stanovení dávek ozáření posádek může být většinou zanedbáno [1,17]. Na *obrázku 18* vidíme závislost příkonu efektivní dávky galaktického kosmického záření v závislosti na letové hladině pro několik slunečních cyklů pro rovníkovou a polární oblast.



Obrázek 18 - Příkon efektivní dávky galaktického kosmického záření v atmosféře během slunečních cyklů 19 až 23 v závislosti na výšce pro polární a rovníkovou oblast (geografický a geomagnetický rovník se protíná v poloze 0°N, 20°E). Výška je uvedena v tisících stop [18].

Od 1. ledna 1986 až do 1. ledna 2008 bylo zaznamenáno 170 slunečních protonových událostí. Na základě 169 událostí z těchto 170 se vědci snažili vypočítat dávky SKZ a GKZ pro simulované lety ve vysokých zeměpisných šířkách. Pro výpočet dávek SKZ použili výpočetní metodu Monte Carlo[3], měření z geosynchronních satelitů pro pozorování prostředí GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellite) a data z neutronových monitorů s přibližně nulovou nadmořskou výškou. Pro výpočet GKZ í použili program CARI-6P. Pro každou protonovou událost byla vypočítaná nejvyšší kombinovaná dávka daná součtem dávky GKZ a střední hodnoty dávky SKZ í, kterou by obdržel dospělý člověk a tři měsíce starý lidský plod při vystavení záření po dobu 1, 3, 5, a 10 hodin ve výškách letu FL300, FL400, FL500 a FL600. Pro každou protonovou událost z uvažovaných 169 tak obdrželi 16 kategorií

[3] Metoda Monte Carlo je systém algoritmů využívající statistických zákonů pravděpodobnosti a generátorů pseudonáhodných čísel pro simulaci reálných náhodných jevů, např. průchod ionizujícího záření látkovým prostředím [37, 38].

dospělého člověka a 16 kategorií lidského plodu. Nejvyšší dávky by byly obdrženy pro všech 32 kategorií během protonové události 29. září 1989 a události 16. ledna 2005. Vypočtené hodnoty můžeme vidět v *tabulce 2* níže.

Nejzávažnější zaznamenaná sluneční protonová událost se stala v roce 1859. Magnetické kompasy byly nespolehlivé, selhávaly telegrafní systémy a polární záři bylo možné pozorovat dokonce až v Karibské oblasti. V dnešní době, kdy je celý svět závislý na informačních technologiích, by tak velmi silná sluneční protonová událost mohla mít za následek selhání elektronických systémů vesmírných prostředků, vyřazení rádiové komunikace a rozsáhlé výpadky elektrického proudu (blackouty).

Velmi intenzivní sluneční aktivita může mít za následek zahřátí atmosféry a způsobit její rozpínání. Rozpínání atmosféry je schopno způsobit nárůst odporu okolního prostředí satelitů na nízkých orbitech, což může mít za následek snížení jejich rychlosti oběhu a pokles do nižšího orbitu. Nicméně ani během události roku 1859 nedosáhla radiace na nižších orbitech Země život ohrožujících hodnot [18].

Tabulka 2 - Součet nejvyšší vypočítané efektivní dávky GKZ a střední hodnoty SKZ a ekvivalentní dávky pro tříměsíční lidský plod (hodnota uvedena v závorce) na simulovaných letech ve vysokých nadmořských šířkách během slunečních protonových událostí v závislosti na době expozice [18].

Výška	Efektivní dávka pro dospělého člověka (Ekvivalentní dávka pro plod) [mSv]			
	1 h	3 h	5 h	10 h
	Sluneční Protonová Událost 29. září 1989			
FL300	---	0,098 (0,11)	0,14 (0,16)	0,20 (0,22)
FL400	---	0,27 (0,30)	0,39 (0,43)	0,57 (0,63)
FL500	---	---	0,84 (0,90)	1,3 (1,4)
FL600	---	---	---	2.6 (2,4)
	Sluneční Protonová Událost 16. ledna 2005			
FL300	0,048 (0,050)	---	---	---
FL400	0,16 (0,17)	---	---	---
FL500	0,42 (0,44)	0,68 (0,72)	---	---
FL600	0,90 (0,83)	1,5 (1,4)	1,8 (1,7)	---

Jednou ze základních veličin, které charakterizují sluneční modulaci, je **heliocentrický potenciál**. Základní jednotkou heliocentrického potenciálu je megavolt [MV]. Heliocentrický potenciál je odvozen z výstupu neutronových monitorů, kterých je na Zemi rozmístěno okolo 50 na různých geografických místech. Jedná se o výsledek rovnovážného řešení difúzní rovnice průchodu GKZ slunečním větrem.

Heliocentrický potenciál je mimo jiné používán jako jeden ze vstupních parametrů pro stanovení dávek ozáření pomocí výpočetních programů (např. CARI). Tento parametr dovoluje programu nastavit změny úrovně ozáření galaktickou složkou kosmického záření v závislosti na sluneční aktivitě. V *tabulce 3* vidíme heliocentrický potenciál v jednotlivých měsících mezi lety 2004 - 2017, založený na datech neutronového monitoru polárního geofyzikálního institutu Apatiti Cosmic Ray Station v Rusku [14,15].

Tabulka 3 - Současný a historický heliocentrický potenciál v megavoltech MV [14].

Month of Flight	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004
January	349	465	667	579	505	466	362	244	256	298	374	458	723	895
February	319	428	668	628	485	508	357	296	252	312	379	431	596	755
March	294	418	683	590	517	593	392	303	238	321	340	380	566	654
April	310	417	647	578	511	466	460	335	224	312	314	389	536	617
May	306	411	596	545	622	460	420	337	226	321	305	379	631	585
June	303	409	617	612	642	517	517	349	228	323	300	392	557	592
July		424	572	586	618	635	485	357	236	319	319	405	594	651
August		402	570	499	599	612	477	372	238	305	312	405	626	617
September		392	568	585	577	555	483	364	228	276	300	397	727	587
October		368	536	565	546	546	497	379	220	285	291	357	537	503
November		352	525	604	577	540	463	367	244	270	307	374	489	605
December		346	530	689	622	505	423	377	234	266	287	436	494	583
For the year		**402**	**596**	**587**	**565**	**531**	**444**	**337**	**234**	**298**	**316**	**397**	**586**	**628**

4 Vliv ionizujícího záření na lidské zdraví

Živé organismy jsou složeny z molekul. Molekuly jsou tvořeny atomy, které spolu drží s pomocí elektronových vazeb. V případě zasažení molekuly jinou částicí může dojít k vyražení orbitálního elektronu. Vyražení elektronu může mít za následek porušení elektronových vazeb, které vážou atomy k sobě. Pro živé organismy je zvláště závažné porušení molekul kyseliny deoxyribonukleové (DNA). DNA přenáší informace nutné pro funkci a reprodukční schopnost organismu. Nesprávné opravení kyseliny DNA, která byla poničena ionizujícím zářením nebo volnými radikály, může mít za následek vznik rakovinného bujení. Rovněž se předpokládá, že volné radikály hrají významnou roli v etologii (příčině vzniku) aterosklerózy, revmatoidní artritidy a mnoha dalších onemocnění. Volný radikál je elektricky neutrální atom nebo molekula obsahující jeden nebo více nepárových elektronů ve valenčním obalu, jež je činí velmi reaktivními. Částice ionizujícího záření vytvářejí volné radikály tehdy, když reagují s vodou a s některými buněčnými složkami uvnitř buněk [18].

4.1 Deterministické účinky (nestochastické účinky, reakce tkání)

Většina tkání lidského těla může ztratit značné množství buněk bez měřitelného poklesu funkce tkáně nebo orgánu. Někdy však bývá ztraceno dostatečně velké množství buněk, takže se

poškození orgánu a jeho funkce projeví. Poškození (poranění) tkání ionizujícím zářením nazýváme deterministickým tehdy, pokud se poškození tkání začne projevovat při radiační dávce vyšší než je hodnota prahové dávky. Prahová dávka je taková dávka, pod jejíž hodnotou nedochází k žádnému poškození tkání, nebo je poškození klinicky nevýznamné. Pro většinu deterministických účinků způsobených ozářením částicemi s nízkým lineárním přenosem energie (low-LET radiation) je prahová dávka vyšší, pokud je potřebná doba k dosažení této dávky delší než několik hodin. Deterministické účinky se mohou projevit i velmi brzy (někdy v řádu minut) v případě vystavení se silnému záření s vysokým dávkovým příkonem.

Účinek záření na hematopoetický (krvetvorný) systém je do značné míry závislý na poškození kostní dřeně. Kostní dřeň obsahuje tři systémy pro obnovu buněk, systém erytropoetický, myelopoetický a trombopoetický. Za normálních okolností je ustálený stav mezi produkcí nových buněk kostní dření a počtem funkčních zralých buněk kolujících v lidské krvi. Erytropoetický systém produkuje zralé erytrocyty (červené krvinky) s délkou jejich života přibližně 120 dní. Červené krvinky přenášejí kyslík z plic do těla a odvádějí část oxidu uhličitého. Myelopoetický systém produkuje zralé leukocyty (bílé krvinky) s životností přibližně 8 dnů. Bílé krvinky jsou součástí imunitního systému a jsou důležité v boji proti infekcím. Trombopoetický systém produkuje krevní destičky s dobou životnosti 8-9 dnů. Pokud je endotelová výstelka (výstelka krevních a lymfatických cév nebo srdečních dutin) poraněná, krevní destičky jsou stimulovány k tomu, aby putovaly do místa zranění a vytvořily zde "záplatu", která napomáhá snížení ztráty krve. Nedostatek krevních destiček tak může jedinci způsobit nadměrný vznik modřin a zvýšenou krvácivost.

Lidská střeva jsou velmi náchylná pro poškození vlivem radiace. Slizniční vrstva střev je kompletně renovována každých 72 hodin. Zranění mikrovaskulatury (drobných cév) slizniční a podslizniční vrstvy střeva spolu s denudací (obnažením) epiteliálních buněk může vést ke krvácení a výrazné ztrátě tekutin a elektrolytů ze střeva. Takovéto příhody můžeme pozorovat přibližně 1-2 týdny po ozáření.

Časné deterministické účinky ionizujícího záření se nazývají akutní radiační syndrom (ARS). Symptomy během první fáze onemocnění (nevolnost, únava, zvracení a průjem) se objevují během několika minut až dnů po expozici. Tyto symptomy se mohou objevovat a mizet po dobu několika dní, pokud nebyla dávka přímo smrtelná nebo imobilizující. Ozářený jedinec obvykle vypadá dobře a po krátkou dobu se cítí být i zdravý. Během další fáze však může dojít ke ztrátě chuti k jídlu, nevolnosti, únavě, zvracení, průjmu, horečce, záchvatům a kómatu (mezi jednotlivci existují individuální rozdíly). Toto těžké stadium může trvat několik hodin až

několik měsíců a skončit smrtí z infekce nebo vnitřním krvácením. Symptomy, rychlost nástupu příznaků, jejich závažnost a trvání obvykle závisí na absorbované dávce. Příčinou úmrtí je obvykle infekce a vnitřní krvácení kvůli poškození kostní dřeně. Některé pozdní deterministické účinky jsou katarakta (šedý zákal) a pokles zárodečných buněk (gametogonie). K dnešnímu dni je vznik katarakty jediným deterministickým účinkem spojovaným s vystavením jedince ionizujícímu záření ve vesmíru. Větší množství výskytu katarakty bylo pozorováno u bývalých astronautů, kteří obdrželi dávku nižší než 2 Gy od částic záření s vysokým lineárním přenosem energie (high-LET). V *tabulce 4* můžeme vidět deterministické účinky u mladých dospělých jedinců z akutní dávky ionizujícího záření aplikované na celé tělo. Jedinci, kteří přežijí deterministické účinky, jsou stále vystaveni riziku stochastických účinků [18].

Tabulka 4 - Deterministické účinky u mladých dospělých jedinců pro různé Gy-Eq ionizujícího záření aplikovaného na celé tělo, obdrženého za dobu kratší než 1 den. Gy-Eq (Gray Equivalent) je měřítkem schopnosti ionizujícího záření způsobit deterministické účinky. Jedná se o násobek absorbované dávky v Gy (Gray) a doporučeného jakostního činitele RBE (Relative Biological Effectivness). RBE bere v úvahu to, že ionizující záření různých typů a energií ovlivňuje živé organismy odlišně (viz. kapitola 5.1) [18].

Gy-Eq	Účinek
0,15	Prahová dávka dočasné sterility u mužů.
0,35	Během několika hodin někteří jedinci mohou trpět nevolností, slabostí a ztrátou chuti k jídlu. Symptomy zmizí několik hodin po objevení.
1-2	Po 2-3 hodinách, nevolnost a zvracení u 33-50 % jedinců.
1,5	Prahová dávka úmrtnosti.
2	Permanentní sterilita u plodných žen. Minimální dávka pro šedý zákal.
2-4	Mírná bolest hlavy asi 50 % jedinců. Téměř neustálé nevolnosti a zvracení u 70-90 % jedinců. Může dojít k počáteční granulocytóze (zvýšení počtu granulocytů v periferní krvi - druhu bílých krvinek) s pancytopenií (snížení množství všech druhů krevních elementů) přibližně 20-30 dnů po ozařování. Možnými pozdějšími účinky jsou infekce, krvácení a zhoršené hojení. Latentní doba pro šedý zákal je obvykle asi 8 let.
3,5-6	Prahová dávka permanentní sterility u mužů.
4	Zhruba 50 % zemře během 60 dnů od selhání hematopoetiky. U dospělých mužů bylo hlášeno, že stínění 10 % aktivní kostní dřeně má za následek téměř 100 % přežití.
5-7	Až 100 % zvracení do 2 dnů. Úmrtnost asi 90 % jedinců do 60 dnů
>8	Během několika minut může dojít k těžké nevolnosti, zvracení a průjmu. Po 1-2 hodinách dochází k téměř konstantní bolesti hlavy. Může dojít k selhání ledvin a kolapsu kardiovaskulárního systému. Úmrtnost 100 % jedinců obvykle během 8-14 dnů.
>20	Často pocit pálení během několika minut. Nevolnost a zvracení během 1 hodiny následované záchvaty, ataxií (poruchou koordinace pohybů) a zmateností. Úmrtnost 100 % jedinců obvykle do 24-48 hodin.

4.2 Stochastické účinky

Škoda na zdraví, která je způsobená ionizujícím zářením, se nazývá stochastickým účinkem (vyjádřeno v sievertech - Sv), pokud je pravděpodobnost (riziko), nikoliv však závažnost účinku, funkcí efektivní dávky. Předpokládá se, že neexistuje prahová dávka pro stochastické účinky, jako je tomu u účinků deterministických. Stochastické účinky na zdraví člověka zahrnují onemocnění jako je rakovina, genetické poruchy následujících generací a ztráty na životech v důsledku jmenovaných onemocnění. Riziko účinku je kumulativní a přetrvává po celou dobu života ozářené osoby. Osoby vystavené ionizujícímu záření mají tak zvýšené riziko rakoviny po celý život a jejich potomstvo má zvýšené riziko, že zdědí genetické poruchy.

Rakoviny zapříčiněné ionizujícím zářením však nelze odlišit od rakovin stejného typu u neozářené populace. Předpovědět, kteří jedinci z ozářené skupiny populace onemocní rakovinu, není možné. Bez ohledu na věk při ozáření, mají nádory vyvolané radiací u ozářené populace tendenci, objevit se stejně tak, jako se objevují nádory stejného typu u neozářené populace [18].

V *tabulkách 5, 6 a 7* můžeme vidět odhady zvýšeného celoživotního rizika vzniku rakoviny a dědičných účinků z obdržené efektivní dávky ionizujícího záření na celé tělo u jedince z celé populace a u jedince z pracující populace (věkové rozmezí 18 až 64 let). Jedná-li se o záření s nízkým lineárním přenosem energie (elektrony, fotony, pozitrony nebo miony) s dávkou nižší než 200 mSv či s dávkovým příkonem nižším než 100 mSv/hod, pak je odhadované riziko poloviční, než je riziko zjištěné lineární extrapolací v oblasti vysokých dávek. Faktor účinnosti dávky a dávkového příkonu DDREF je tedy roven 2 (DDREF - dose and dose-rate effectiveness factor).

Tabulka 5 - Zvýšené celoživotní riziko zhoubného rakovinného bujení z ionizujícího záření pro celou a pracující populaci v závislosti na obdržené dávce v mSv [18].

	Celá populace	Pracující část populace (věk 18 - 64)
----	8 jedinců ze 100 000 na 1 mSv	6,3 jedinců ze 100 000 na 1 mSv
DDREF = 2	4 jedinci ze 100 000 na 1 mSv	3,1 jedinců ze 100 000 na 1 mSv

Tabulka 6 - Zvýšené riziko genetických účinků na následující dvě nové generace (děti a vnoučata) z vystavení se ionizujícímu záření před početím [18].

	Celá populace	Pracující část populace (věk 18-64)
----	0,4 jedince ze 100 000 na 1 mSv	2,4 jedince ze 1 000 000 na 1 mSv
DDREF=2	0,2 jedince ze 100 000 na 1 mSv	1,2 jedince ze 1 000 000 na 1 mSv

Tabulka 7 - Zvýšené celoživotní riziko rakovinného bujení (zhoubného nebo nezhoubného) z ionizačního záření v závislosti na obdržené dávce [18].

	Celá populace	Pracující část populace (věk 18-64)
----	34 jedinců ze 100 000 na 1 mSv	23 jedinců ze 100 000 na 1 mSv
DDREF=2	17 jedinců ze 100 000 na 1 mSv	12 jedinců ze 100 000 na 1 mSv

Z uvedených hodnot vyplývá pro jedince ve věkové skupině 18-64 let, který obdrží jednorázovou akutní dávku záření na celé tělo nižší než 200 mSv, že je:

a) zvýšené riziko 1 : 15 873 na 1 mSv zhoubné rakoviny z ozáření částicemi s vysokým lineárním přenosem energie po celou dobu života (tabulka 5), což je přibližně 52 % z celkově zvýšeného rizika rakoviny (zhoubné nebo nezhoubné - tabulka 7) z ozáření částicemi s nízkým lineárním přenosem energie (1 : 8 333 na 1 mSv),
b) zvýšené riziko 1 : 32 258 na 1 mSv zhoubné rakoviny při ozáření částicemi s nízkým lineárním přenosem energie po celou dobu života (tabulka 5), což je přibližně 26 % z celkově zvýšeného rizika rakoviny (zhoubné nebo nezhoubné) po celou dobu života (1 : 8 333 na 1 mSv).

Mezi nejčastější typy rakovin, které se vyskytují v souvislosti s ionizujícím zářením jako rizikovým faktorem (stochastické účinky), patří:

a) leukemie,
b) rakovina plic,
c) rakovina prsu,
d) rakovina trávicího ústrojí (jícnu, žaludek, tlustého střeva a konečníku),
e) rakovina kostí,
f) rakovina jater,
g) rakovina ledvin a močového měchýře,
h) rakovina kůže [18].

4.3 Pravděpodobnost onemocnění

V této kapitole si uvedeme příklad výpočtu pravděpodobnosti vzniku onemocnění člena letové posádky vzhledem k jeho letecké kariéře v závislosti na vypočtených efektivních dávkách (pomocí programu CARI-6P) galaktického kosmického záření pro některé vybrané letové trasy - *tabulka 8*. Pro výpočet pravděpodobnosti použijeme údaje z *tabulky 8* a rizikové koeficienty z *tabulek 5-7* z předchozí kapitoly. Pro odhad rizika jsou zde protony, nabité piony a neutrony považovány za částice s vysokým lineárním přenosem energie (LPE). Miony a elektromagnetické spršky (fotony, elektrony a pozitrony) jsou zde považovány za částice s nízkým LPE. Protony se sice obvykle považují za částice s nízkým LPE, avšak jsou mnohem škodlivější než jiné částice této kategorie a způsobují podobná poškození jako těžké ionty. Z tohoto důvodu jsou protony zahrnuty do kategorie částic s vysokým LPE (možné přecenění rizika) [18].

Tabulka 8 - Letové údaje a vypočtené efektivní dávky od částic s nízkým a vysokým lineárním přenosem energie (LPE) pro jednosměrné lety mezi vybranými destinacemi [18].

Výpočet je založen na průměrné sluneční aktivitě během 51 let (1958 - 2008)					
Letiště odletu - Letiště příletu	Nejvyšší letová hladina [ft]	Počet hodin ve vzduchu [h]	Počet blokových hodin [bh]	Efektivní dávka od částic nízkým LPE [mSv]	Efektivní dávka od částic s vysokým LPE [mSv]
London - Los Angeles	39000	10,5	11	0,016	0,039
London - Chicago	39000	7,8	8,3	0,012	0,030
Athens - New York	41000	9,4	9,7	0,017	0,036

Příklad 1: Padesátiletý člen letové posádky pracoval po dobu 25 let u letecké společnosti a nalétal průměrně 700 blokových hodin ročně mezi Athénami a New Yorkem. Jaké bude jeho celoživotně zvýšené riziko onemocnění zhoubnou rakovinou, za předpokladu průměrné sluneční aktivity při každém letu? Letové údaje nalezneme v *tabulce 8* a koeficienty rizika pro zhoubné rakovinné bujení v *tabulce 5*.

a) výpočet rizika onemocnění pro ozáření částicemi s nízkým LPE:
   700 bh x 25 let = **17 500 bh** celkem
   0,017 mSv za jeden let / 9,7 bh = 0.00175258 mSv/bh
   0.00175258 mSv/bh x 17 500 bh = 30.67015 mSv

Riziko zhoubného rakovinného bujení z ozáření částicemi s nízkým LPE = 3,1 ze 100 000 na 1 mSv x 30.67015 mSv **= 95,08 ze 100 000**

b) výpočet rizika onemocnění pro ozáření částicemi s vysokým LPE:
   0,036 mSv za jeden let / 9,7 bh = 0,00371134 mSv/bh
   0,00371134 mSv/bh x 17 500 bh = 64,94845 mSv

Riziko zhoubného rakovinného bujení z ozáření částicemi s vysokým LPE = 6,3 ze 100 000 na 1 mSv x 64,94845 mSv = **409,18 ze 100 000**

Celkové riziko vypočteme jako součet jednotlivých rizik z ozáření částic s nízkým a vysokým LPE: 95,08 ze 100 000 + 409,18 ze 100 000 = 504,28 ze 100 000.

Zvýšené celoživotní riziko onemocnění zhoubným rakovinným bujením z ozáření galaktickým kosmickým zářením pro daného člena posádky je tedy přibližně **1:200**.

Příklad 2: Předtím, než manželé počali dítě, pracoval jeden z nich jako člen letové posádky a po dobu 5 let létal 700 blokových hodin ročně na trase mezi Athénami a New Yorkem. Jaká je pravděpodobnost genetických vad dalších dvou generací, bereme-li v úvahu průměrnou sluneční aktivitu? Letové údaje nalezneme v *tabulce 8* a koeficienty rizika genetických poruch v *tabulce 6*.

a) výpočet rizika genetické vady pro ozáření částicemi s nízkým LPE:
   700 bh x 5 let = **3 500 bh** celkem
   0,017 mSv za jeden let / 9,7 bh = 0,00175258 mSv/bh
   0,00175258 mSv/bh x 3 500 bh = 6,13403 mSv

Riziko genetické vady = 1,2 ze 100 000 na 1 mSv x 6,13403 mSv **= 7,36 ze 1 000 000**.

b) výpočet rizika genetické vady pro ozáření částicemi s vysokým LPE:
   0,036 mSv za jeden let / 9,7 bh = 0,00371134 mSv/bh
   0,00371134 mSv/bh x 3 500 bh = 12,98969 mSv

Riziko genetické vady = 2,4 ze 100 000 na 1 mSv x 12,98969 mSv = **31,18 ze 1 000 000**.

Celkové riziko opět vypočteme jako součet jednotlivých rizik z ozářením částic s nízkým a vysokým LPE: 7,36 ze 1 000 000 + 31,18 ze 1 000 000 = 38,54 ze 1 000 000.

Zvýšené riziko genetických vad pro následující dvě generace z ozáření jednoho z rodičů Galaktickým Kosmickým Zářením je tedy přibližně **1:25 000**.

5 Definice a normy radiační ochrany

Cílem radiační ochrany je zabránit deterministickým účinkům a snížit na přijatelnou úroveň pravděpodobnost stochastických účinků s pomocí regulace radiační zátěže populace. Mezinárodní komise radiologické ochrany (International Commission on Radiologic Protection - ICRP) a Mezinárodní komise pro radiační jednotky a měření (International Commission on Radiation Units - ICRU) vytvořily speciální dozimetrické veličiny ke stanovování dávek z vystavení jedince radiaci.

Základní veličiny radiační ochrany, definované v publikacích ICRP, jsou založeny na měření energie předané orgánům nebo tkáním lidského těla. S pomocí veličin lze kvantifikovat rozsah expozice ionizujícího záření části, nebo celého lidského těla, jak z příjmu radionuklidů, tak i z vnějších zdrojů záření [16].

Radiační zátěž posádek letadel se nejčastěji vyjadřuje pomocí veličiny, kterou nazýváme „efektivní dávka“ *E*. Jedná se o veličinu určenou pouze pro použití v ochraně před radiací za účelem ocenění pravděpodobnosti výskytu stochastických účinků. Pomocí efektivní dávky je možné posoudit konkrétní expoziční situaci, či je možné hodnotit a porovnávat velikosti různých expozic. Hlavním a primárním smyslem efektivní dávky je její použití k prokázání shody s dávkovými limity [23]. Tato veličina je celosvětově užívána pro regulační účely u pracovníků se zdroji záření a u obyvatelstva tak, aby se omezoval výskyt stochastických účinků na minimum. Veličina je neměřitelná experimentálně, neboť není možné implantovat detektor záření do jednotlivých orgánů. Z toho důvodu se efektivní dávka odhaduje pomocí operační veličiny, kterou nazýváme „prostorový dávkový ekvivalent” *H*(d)*. Hodnota efektivní dávky je dále vypočítána buď s pomocí příslušných faktorů odvozených z dat radiačního pole, anebo se vypočítává přímo z dat primárních.

5.1 Definice veličin

Efektivní dávka

Efektivní dávka *E* je součtem vážených ekvivalentních dávek ve všech význačných tkáních a orgánech lidského těla. Efektivní dávka je definována *vzorcem 4*, kde H_T je ekvivalentní dávka v orgánu nebo tkáni *T* a w_T je tkáňový váhový faktor, vztahující se ke stejnému orgánu nebo tkáni *T*. Jednotkou efektivní dávky je sievert (Sv). Jedná se o jednotku systému SI, která vyjadřuje míru poškození lidského těla následky stochastických účinků ionizujícího záření [16,17,18].

Vzorec 4: $E = \sum_T w_T \, . H_T$

Tkáňový váhový faktor

Tkáňový váhový faktor w_T (bezrozměrná veličina) značí relativní příspěvek daného orgánu nebo tkáně k celkové újmě, způsobené rovnoměrným ozářením celého těla. Vyjadřuje relativní radiosenzitivitu jednotlivých orgánů a tkání v lidském těle vzhledem ke stochastickým účinkům. Pro hodnoty tkáňového váhového faktoru platí *vzorec 5*. Tkáňové váhové faktory w_T

byly vybrány tak, aby byly nezávislé na druhu a energii záření. Během uplynulých let byly tkáňové váhové faktory rozšiřovány a jejich hodnoty zpřesňovány tak, aby odpovídaly současným poznatkům radiobiologie. Přehled hodnot tkáňových váhových faktorů a jejich vývoj vidíme v *tabulce 9* [16].

Vzorec 5: $\sum_T w_T = 1$

Tabulka 9 - Tkáňové váhové faktory podle doporučení ICRP 26 (r.1997), ICRP 60 (r. 1990) a ICRP 103 (r. 2007) [16].

Tkáň nebo orgán	Tkáňový váhový faktor w_T		
	ICRP 26	ICRP 60	ICRP 103
Gonády	0,25	0,20	0,08
Mléčná žláza	0,15	0,05	0,12
Červená kostní dřeň	0,12	0,12	0,12
Plíce	0,12	0,12	0,12
Štítná žláza	0,03	0,05	0,04
Povrch kostí	0,03	0,01	0,01
Konečník	-	0,12	-
Žaludek	-	0,12	0,12
Močový měchýř	-	0,05	0,04
Játra	-	0,05	0,04
Jícen	-	0,05	0,04
Kůže	-	0,01	0,01
Tlusté střevo	-	-	0,12
Slinné žlázy	-	-	0,01
Mozek	-	-	0,01
Zbytek těla	0,3	0,05	0,12

Ekvivalentní dávka

Ekvivalentní dávka H_T je definována jako součet součinů průměrných hodnot absorbovaných dávek v orgánu nebo tkáni $D_{T,R}$ a radiačních váhových faktorů w_R viz. *vzorec 6*. Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert (Sv). Tato veličina není v tkáních ani v orgánech v praxi měřitelná a pro její stanovení se používají veličiny, které měřeny být mohou.

Vzorec 6: $H_T = \sum_R w_R \ . D_{T,R}$

Radiační váhový faktor

Radiační váhový faktor w_R je bezrozměrná veličina a její hodnoty jsou v souladu se závažností absorbované dávky podle biologické účinnosti nabitých částic způsobujících tuto dávku ve tkáni. Hodnoty w_R jsou v souladu s hodnotami jakostního činitele Q (modifikující činitel závažnosti absorbované dávky podle biologické účinnosti nabitých částic způsobujících tuto dávku ve tkáni) a byly zvoleny tak, aby pro daný druh a energie záření reprezentovaly **relativní biologickou účinnost** s ohledem na **stochastické** účinky tohoto záření. Hodnoty radiačního váhového faktoru podle doporučení ICRP 103 můžeme vidět v *tabulce 10*.

Tabulka 10 - Doporučené radiační váhové faktory pro jednotlivé částice a pro neutrony (v závislosti na energii neutronů *En*) výpočet radiačního váhového faktoru pomocí spojité funkce podle ICRP 103. Ještě dle ICRP 60 byla hodnota w_R pro protony (s energiemi více než 2 MeV) rovna 5, je zde tedy patrný vývoj v hodnocení částic [16].

Typ záření		Radiační váhový faktor w_R [-]
Fotony		1
Elektrony a mezony		1
Protony a nabité piony		2
Částice alfa, štěpné fragmenty a těžké ionty		20
Neutrony (radiační váhový faktor je určen spojitou funkcí pro energii neutronů)	Energie neutronů E_n [MeV]	-
	En < 1	$2{,}5 + 18{,}2\, e^{\frac{-[ln(E_n)]^2}{6}}$
	1 ≤ En ≤ 50	$5{,}0 + 17{,}0\, e^{\frac{-[ln(2\,E_n)]^2}{6}}$
	E n > 50	$2{,}5 + 3{,}25\, e^{\frac{-[ln(0{,}04\,E_n)]^2}{6}}$

Absorbovaná dávka

Absorbovaná dávka *D* je jednou ze základních dozimetrických veličin. Je to měřitelná a nestochastická veličina (dána konkrétní hodnotou), používá se pro všechny typy ionizujícího záření a všechny geometrie ozařování. Vždy je důležité uvést, k jaké látce se absorbovaná dávka vztahuje např. vzduch, tkáň atp.

Absorbovanou dávku definujeme jako podíl střední sdělené energie $d\,\overline{\varepsilon}$, předané ionizujícím zářením látce v malém prostoru, a hmotnosti této látky dm, viz. *vzorec 7*.

Sdělená energie, $\mathcal{E}$, je energie předaná ionizujícím zářením látce v určitém objemu. Je to rozdíl mezi zářivými energiemi vstupujících a vystupujících částic zvětšený o součet změn při interakcích. Jednotkou sdělené energie je Joule (J) nebo elektronvolt (eV). Sdělená energie je stochastická veličina a neznáme tedy její konkrétní hodnotu. Známe pouze pravděpodobnost, s jakou se daná energie vyskytuje.

Jednotkou absorbované dávky je podle SI soustavy jednotek Gray (Gy) s rozměrem 1 Gy = 1 $J.kg^{-1}$ [16,17,18].

Vzorec 7: $D = \frac{d\varepsilon}{dm}$

Prostorový dávkový ekvivalent

Efektivní a ekvivalentní dávka sice vyjadřuje míru ozáření lidského těla, ale není přímo měřitelná. Proto se zavádějí jiné měřitelné operační veličiny, které jsou ekvivalentní veličinám radiační ochrany, případně je nadhodnocují. Nepřekročíme-li limitující hodnotu operační veličiny, nepřekročíme ani limitující hodnotu veličiny radiační ochrany.

Pro přímé měření radiační zátěže letových posádek se osvědčilo použití takzvaného prostorového dávkového ekvivalentu *H*(d).* Jedná se o dávkový ekvivalent *H* v určitém bodě pole záření, které by vyvolalo odpovídající rozšířené a usměrněné pole v hloubce *d* ve standardní kouli ICRU[4] na poloměru směřujícím proti směru pole. Rozšířené a usměrněné pole je takové pole, kde fluence a energetická distribuce mají stejné hodnoty v celém uvažovaném objemu jako v referenčním místě a záření prochází pouze jedním směrem.

Prostorový dávkový ekvivalent je vytvořen tak, aby bral v úvahu jakékoliv ionizující částice a byl nezávislý na směru a úhlu příchozího záření. Jednotkou prostorového dávkového ekvivalentu je sievert (Sv).

Pro monitorování prostředí se obvykle za hloubku *d* volí hloubka 10 mm. Na základě takto zvolené hloubky jej značíme *H*(10)*. Zvolený prostorový dávkový ekvivalent se vztahuje k efektivní dávce a užívá se pro silně pronikavé záření. V případě použití doporučených váhových faktorů pro neutrony a protony je tento zvolený prostorový dávkový ekvivalent vhodný jako operační veličina v polích záření, jimž jsou vystavovány právě letadlové posádky [16.17].

Dávkový ekvivalent

Dávkový ekvivalent *H* je součin absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáně (nebo v lidském plodu) *D* a jakostního činitele *Q* v tomto bodě, viz. *vzorec 8*. Pro vícero ozáření je celkový

[4] Fantom s názvem ICRU koule aproximuje lidské tělo (chemické složení, hustota, atp.). Používá se pro stanovení dávkového ekvivalentu a ostatních z něho definovaných veličin.

dávkový ekvivalent opět součtem všech jednotlivých dávkových ekvivalentů. Jednotkou dávkového ekvivalentu je sievert (Sv) a jeho fyzikální rozměr je $J \cdot kg^{-1}$.

Vzorec 8: $H = D.Q$

Dávkový ekvivalent byl zaveden jako veličina radiační ochrany v ICRP 26. ICRP již nyní veličinu dávkový ekvivalent nepoužívá, je však stále využíván například NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) a NASA (National Aeronautics and Space Administration). NASA využívá tuto veličinu namísto ekvivalentní dávky H_T (v USA označováno také jako Organ Equivalent Dose) [16,17,18].

Jakostní činitel

Jakostní činitel Q je bezrozměrný, modifikující činitel, který představuje závažnost absorbované dávky podle biologické účinnosti nabitých částic způsobujících tuto dávku ve tkáni. Jakostní činitel je určen typem a energií nabitých částic a souvisí s lineárním přenosem energie LPE. Zohledňuje vliv makroskopického rozdělení absorbované energie na zdravotní újmu. Vyjádření závislosti jakostního činitele na lineárním přenosu energie se stále zpřesňuje, prozatím doporučení ICRP 103 z roku 2007 nijak nepozměnilo jeho závislost na LPE, danou doporučením ICRP 60 z roku 1991. V *tabulce 11* můžeme vidět závislost Q na LPE [16,17,18].

Tabulka 11 - Závislost jakostního činitele Q na lineárním přenosu energie LPE ve vodě dle doporučení ICRP 103. Jakostní činitel po jeho vypočtení zaokrouhlujeme na nejbližší celé číslo [16.18].

Lineární Přenos Energie [$keV.\mu m^{-1}$]	Jakostní činitel Q [-]
LPE < 10	1
10 ≤ LPE ≤ 100	0,32 x LPE - 2,2
LPE > 100	300 x $LPE^{-1/2}$

Lineární přenos energie

Lineární přenos energie L_Δ definujeme jako podíl střední ztráty energie dE nabité částice v důsledku srážek s elektrony při průchodu vzdáleností dx v látce, *viz. vzorec 9*. Hodnota Δ vyjadřuje maximální hodnotu předané energie pro jednu interakci.

Vzorec 9: $L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\Delta}$

Hovoříme-li o lineárním přenosu energie všech energií ($\Delta = \infty$), pak používáme pojem neomezený lineární přenos energie a značíme jej *L* nebo LPE (anglicky LET - Linear Energy Transfer). LPE definujeme přímo pro ionizující částice, viz. *tabulka 12* [17]. Jinými slovy LPE představuje průměrné množství energie na jednotku délky dráhy přenášené na médium ionizujícím zářením o specifické energii při průniku krátkou vzdáleností. Energie přenášená na médium zahrnuje energii z jakéhokoli sekundárního záření, jako jsou například jaderné částice uvolněné z jádra zasaženého neutronem s vysokou energií. LPE je obvykle vyjádřena v jednotkách keV.μm^{-1}. Radiace s hodnotou LPE<10 keV.μm^{-1} je obecně považována za záření s nízkým LPE [18].

Tabulka 12 - Obvyklé hodnoty lineárního přenosu energie pro různé druhy záření [18].

Druh ionizujícího záření	Lineární Přenos Energie (LPE) [keV.μm^{-1}]
kobalt 60 gama záření	0,3
250 kVp rentgenové záření	2
10 MeV protony	4,7
150 MeV protony	0,5
15 MeV neutrony	12
2,5 MeV alfa částice	166
2 GeV jádra železa (Fe)	1000

Gray ekvivalent

Gray ekvivalent (Gy-Eq) je měřítkem schopnosti ionizujícího záření způsobit deterministické účinky. Gy-eq je násobek absorbované dávky ionizujícího záření *D* a doporučeného koeficientu relativní biologické účinnosti RBE (Relative Biological Effectivness). RBE bere v úvahu to, že ionizující záření různých typů a energií ovlivňuje živé organismy odlišně [18].

Relativní biologická účinnost - RBE

Relativní biologická účinnost (RBE) je bezrozměrná veličina. Jedná se o poměr absorbované dávky referenčního záření (obvykle 250 kVp[5] rentgenového záření nebo gama záření kobaltu-60) k absorbované dávce zjišťovaného záření, při produkování stejné velikosti stejného účinku v konkrétním organismu nebo tkáni. RBE je ovlivňována biologickým koncovým bodem a LPE ionizujícího záření. Pokud jako koncový bod zvolíme zabití lidských buněk, pak se bude RBE zvyšovat s nárůstem LPE až na přibližně 100 keV.μm^{-1}, dále se s dalším zvýšením LPE bude RBE snižovat. Hodnoty RBE můžeme vidět v *tabulce 13*.

Při hodnotě LPE = 100 keV.μm^{-1} je průměrná vzdálenost mezi ionizačními událostmi blízká průměru dvojité šroubovice kyseliny DNA. Proto záření s hodnotou LPE = 100 keV.μm^{-1} může nejúčinněji způsobit poničení dvou řetězců v molekule DNA. Takováto poničení jsou hlavní příčinou biologických účinků [18].

Tabulka 13 - Hodnoty relativní biologické účinnosti RBE [18].

Druh a energie ionizujícího záření	Relativní biologická účinnost RBE
záření s nízkým LPE (fotony, elektrony)	1,0
protony E > MeV	1,5
těžké ionty (helium, uhlík, neon, argon)	2,5
neutrony E < 5 Mev	6,0
neutrony E = 5 MeV	5,0
neutrony E > 5 MeV	3,5

5.2 Normy ISO

Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization, ISO) je světovou federací národních normalizačních organizací se sídlem v Ženevě. V roce 2011 čítala na 163 členů. ISO se zabývá tvorbou mezinárodních norem a jiných druhů dokumentů ve všech oblastech normalizace, kromě elektrotechniky. Práce na přípravě mezinárodních norem se obvykle provádí prostřednictvím technických výborů ISO. Každý člen, který má zájem o předmět, pro který byla zřízena technická komise, má právo být zastoupen v tomto výboru.

[5] kVp (kilovoltage peak) je maximální napětí rentgenové trubice a určuje kinetickou energii elektronů zrychlených v rentgenové trubici a vrcholovou hodnotu rentgenového emisního spektra.

Na spolupráci s ISO se také podílejí mezinárodní organizace, vládní a nevládní. ISO zároveň úzce spolupracuje s Mezinárodní elektrotechnickou komisí (International Electrotechnical Commission - IEC) ve všech záležitostech elektrotechnické standardizace. Mezinárodní normy jsou vypracovány v souladu s pravidly uvedenými v ISO/IEC směrnicích.
Hlavním úkolem technických komisí je příprava mezinárodních norem. Návrh mezinárodních norem přijatých technickými komisemi je následně rozeslán členským orgánům k hlasování. Aby bylo možné publikovat normu jako mezinárodní normu, vyžaduje se schválení nejméně 75 % hlasujících členských států. Níže uvádím tři části normy ISO 20785, jež je, mimo jiné,určena pro průmyslové podniky, které stanovují prostorové dávkové ekvivalenty posádek letadel.

5.2.1 **ISO 20785-1 (Conceptual basis for measurements)**

Tato část ISO 20785 poskytuje koncepční základ pro stanovení prostorového dávkového ekvivalentu při hodnocení expozice kosmickému záření v civilních letadlech a pro kalibraci přístrojů používaných k tomuto účelu. Kromě definic základních pojmů obsahuje všeobecný popis pole kosmického záření v atmosféře, obecné úvahy pro kalibraci a pro dozimetrii polí kosmického záření v letadle, převodní koeficienty a aktivní a pasivní dozimetrické zařízení (detektory) [8].

5.2.2 **ISO 20785-2 (Characterization of instrument response)**

Druhá část ISO 20785 specifikuje metody a postupy pro charakterizaci odezvy přístrojů používaných pro stanovení prostorového dávkového ekvivalentu při hodnocení expozice kosmickému záření v civilních letadlech. Uvedené metody a postupy mají být chápány jako minimální požadavky. Norma, vyjma definic a základních pojmů, obsahuje požadavky na charakterizaci odezvy přístrojů, všeobecné úvahy pro měření v letových hladinách, doporučená referenční kalibrační radiační pole, charakterizaci přístrojů, používaný software apod [21].

5.2.3 **ISO 20785-3 (Measurements at aviation altitudes)**

Třetí část ISO 20785 uvádí základy pro měření prostorového dávkového ekvivalentu v letových hladinách při hodnocení expozice kosmickému záření v civilních letadlech. Obsahuje obecné úvahy se vztahem k měření (výběr vhodných přístrojů, měření v letadle apod.), parametry, které mají vliv na dávkový příkon (barometrická výška, geografická poloha apod.), faktory, které mohou ovlivnit měření (kabinová výška, teplota v kabině, vlhkost) a specifické úvahy ohledně

aktivních a pasivních přístrojů (vibrace, elektromagnetické rušení letadlových přístrojů apod.) [22].

5.2.4 **ISO 20785-4 (Validation of codes)**

Tato část normy je v přípravě. Zabývá se standardizací validace kódů, dává základ pro schválení softwaru k výpočtu efektivní dávky obdržené na palubě letadla posádkou a pasažéry. Dává návod pro orgány radiační ochrany a pro vývojáře kódů na základní funkční požadavky, které musí kódy splňovat. Kód vyhovuje normě, pokud příkon H*(10) měřený podle ISO 20785-3 odpovídá vypočítanému dH*(10)/dt ± 30 % v celém rozsahu Rc měření nebo celkový vypočítaný H*(10) se neliší od měřeného H*(10) více než o ± 30 % během celého letu.

6 Zdroje ozáření v běžném životě

Všechny živé organismy na Zemi byly, jsou a budou vystaveny ionizujícímu záření. Toto záření na Zemi přirozeně existovalo a stále existuje. Díky pokroku ve vědě a technice, člověk sám sebe a celý okolní svět vystavuje mnoha dalším zdrojům záření. Dodatečné ozáření ve svém životě člověk může přijmout při létání letadlem, práci v jaderné elektrárně, lékařské diagnostice apod. V následujících kapitolách si uvedeme, jak na člověka působí okolní prostředí a jak člověk sám ovlivňuje svůj život. Budeme porovnávat radiační zátěž lékařského a profesního ozáření vzhledem k ozáření ze zdrojů okolního prostředí.

6.1 Ozáření z přírodních zdrojů okolního prostředí

Přirozenými zdroji expozice z okolního prostředí je kosmické záření a pozemské radionuklidy, které se vyskytují v zemské kůře, ve stavebních materiálech, ve vzduchu, ve vodě, v potravinách a navíc i v samotném lidském těle. Některé expozice záření jsou poměrně konstantní a stejné pro všechny jednotlivce na celé Zemi, jako například dávky z požití draslíku 40 (^{40}K) v potravinách. Ostatní expozice se mění v závislosti na místě, kde živý organismus žije. Kosmické paprsky jsou například intenzivnější ve vyšších nadmořských výškách a koncentrace uranu a thoria v půdách je zvýšena jen v určitých oblastech. Expozice se také mohou lišit v důsledku lidských činností a postupů. Zejména stavební materiály, konstrukční a větrací systémy domů silně ovlivňují vnitřní hladiny radonu (radioaktivního plynu) a jeho produktů rozpadu, čímž významně přispívají k dávkám z inhalace [22].

Celosvětová roční průměrná efektivní dávka připadající na jednotlivce je dána několika zdroji záření, viz. *tabulka 14*. Roční světový průměr efektivní dávky připadající na jednotlivce

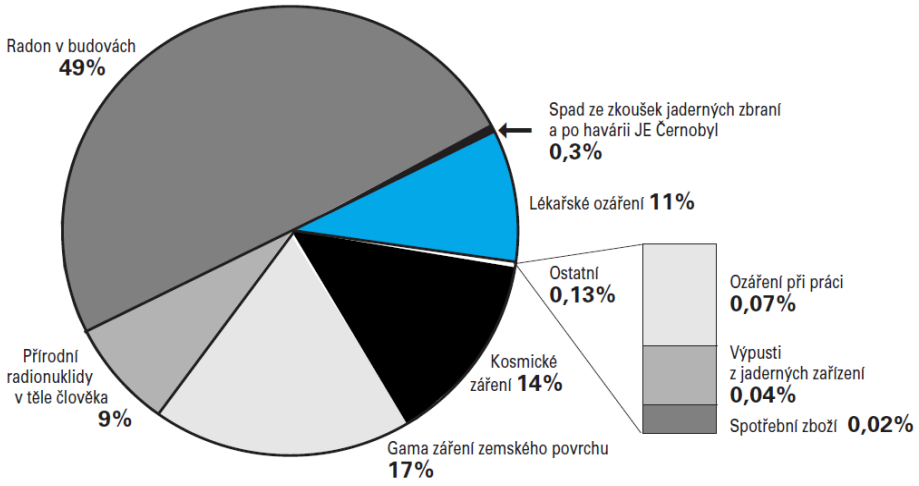
v důsledku přírodních zdrojů záření je přibližně 2,4 mSv. Rozsah jednotlivých dávek je však ve skutečnosti velmi široký. U každé větší populace přibližně 65 % jedinců obdrží roční efektivní dávku mezi 1-3 mSv, asi 25 % populace obdrží roční efektivní dávku nižší než 1 mSv a zbylých 10 % populace obdrží roční efektivní dávku vyšší než 3 mSv [22]. Dle informací z bulletinu Státního ústavu radiační ochrany dosahuje průměrná efektivní dávka v České Republice, kde se v závislosti na charakteru podloží významně projevuje příspěvek radonu a jeho dceřiných produktů ozáření z přírodního pozadí, přibližně hodnoty 3,4 mSv za rok. V Evropské Unii je průměrná roční dávka dle údajů Evropské komise přibližně 2,2 mSv.

Tabulka 14 - Průměrné ozáření obyvatel z přírodních zdrojů [22].

Zdroj záření	Celosvětová roční průměrná efektivní dávka (mSv)	Obvyklý rozsah dávek (mSv)
Vnější expozice		
Kosmické záření	0,4	0,3 - 1,0 [a]
Zemské záření gama	0,5	0,3 - 0,6 [b]
Vnitřní expozice		
Inhalace (převážně radonu)	1,2	0,2 - 10 [c]
Požití (jídlo, pití)	0,3	0,2 - 0,8 [d]
Celkem	2,4	1 - 10

a - rozsah od hladiny moře až po vyšší nadmořské výšky
b - v závislosti na složení a obsahu radionuklidů v půdě a stavebních materiálech
c - v závislosti na akumulaci radonu uvnitř objektu (budovy, jeskyně, šachty)
d - v závislosti na složení a obsahu radionuklidů v jídle a pitné vodě

Podíl různých zdrojů záření na ozáření populace v běžném životě je možné vidět na *obrázku 19* níže. Uvedené hodnoty jsou převzaté ze zprávy UNSCEAR (1993) a představují hodnoty, které byly získány na základě hodnocení z více než stovky zúčastněných států. Skutečné hodnoty mezi jednotlivými zeměmi se mohou podstatně lišit, mimo jiné i v závislosti na míře přírodního ozáření, na úrovni lékařské péče, nebo na úrovni radiační ochrany v dané zemi [25].



Obrázek 19 - Podíl různých zdrojů na ozáření populace [25].

6.2 Dodatečné ozáření při lékařské diagnostice a terapii

Ionizujícího záření v lékařské diagnostice a terapii se využívá po celém světě. Představuje hlavní zdroj expozice populace z umělých zdrojů. Přispívá k celkovému ozáření jedince v průměru dávkou o velikosti přibližně jedné čtvrtiny dávky z přírodního pozadí. Existují značné rozdíly ve finančních možnostech jednotlivých zemí a v praxi lékařské radiologie. Obecně se lékařské expozice omezují pouze na anatomickou oblast, která je předmětem diagnózy nebo léčení, takže mají přímý prospěch pro vyšetřované nebo léčené osoby. Diagnostické expozice pacientů jsou charakteristické relativně nízkými dávkami (efektivní dávky jsou typicky v rozmezí 0,1 až 10 mSv). Takové dávky jsou dostatečné pro získání požadované klinické informace. Výsledné dávky přepočítané na hlavu dané populace jsou uvedeny v *tabulce 15*. Pro terapeutické expozice jsou charakteristické velmi vysoké a přesně cílené dávky (předepsané dávky jsou typicky v rozmezí 20-60 Gy) k eradikaci onemocnění (hlavně rakoviny), nebo ke zmírnění symptomů. Lékařská radiologie je prováděna systematicky, k radiačním nehodám dochází poměrně zřídka.

Na základě počtu lékařů v poměru k počtu obyvatelů dané země rozlišujeme čtyři úrovně zdravotní péče. Za nejvyšší lékařskou úroveň považujeme takovou, ve které připadá jeden lékař na méně než 1 000 obyvatel (úroveň zdravotní péče I) a nejnižší úroveň takovou, ve které připadá jeden lékař na více než 10 000 obyvatel (úroveň zdravotní péče IV) [22].

Tabulka 15 - Radiační expozice populace, v závislosti na úrovni zdravotní péče v zemi, z lékařských vyšetření rentgenovými diagnostickými přístroji. V České Republice je průměrná hodnota lékařského ozáření v rozpětí 0,6 - 1 mSv [22].

Úroveň zdravotní péče	Počet obyvatel na jednoho lékaře	Počet vyšetření za rok na 1000 obyvatel	Průměrná roční efektivní dávka obyvatel [mSv]
I	< 1000	920	1,2
II	1000 - 3000	150	0,14
III	3000 - 10 000	20	0,02
IV	> 10 000	< 20	< 0,02
Světový průměr		330	0,4

Díky změnám ve struktuře zdravotní péče, které jsou urychleny pokrokem v technologiích a ekonomickém vývoji, lze v budoucnosti očekávat nárůst využití radiačních záření v diagnostické i terapeutické medicíně a tedy i nárůst obdržených dávek. Praxe v nukleární medicíně bude řízena použitím nových radiofarmak pro diagnózu a terapii. Je pravděpodobné i zvýšení poptávky po radioterapii z důvodu postupného stárnutí populace. Zároveň lze očekávat další nárůst lékařské radiologie v rozvojových zemích, kde dosud často chybí moderní zařízení a dostatečné lékařské služby [22].

Každé vyšetření pacienta je posuzováno podle přínosu a nezbytnosti použití diagnostické metody. Jde o to, zda informace, které lékař může obdržet, korespondují s jeho očekáváním (zda vyšetření daný pacient opravdu potřebuje). V případě, že lékař nepovažuje vyšetření za řádně odůvodněné, neprovádí jej. Takový postup je jedním z hlavních principů radiační ochrany. Včasná a kvalitní diagnóza však může zachránit pacientovi život a odhalit počátky závažného onemocnění. Proces lékařské diagnostiky ionizujícím zářením má pevný legislativní rámec. Zdravotnická zařízení mají povinnost každé rentgenové vyšetření zaznamenávat. Radiologický fyzik je schopen z takového záznamu a dalších údajů vypočítat dávku záření, kterou daný pacient obdržel. Novější diagnostické přístroje jsou schopné přímo poskytnout informaci o ozáření, jemuž je pacient vystaven. Diagnostika se provádí tak, aby dávka při vyšetření byla optimalizovaná (nezbytně veliká pro správné zobrazení). V současnosti zatím není žádný centrální registr pacientů, kde by bylo zaznamenáno, kolik diagnostických vyšetření pacient podstoupil a jaké obdržel dávky. Evropská komise zvažuje zavedení karet pacientů se záznamem vyšetření a dávek, které by pacienti vždy lékaři předkládali. Lékař by se tak mohl

lépe rozhodovat, zda danou zobrazovací metodu použít, či zvolit jiný postup. Pacient by měl být lékařem obeznámen s indikovanou diagnostickou metodou a mít právo vyšetření odmítnout. Ženy v produktivním věku mají povinnost lékaře upozornit na případné těhotenství (i na pouhou nejistotu).

V České Republice se podle dlouhodobého průměru uskuteční přibližně 12 miliónů rentgenových diagnostických vyšetření (včetně RTG zubů). Z toho je přibližně 400 tisíc vyšetření s pomocí výpočetní tomografie CT. I při opakovaném vyšetření určitých pacientů několikrát za rok, nepřesahuje míra rizika (*tabulka 16*) přínos včasné diagnostiky. V *tabulce 17* jsou uvedeny typické hodnoty orgánových absorbovaných dávek při použití výpočetní tomografie (se vzdáleností od vyšetřované oblasti dávky velmi rychle klesají).

V *tabulce 18* je dále možné porovnat typické efektivní dávky určitých diagnostických výkonů s dobou, za kterou bychom stejnou dávku obdrželi od záření z přírodních zdrojů z okolního prostředí (vztaženo k průměrné efektivní dávce EU) [23].

Tabulka 16 - Přístup radiační ochrany k označení rizika při ozáření malými dávkami [23].

Velikost efektivní dávky [mSv]	Riziko
< 0,1	zanedbatelné
0,1 - 1	minimální
1 - 10	velmi nízké
10 - 100	nízké

Tabulka 17 - Typické hodnoty průměrných orgánových dávek pro vyšetření výpočetní tomografií [23].

Vyšetřovaný orgán	Typické hodnoty orgánových absorbovaných dávek [mGy]
Hlava	20 - 40
Hrudník (plíce)	10 - 20
Břicho (bez pánve)	10 - 20
Pánev	25
Bederní páteř (bez sklonu gantry)	15

Tabulka18 - Typické hodnoty efektivních dávek pro vybraná rentgenová a CT vyšetření v porovnání s ozářením z přírodních zdrojů [23].

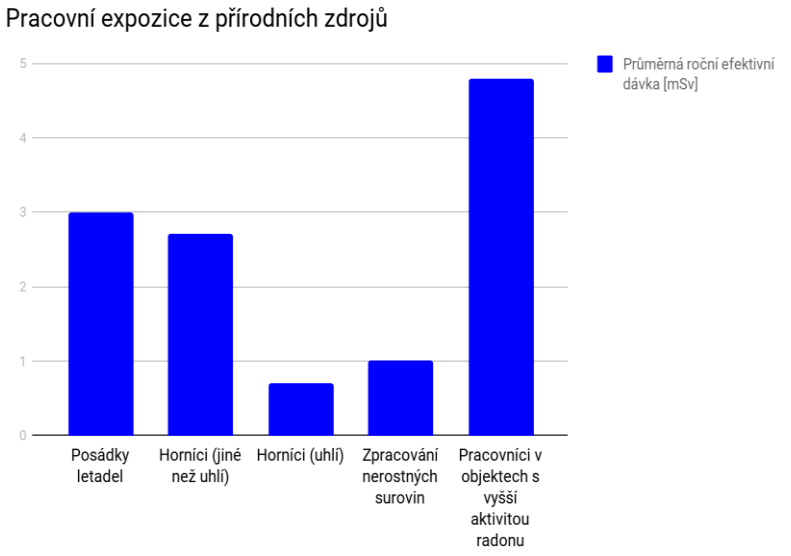
Diagnostický výkon		Typické efektivní dávky [mSv]	Přibližná doba pro stejné ozáření z přírodních zdrojů
Konvenční rentgenová vyšetření	Končetiny a klouby	< 0,01	< 1,5 dne
	Plíce	0,02	3 dny
	Lebka	0,07	11 dní
	Mamografie	0,1	15 dnů
	Kyčle	0,3	7 týdnů
	Pánev, hrudní páteř	0,7	4 měsíce
	Břicho	1,0	6 měsíců
	Bederní páteř	1,3	7 měsíců
	Polykací akt	1,5	8 měsíců
	IVU	2,5	14 měsíců
	Vyšetření žaludku, střevní pasáž	3	16 měsíců
	Irigoskopie	7	3,2 roku
Vyšetření výpočetní tomografií - CT	CT hlavy	2,3	1 rok
	CT hrudníku	8	3,6 roku
	CT břicha, pánve	10	4,5 roku

6.3 Dodatečné ozáření v závislosti na pracovní činnosti

Existuje řada povolání, při nichž jsou pracovníci vystaveni umělým zdrojům záření, jako jsou například zaměstnanci v jaderných zařízeních, na lékařských klinikách, v průmyslu (defektoskopie, karotážní práce), apod. Někteří pracovníci jsou navíc vystaveni zvýšenému množství přirozeného záření, jako posádky letadel, průvodci v jeskyních, apod. Obecně se používá termín pracovní expozice k vyjádření průměrné expozice při práci, jejíž přímým důsledkem je právě práce samotná. Aktuální odhad celosvětové kolektivní efektivní dávky z uměle vytvořených zdrojů pro pracovníky na počátku 90. let, je přibližně o faktor 2 nižší, než

při odhadu výboru UNSCEAR z konce 70. let. Jednou z hlavních příčin redukce dávky je zejména snížení dávky při těžbě uranu. Snížení se však projevuje i ve všech dalších kategoriích, jimiž je průmysl, lékařství, vojenská obrana a vzdělávání. Tento trend se odráží také na světové průměrné roční profesní efektivní dávce, která klesla z přibližně 1,9 mSv na 0,6 mSv [22]. Průměrné roční dávky pracovníků v různých povoláních dle zprávy UNSCEAR 2000 můžeme vidět na *obrázcích 20 a 21*.

Obrázek 20 - Pracovní expozice z umělých zdrojů (v závislosti na lidské činnosti) na základě dat ze zprávy UNSCEAR 2000 [22].



Obrázek 21 - Pracovní expozice v oblastech se zvýšeným zářením z přírodních zdrojů na základě dat ze zprávy UNSCEAR 2000 [22].

V České Republice sleduje ozáření radiačních pracovníků a obyvatelstva Státní Úřad pro Jadernou Bezpečnost (SÚJB) v rámci své kompetence v oblasti ochrany zdraví osob před nepříznivými účinky ionizujícího záření. Dozimetrickými službami v roce 2016 bylo celkem sledováno 22 884 pracovníků. Dávky některých sledovaných skupin je možné vidět v *tabulce 19* níže [24].

Tabulka 19 - Dávky radiačních pracovníků v roce 2016 (posádky letadel rok 2015) [24].

Zařízení	Sledovaný počet pracovníků	Celková kolektivní efektivní dávka [mSv]	Nejvyšší roční osobní efektivní dávka [mSv]	Průměrná roční individuální efektivní dávka [mSv]
V JE Dukovany	2282	574,17	7,14	-
V JE Temelín	2185	300,6	4,19	-
Uranový průmysl DIAMO	1386	2010	25,77	-
Zdravotnické pracoviště	~ 4000	-	-	1,68 (2,15)[a]
Posádky letadel	1858	-	5,36	1,34

a - průměrná roční efektivní dávka u lékařů provádějících intervenční výkony

7 Radiační ochrana posádek letadel

Průměrná světová roční efektivní dávka připadající na jednotlivce z přírodního pozadí (externí ozáření kosmickým zářením a terestriální a interní ozáření) je přibližně 2,4 mSv. Současná politika institucí zabývajících se radiační ochranou je taková, že každý, kdo může obdržet navíc roční dávku přesahující 1 mSv, je považován za osobu pracující s ionizujícím zářením a jeho dávka se musí buď měřit, nebo stanovit výpočtem. Tak je tomu právě u posádek letadel.

7.1 Organizace, vyhlášky a stanovené limity

7.1.1 International Commision on Radiological Protection

Roku 1950 byla založena Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu - **ICRP**. ICRP je nezávislou mezinárodní organizací čítající více než 200 členů přibližně ze třiceti zemí světa. Skládá se z vědců a politiků, zabývajících se radiační ochranou. Hlavním cílem ICRP je ochrana životního prostředí a stanovení doporučení pro snížení rizika onemocnění způsobeným

ionizujícím zářením. Komise vyvíjí, vypracovává a udržuje mezinárodní systém radiační ochrany pomocí norem, právních předpisů, programů, pokynů a postupů. ICRP již publikovala více než 100 zpráv a několik základních doporučení, které popisují systém radiační ochrany (například publikace ICRP 60 z roku 1991 a ICRP 103 z roku 2007 apod.). ICRP úzce spolupracuje s Mezinárodní komisí pro jednotky záření a měření (ICRU), s Vědeckým výborem Spojených národů pro účinky atomového záření (UNSCEAR), se Světovou zdravotnickou organizací (WHO) a Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA). V publikaci ICRP 60 byl stanoven limit efektivní dávky pro pracovníky s ionizujícím zářením na 100 mSv za po sobě jdoucích 5 let, tedy na průměrnou hodnotu 20 mSv za rok. Bylo navrženo, aby se dávky posádek letadel monitorovaly a aby zaměstnání, jako členství v posádce letadel, bylo uvažováno za pracovní expozici. Doporučení ICRP 103 upravilo například hodnoty tkáňových váhových faktorů a radiačních váhových faktorů s ohledem na nové poznatky o účincích ionizujícího záření na organismus [16,17]. Pro netěhotnou osobou, která je vystavena působení ionizujícího záření na pracovišti, doporučuje publikace ICRP 103 limit pro expozici 5-letý průměr 20 mSv za rok (100 mSv za 5 let), přičemž v žádném roce nesmí přesáhnout 50 mSv. Pro těhotnou ženu, která sdělí počátek svého těhotenství vedení společnosti, by pracovní podmínky měly být upraveny tak, aby dodatečná dávka plodu po zbytek těhotenství nepřekročila 1 mSv. Radiační expozice v rámci lékařského postupu nepodléhá doporučeným omezením. Nicméně předtím, než bude těhotná žena ozařována, je třeba expozici plodu důkladně zvážit [18].

7.1.2 **European Atomic Energy Community**

Roku 1957 podepsaly některé evropské státy (Belgie, Francie, Itálie, Lucembursko, Německo a Holandsko) smlouvu o založení Evropského Společenství pro Atomovou Energii - **Euratom.** Česká republika se do společenství připojila roku 2004 spolu se vstupem do Evropské unie (Všechny členské země EU jsou členy Euratom). Cílem společenství je podpora jaderného výzkumu, vytvoření jednotného jaderného trhu, kontrola před zneužitím jaderného materiálu, zajištění ochrany zdraví obyvatel a pracovníků před účinky ionizujícího záření, stanovení jednotných bezpečnostních norem a směrnic pro radiační ochranu a dohled na jejich dodržování. Každý členský stát je povinen zajistit dodržování těchto norem a směrnic, zároveň je může ve svých vyhláškách dále zpřísnit. Euratom doporučuje monitorování posádek letadel a doporučuje výpočetní programy, které se dají pro stanovení dávek použít (například program CARI) [16,17]. Podle směrnice vydané organizací Euratom by měla být posuzována pracovní expozice těch členů posádek, kteří by mohli být vystaveni větší dávce, než 1 mSv za rok.

Pracovní plány členů posádky by měly být upravovány tak, aby byla roční expozice udržena pod hodnotou nižší než 6 mSv. U pracovníků, jejichž roční expozice přesáhne dávku 6 mSv, se doporučuje lékařský dohled a vedení záznamů. U těhotných žen, počínaje ohlášením těhotenství vedení společnosti, by jejich pracovní plán měl zohledňovat tuto skutečnost a ekvivalentní dávka plodu byla měla být tak nízká, jak jen to je rozumě možné, a nepřesáhla hodnotu 1 mSv po zbývající dobu těhotenství, či v průběhu celého těhotenství podle toho, jak je tento článek implementován ve vnitrostátních právních předpisech [18].

7.1.3 **Státní úřad pro jadernou bezpečnost**

V České republice na radiační ochranu dohlíží Státní úřad pro jadernou bezpečnost - **SÚJB.** Tento úřad se zabývá monitorováním prostředí a ozáření obyvatelstva, pracovním ozářením, nehodami, vydává vyhlášky apod. SÚJB byl založen roku 1993 a jeho působení je dáno zákonem o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon). Jeho předsedu jmenuje vláda České republiky. Od roku 2003 úřad také spolupracuje s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency - IAEA), která, mimo jiné, dohlíží na mírové využití jaderné energie. SÚJB dále spravuje Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) a Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO). Roku 2017 vyšel v platnost nový atomový zákon č. 263/2016 Sb., který nahradil zákon č. 18/1997 Sb. [16.17]. Podle atomového zákona je pracovištěm s možností zvýšeného ozáření z přírodních zdrojů záření i paluba letadla při letech ve výškách nad 8 km. Povinností leteckých společností provozujících lety v těchto výškách je hodnotit dávky posádek (provádí oprávněná dozimetrická služba) a na základě výsledků zvážit úpravu jejich letových plánů. Je pravděpodobné, že při uvedených letech obdrží posádky dávky vyšší než stanovenou směrodatnou hodnotu dávky 1 mSv/rok. Dále je povinností provozovatele neprodleně poté, kdy členka letové posádky oznámí své těhotenství vedení společnosti, upravit její letový rozpis k omezení ozáření plodu tak, aby součet všech efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření plodu alespoň po zbývající dobu těhotenství nepřekročil hodnotu 1 mSv. Provozovatel by měl informovat své zaměstnance, že při létání může docházet k zvýšenému ozáření z přírodních zdrojů, o výsledcích výpočtů/měření a velikosti jejich osobních efektivních dávek a s tím souvisejícím zdravotním rizikem. SÚJB se oznamují výsledky osobních efektivních dávek souhrnně jednou za kalendářní rok. Členové letových posádek, kteří mohou obdržet efektivní dávky vyšší než 6 mSv jsou považováni za pracovníky v prostředí s významně zvýšeným ozářením z přírodních zdrojů a jejich radiační ochrana by

mimo jiné měla zahrnovat i periodické a mimořádné lékařské prohlídky. Výňatky z atomového zákona 263/2016 Sb. a z vyhlášky č.422/2016 Sb. nalezneme v *přílohách A, B* [26,27].

7.2 Stanovení radiační zátěže výpočtem

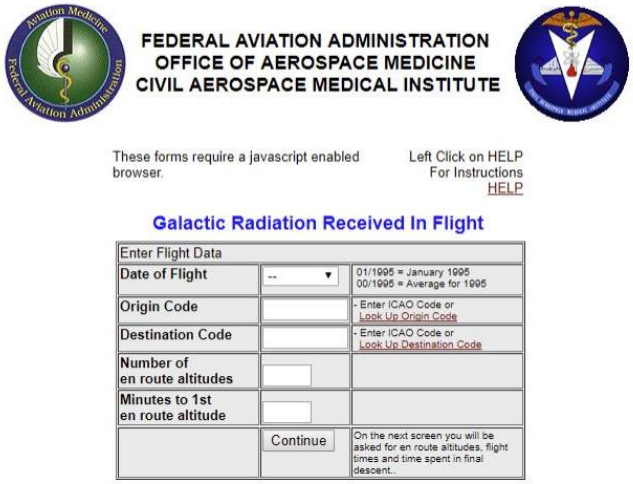
V České republice je pro SÚJB přípustnou formou stanovení efektivních dávek členů leteckých posádek létajících ve výškách vyšších než 8 km vypočtení těchto dávek na základě dat z absolvovaných letů leteckých společností. Tato vstupní data, včetně dat letových parametrů (údaje o modelových letových hladinách jednotlivých typů letadel, průměrné doby stoupání, klesání, apod.), jsou leteckým provozovatelem jednou ročně zaslána oprávněné dozimetrické službě, která na jejich základě stanoví efektivní dávku pro každého člena posádek. Výsledky zašle zpět provozovateli ve formě *protokolu o určení efektivních dávek členů posádek na palubách letadel při letech ve výšce nad 8 km*. V České republice je pro tento účel oprávněnou dozimetrickou službou Ústav jaderné fyziky Akademie věd ČR (ÚJF AV ČR).

Pro výpočet se vědcům ÚJF AV ČR osvědčil program CARI, vyvinutý pod záštitou FAA Civil Aerospace Medical Institute. Tento program počítá efektivní dávku galaktického kosmického záření přijatou jednotlivcem (na základě antropomorfního fantomu) v letadle. Nejnovější verze programu nese označení CARI-7 a CARI-7A. Pomocí tohoto programu je možné stanovit dávky pro letové trasy definované pomocí jednotlivých traťových bodů, nebo pro ortodromické trasy (nejkratší trasy) mezi letištěm odletu a příletu. Zároveň je s jeho pomocí možné stanovit i specifické dávky jednotlivých částic pro celou trasu, nebo jen pro konkrétní místa na trati. Limitní použitelná nadmořská výška pro výpočet dávek je v současnosti stanovena na maximálně 300 000 ft (stop). V jednoduchosti je možné funkci programu popsat následovně: na základě dat od letecké společnosti uživatel v programu zadefinuje místo odletu a přistání, čas vzletu a přistání, modelovou letovou hladinu, obvyklou dobu stoupání a obvyklou dobu klesání. Program pak uvažuje lineární průběh stoupání do modelové hladiny a lineární průběh klesání na přistání. Zadefinujeme-li tedy například dobu stoupání t_1 = 25 minut, dobu klesání t_2 = 25 minut a modelovou letovou hladinu FL380, pak při letu dlouhém T = 50 minut bude program uvažovat lineární stoupání po dobu 25 minut až do hladiny FL380, setrvání v této hladině 0 minut a následné klesání po dobu 25 minut na přistání. Je-li let kratší, pak se stoupání zastaví v průsečíku úseček stoupání a klesání, čímž je omezena hladina pro výpočet dávky. Pro přesnější výpočty je možné případně zadefinovat i alternativní letové hladiny (postupné stoupání) a kompletní trasu letu.

Program CARI-7 nahrazuje starší programy CARI-6, -6M, -6P, -6PM, C6 a -6W. Významnou změnou v novějším programu CARI-7 je možnost použití nových radiačních váhových faktorů. Program CARI-6 k výpočtu používá radiační váhové faktory dle doporučení ICRP 60 z roku 1991, kde radiační váhový faktor pro protony s energiemi E > 2 MeV byl stanoven w_R = 5. Oproti tomu má CARI-7 možnost volby v použití radiačních váhových faktorů dle doporučení ICRP 60, nebo dle nového doporučení ICRP 103 z roku 2007, kde již mají protony w_R = 2 (*viz. tabulka 10*). Je tak možné očekávat, že hodnoty dávek stanovených novou verzí programu budou na některých letech přibližně o 20 % nižší. Program CARI používá rozhraní příkazového řádku a může být spuštěn na většině osobních počítačů.

Program CARI-7 bere v úvahu změny nadmořské výšky a zeměpisné polohy v průběhu letu na základě informací poskytnutých uživatelem, stejně jako předchozí verze programu CARI. Pro měsíční průměrné výpočty se používají databáze k zohlednění vlivů změn zemského magnetického pole a sluneční aktivity na úroveň galaktického záření v atmosféře. Lety je také dále možno specifikovat přímo pro konkrétní hodiny daných dnů. Program CARI-7A se od modelu CARI-7 liší především tím, že je určen pro akademické (vědecké) uživatele a má více možností nastavení a voleb parametrů [28].

Pro běžného uživatele je k dispozici internetová verze staršího programu CARI-6, s jejíž pomocí je možné stanovit odhad dávky obdržené při konkrétním letu od galaktického kosmického záření. Zatím nejsou k dispozici žádné programy nebo webové aplikace, které by mohly být použity pro odhad příspěvku efektivní dávky, jež je přijata od částic slunečních událostí. Dávku ionizujícího záření, kterou jednotlivec může obdržet během sluneční události nelze předem odhadnout. V současnosti probíhá výzkum toho, jak nejlépe tyto letové dávky odhadnout na základě satelitních a pozemních měření provedených během dané sluneční události. Webová aplikace staršího programu CARI-6 (*obrázek 22*) vypočítává efektivní dávku galaktického kosmického záření přijatého jednotlivcem na ortodromické letové trase mezi zvolenými letišti odletu a příletu kdekoliv na světě (definováno ICAO kódem letiště). Webová aplikace bere v úvahu změny nadmořské výšky a zeměpisné polohy v průběhu letu podle zadání letového profilu uživatelem. Dále jsou pro daný den, kdy byl let proveden, použity příslušné databáze, které berou v úvahu účinky změn magnetického pole Země, a databáze změn sluneční aktivity, která má vliv na úroveň galaktického kosmického záření. Pomocí webové aplikace je také možné vypočítat efektivní dávku galaktického kosmického záření v libovolném místě v atmosféře až do nadmořské výšky 60000 stop. Aplikaci CARI-6 nalezneme na webové stránce http://jag.cami.jccbi.gov/cariprofile.asp [29].



Obrázek 22 - Webová aplikace pro výpočet efektivních dávek CARI 6 [29].

7.3 Stanovení radiační zátěže měřením

S pomocí detektorů (dozimetrů) je možné stanovit radiační zátěž měřením a ověřit výpočty efektivních dávek. Z hlediska přepravy nebezpečného zboží u těchto detektorů posuzujeme elektromagnetické rušení a bezpečnost použitých napájecích baterií. Těmito faktory se kromě předpisu s požadavky na převoz nebezpečného zboží zabývá i norma ISO 20785-3, o které již byla zmínka v kapitole 5.2. Se souhlasem leteckého provozovatele a kapitána letadla je dozimetr umístěn do letadla na vhodné místo a zabezpečen proti pohybu. Dozimetrem je za letu měřen prostorový dávkový ekvivalent, nejčastěji H*(10). V České republice nejsou tato měření nařízena zákonem, například na Slovensku je zákonem nařízené provádět tato měření alespoň jednou ročně na sérii letů a porovnat výsledky měření s hodnotami vypočtenými používaným programem (např. CARI). Pokud jsou zjištěny významné rozdíly mezi měřením a výpočty, je nutné upravit vstupní letové parametry zadávané do výpočetního programu. Jako konzervativní metodu je tak vhodné volit takové letové parametry, které budou efektivní dávky spíše mírně nadhodnocovat, nežli podhodnocovat.

7.3.1 **Používané detektory**

Běžná měření jsou na letadlech v České republice prováděna nejčastěji pomocí detektoru typu Liulin. Jedná se o 256 kanálový křemíkový spektrometr deponované energie, který je možné po kalibraci v zemském poli CERF (The CERN EU High Energy Reference Field facility)

v CERNu[6] použít ke stanovení prostorového dávkového ekvivalentu H*(d), nejčastěji pro hloubku d = 10mm.

Na jaře roku 2017 vykonalo jedno z letadel testovaného provozovatele sérii letů směrem na západ, při nichž obletělo přibližně během jednoho měsíce svět. Na jeho palubu bylo pro tento let uloženo několik dozimetrů, mezi nimiž byl, kromě již zmíněného detektoru Liulin, také detektor AIRDOS, složený kromě detekčního prvku také z modulu GPS. Dále byl použit dozimetr Polimaster od Slovenské Akademie Věd a tři malé pasivní dozimetry (bez nutnosti napájení) vyrobené na ÚJF AV ČR. Na *obrázcích 23 a 24* můžeme vidět tyto dozimetry ještě před jejich uložením do pilotní kabiny.

Obrázek 23 - Dozimetr Liulin (vlevo) a dozimetr AIRDOS (foto Petr Ploc)

[6] CERN je evropská organizace pro jaderný výzkum se sídlem v Ženevě ve Švýcarsku.

Obrázek 24 - Doizimetr Polimaster (vlevo) a pasivní detekční prvek ÚJF AV ČR (foto Petr Ploc)

7.3.2 **Porovnání výpočtu a měření**

Osobní efektivní dávky posádek letadel při konkrétních letech je možné ověřit porovnáním hodnot stanovených programem (například CARI) a hodnot změřených pomocí dozimetru (například Liulin). Detektor se nejčastěji umísťuje přímo do pilotní kabiny na vhodné místo a z důvodu bezpečnosti se zajistí proti pohybu. Prostorový dávkový ekvivalent H*(10) pro detektor Liulin se následně stanoví pomocí níže uvedeného *vzorce 10*.

Vzorec 10: $H^*(10) = k_{low} \,.\, D_{low} + k_{high} \,.\, D_{high}$

Koeficienty k_{low} and k_{high} jsou pro detektor stanovené v poli CERF a dávky D_{low} a D_{high} jsou pro Liulin vypočtené na základě naměřených hodnot podle *vzorce 11 a 12*.

Vzorec 11: $D_{low} = \sum_{\varepsilon<1MeV} D_{Si,i} = \frac{1}{m} . \sum_{i=1}^{14} N_i . \varepsilon_i$

Vzorec 12: $D_{high} = \sum_{\varepsilon>1MeV} D_{Si,i} = \frac{1}{m} . \sum_{i=15}^{256} N_i . \varepsilon_i$

V uvedených vzorcích m představuje hmotnost citlivého objemu, N_i počet impulzů a ε_i energii i-tého kanálu spekrtometru. V případě detektoru Liulin se jedná o 256 kanálů, přičemž platí *vzorec 13*.

Vzorec 13: $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} = 81{,}4$ keV

Naměřený prostorový dávkový ekvivalent H*(10) nadhodnocuje efektivní dávku *E* pro většinu pracovišť s možností ozáření. V případě určování zátěže kosmickým zářením, při použití radiačních váhových faktorů dle ICRP 60, může být opak pravdou. Protože starší program CARI-6 počítá přímo hodnoty limitní veličiny, kterou je v našem případě efektivní dávka *E*, je pro porovnání možné tuto hodnotu přepočítat na prostorový dávkový ekvivalent H*(10) s pomocí konverzního faktoru 0,8, který byl stanoven Evropskou komisí v publikaci *„Evaluation of the implementation of radiation protection measures for aircrew“* Avšak převod s pomocí konverzního faktoru se doporučuje uplatnit pouze na severní polokouli. V jiných případech (někteří vědci to doporučují vždy), je možné pro představu porovnat veličiny E a H*(10) přímo mezi sebou.

Je vhodné použít novější program CARI-7, s jehož pomocí je možné stanovit přímo i prostorový dávkový ekvivalent H*(10). Následné součty prostorových dávkových ekvivalentů stanovených z vypočtených efektivních dávek (případně součtů efektivních dávek samotných) a součty prostorových dávkových ekvivalentů stanovených přímo měřením jsou porovnány, čímž je mezi nimi určen percentuální rozdíl, tedy míra podhodnocení nebo nadhodnocení výpočtu vzhledem k naměřeným hodnotám [30].

8 Zpracování rutinních výpočtů a měření

Následující kapitoly se zabývají zpracováním rutinních výpočtů a porovnáním těchto výpočtů s měřením. Jsou zde použita data od testovaného provozovatele, který umožnil i provedení experimentálního měření na jednom z jeho letadel při letu kolem světa.

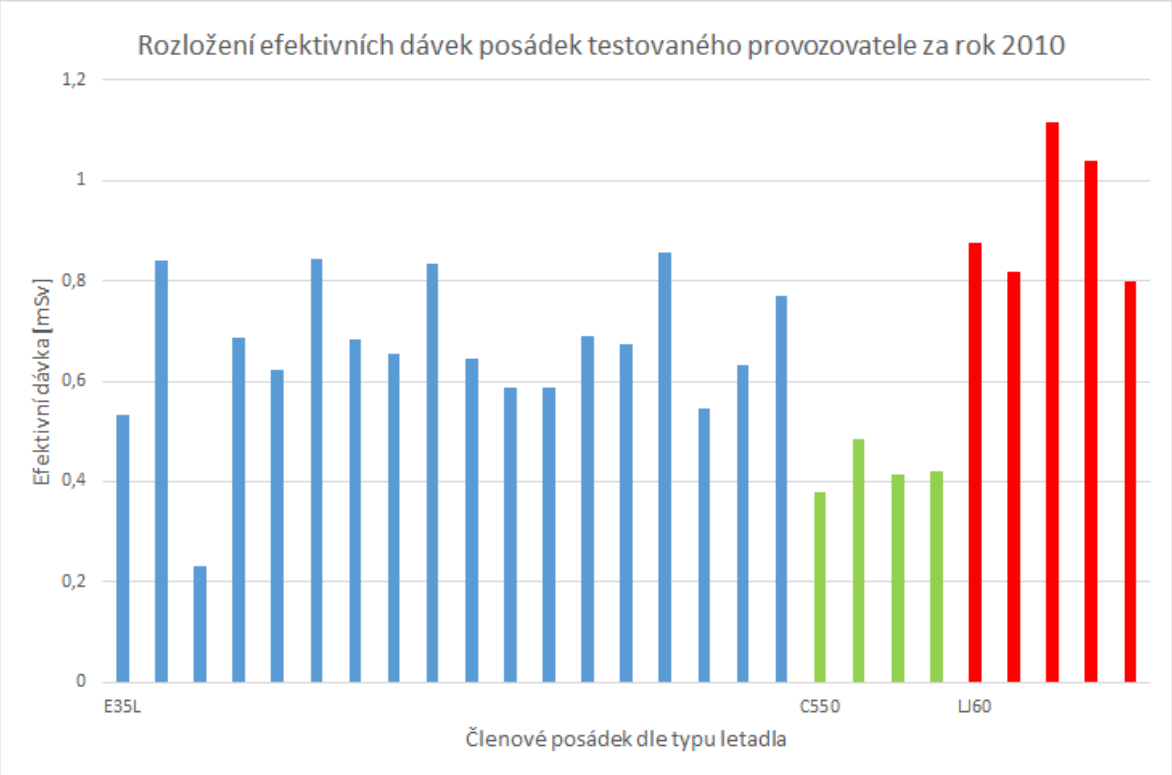
8.1 Efektivní dávky stanovené výpočtem u testovaného provozovatele

Letecký provozovatel provozující letadla na letech ve výškách nad 8 km musí pro své posádky, prostřednictvím oprávněné dozimetrické služby, nechat stanovit osobní efektivní dávky a jednou ročně posádky o jejich dávkách a zdravotních rizicích informovat. Výsledky ozáření zaměstnanců v České republice musí provozovatel z důvodu monitorování osob odesílat na SÚJB a zároveň archivovat po dobu 12 měsíců od té doby, kdy případný člen posádky ukončí svůj pracovní poměr u provozovatele. Za naši firmu (testovaný provozovatel) jsem od roku 2007 až do současnosti pověřeným pracovníkem. Mám na starosti spolupráci s ÚJF AV ČR (poskytovatel oprávněné dozimetrické služby) ve věci stanovení radiační zátěže posádek a s tím spojenými povinnostmi. Během uplynulých let jsem tak nasbíral mnoho dat a dohromady s ÚJF AV ČR provedl i několik měření na letech letadel Embraer Legacy 600 a Gulfstream G550. Pro

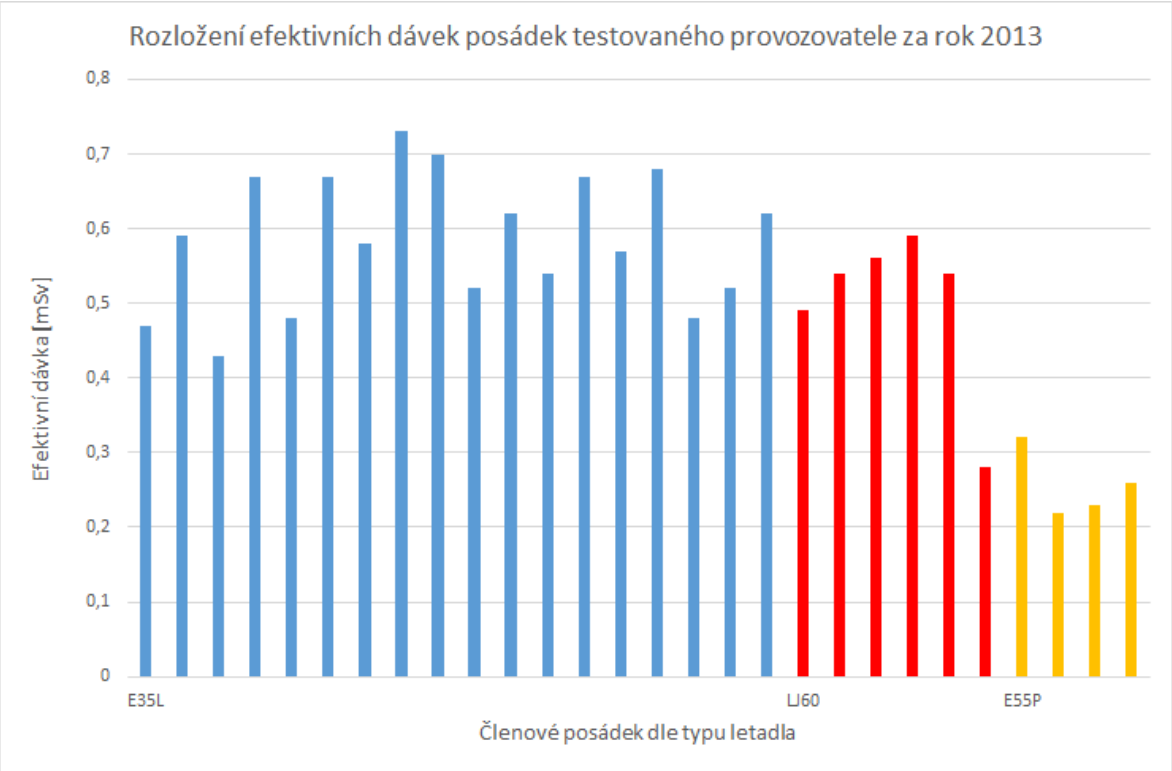
posádky bázované v Praze se dle české legislativy považuje za dostatečné provádět pouze výpočty ročních efektivních dávek. Pro členy posádek bázovaných v Bratislavě je dle slovenské legislativy nutné tyto výpočty provádět čtvrtletně. Dvěma členům slovenských posádek testovaného provozovatele je proto přiřazena funkce odborných zástupců ve věci ozáření kosmickým zářením. Tito zástupci mají, kromě komunikace se slovenským úřadem, za úkol kontrolovat, zda u nějakého člena posádek v daném roce nehrozí překročení efektivní dávky 6 mSv na základě součtu efektivních dávek pravidelných čtvrtletních výpočtů. Efektivní dávky členů leteckých posádek testovaného provozovatele byly doposud stanovovány výpočetním programem CARI-6. Na základě dat charakterizujících uskutečněné lety a upřesňujících účast jednotlivých členů na nich (soubor absolvovaných letů), které dodávám ve formě textového dokumentu na ÚJF AV ČR, byla spočtena hodnota efektivní dávky pro každý absolvovaný let. Efektivní dávka každého člena letecké posádky byla dále spočtena jako součet efektivních dávek ze všech letů s letovou hladinou nad 8 km, kterých se tato osoba zúčastnila za daný kalendářní rok. Pro vybrané roky můžeme na *obrázcích 25, 26 a 27,* uvedených níže, vidět rozložení vybraných efektivních dávek posádek dle jednotlivých typů letadel létajících pro testovaného provozovatele. Z důvodu ochrany osobních údajů a soukromí jednotlivců jsou výsledné hodnoty uvedeny pouze pomocí sloupcových grafů bez možnosti identifikace jednotlivých členů posádek. Pro každý typ letadla v *tabulce 20* uvádím letové parametry, které byly při výpočtech použity. Kombinovaná nejistota vypočtených hodnot je dle protokolů o určení efektivních dávek, zpracovanými ÚJF AV ČR, na úrovni 2σ rovna ~25 %.

Tabulka 20 - Použité letové parametry pro výpočty efektivních dávek pro níže uvedené případy (r.2010, 2013, 2016).

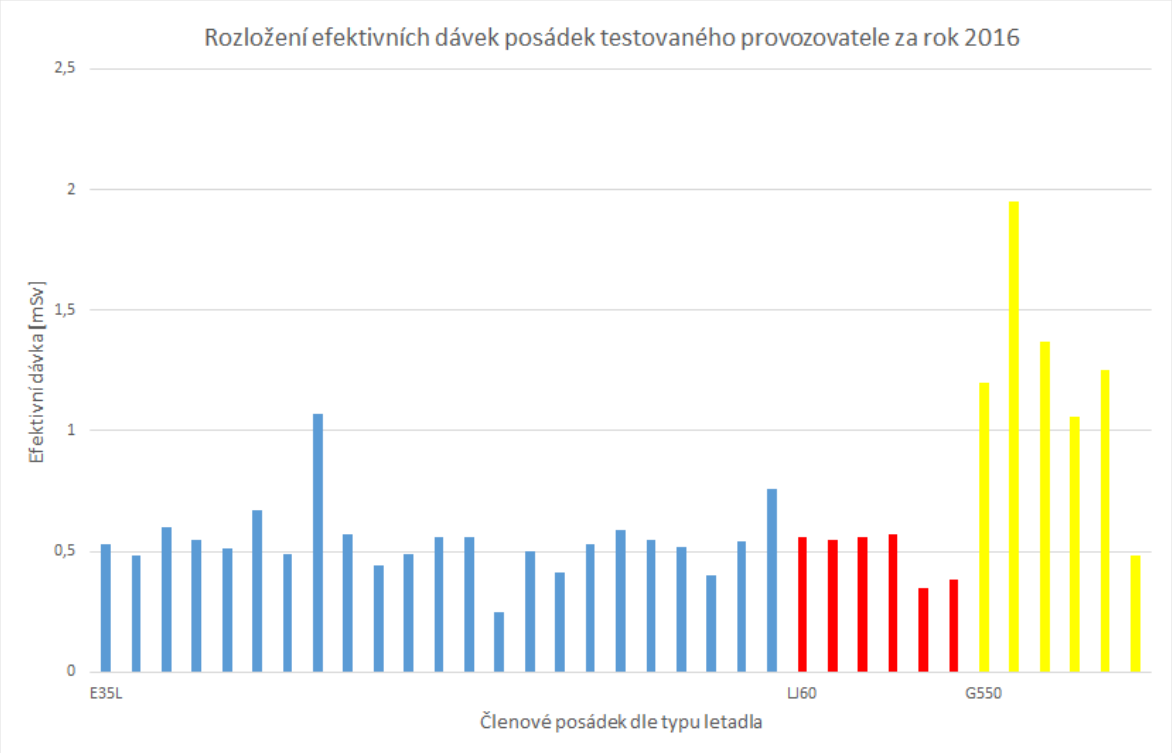
ICAO kód letadla	Celý název letadla	Doba stoupání [min]	Modelová letová hladina [ft]	Doba klesání [min]
E35L	Embraer Legacy 600	18	35 000	25
C550	Cessna 550 Citation	18	30 000	25
LJ60	Learjet 60XR (rok 2010)	18	38 000	25
LJ60	Learjet 60XR (rok 2013)	18	35 000	25
E55P	Embraer Phenom 300	18	35 000	25
G550	Gulfstream G550	20	43 000	25



Obrázek 25 - Rozložení efektivních dávek mezi jednotlivé členy posádek dle typu letadla za rok 2010.



Obrázek 26 - Rozložení efektivních dávek mezi jednotlivé členy posádek dle typu letadla za rok 2013.



Obrázek 27 - Rozložení efektivních dávek mezi jednotlivé členy posádek dle typu letadla za rok 2016.

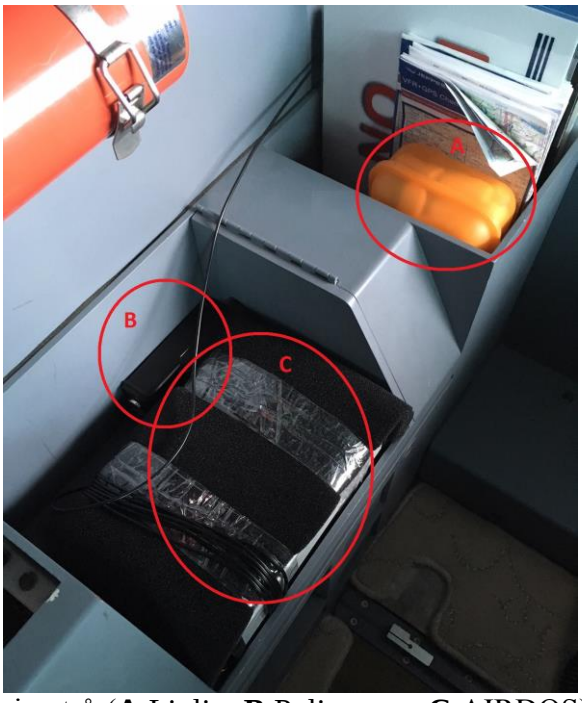
Z uvedených grafů je patrný rozdíl efektivních dávek pro posádky letadel LJ60 mezi rokem 2010 a 2013. Důvodem byl pokus o sjednocení modelové letové hladiny pro výpočet s ostatními typy letadel v roce 2013. Z grafů je patrné, že efektivní dávky většiny členů posádek testovaného provozovatele nepřesahují směrodatnou hodnotu 1 mSv. Pouze v ojedinělých případech dávky dosáhly hodnoty větší než 1 mSv a v jednom případě dosáhla dávka u člena posádky létajícího na letadle Gulfstream G550 hodnoty téměř 2 mSv. Poměrně nízké dávky jsou pravděpodobně převážně dány typem provozu společnosti testovaného provozovatele. Je též možné, že zvolené letové parametry pro výpočet dávek neodpovídaly skutečnosti a dávky byly mírně podhodnocovány.

Vzhledem k provedeným měřením v uplynulém roce, na základě jednání s vědci z ÚJF AV ČR, budou vstupní parametry pro výpočet efektivních dávek pro další roky upraveny tak, aby byla dávka spíše mírně nadhodnocena. Díky tomu bude možné lépe vyhovět požadavkům legislativy a lépe zabezpečit ochranu zdraví posádek.

Pro letadlo E35L (Embraer Legacy 600) to znamená, že pro výpočet ozáření za rok 2017, který se bude provádět na začátku roku 2018, budeme zřejmě navyšovat modelovou letovou hladinu na hodnotu 36 000 stop a upravovat dobu stoupání na 25 minut (eliminace kratších letů).

8.2 Experimentální ověření výpočtu dávek u testovaného provozovatele

Při příležitosti cesty letadla Embraer Legacy 600 okolo světa, která se skládala celkem ze 17 letů, byl proveden experiment, na kterém byly naměřeny dávky kosmického záření na palubě letadla s pomocí přístrojů uvedených v kapitole 7.3.1. Uložení přístrojů v kokpitu letadla můžeme vidět na *obrázku 28*.



Obrázek 28 - uložení dozimetrů (**A** Liulin, **B** Polimaster, **C** AIRDOS) v pilotní kabině letadla E35L.

V této kapitole provedeme porovnání naměřených dat přístrojem Liulin vzhledem k výpočtům pomocí programů, čímž ověříme jejich věrohodnost. Výpočet efektivních dávek je zde proveden pomocí interaktivní aplikace CARI-6, dostupné pro běžné uživatele na internetových stránkách FAA (viz. kapitola 7.2), a s pomocí programu CARI-7 ve spolupráci s ÚJF AV ČR. Programem CARI-7 byl pro každý let stanoven i prostorový dávkový ekvivalent *H*(10)*. Jednotlivé výpočty provedené programem CARI-6 můžeme nalézt v *příloze D*. Tím je možné porovnat rozdíly ve výpočtech těchto dvou programů. Postup výpočtu *H*(10)* z naměřených dávek dozimetrem je obdobným postupem, který je uveden v kapitole 7.3.2. Výsledné hodnoty z provedeného měření mi byly dodány dozimetrickou službou ÚJF AV ČR. Soubor absolvovaných letů je uveden v *tabulce 22* níže. V *příloze C* vidíme geografickou projekci trasy letu, zobrazenou programem Google Earth, pro kterou jsem obdržel data ze zapisovače letadla (Quick Access Recorder - QAR). V průběhu cesty došlo z důvodu objemu dat k zaplnění interní paměti zapisovače, a proto je projekce trasy posledních dvou letů pouze odhadnuta. V přílohách a ve výpočtech nejsou zahrnuty lety trvající kratší dobu než 30 minut, neboť je velmi pravděpodobné, že na tak krátkém úseku letadlo nedosáhlo hladinu vyšší než 8 km. V *příloze E* můžeme vidět porovnání dávkového příkonu pro každý let z naměřených dat dozimetrem Liulin (v 5 minutových intervalech) s průměrným dávkovým příkonem stanoveným podílem

vypočteného prostorového dávkového ekvivalentu *H*(10)* programem CARI-7 pro hladinu 36 000 ft a doby letu.

Výpočty programem CARI-6 a CARI-7 jsou provedeny pro ortodromické trasy letu, tedy pro nejkratší možnou trasu spojující dvě letiště na zemském povrchu (po velké kružnici - great circle). Jak je patrné z *přílohy C*, tak se skutečná trasa letu od ortodromické tratě výrazně neliší. Je možné předpokládat, že i v blízkém okolí skutečné trati (do vzdálenosti několika desítek až stovek námořních mil) bude radiační pole kosmického záření velmi podobné. Chybu při určování dávek na ortodromické trase oproti trase skutečné můžeme tedy považovat za zanedbatelnou. Časy vzletu a přistání jsou odepsány přímo z dat palubního počítače letadla (FMS - Flight Management System). *Tabulka 21* je rozdělena na tři části a obsahuje již nově definované letové parametry letadla E35L, na rozdíl od letových parametrů používaných v minulých letech. První část udává parametry pro internetovou aplikaci CARI-6 a druhá a třetí část udává parametry pro program CARI-7. Porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočítanými pomocí programu CARI je možné vidět v *tabulkách 23, 24 a 25*. Kombinovaná nejistota vypočtených hodnot je na úrovni 2σ rovna ~25 %.

Tabulka 21 - Letové parametry pro výpočet efektivních dávek pomocí programu CARI pro lety uvedené v tabulce 22. Pro program CARI-7 byly pro porovnání použity 2 rozdílné hodnoty modelové letové hladiny.

Program	ICAO kód letadla	Doba stoupání T_1 [min]	Modelová letová hladina [ft]	Maximální letová hladina [ft]	Minimální doba letu T_2 v modelové hladině před dostoupáním do maximální hladiny [min]	Pokud relevantní, doba letu v maximální hladině T_3 [min]	Doba klesání T_4 [min]
CARI-6	E35L	25	38 000	40 000	155	$T_3=T-T_1-T_2-T_4$	25
a) CARI-7			36 000	36 000	-	-	
b) CARI-7			38 000	38 000	-	-	

Tabulka 22 - Absolvované lety experimentu, specifikované pomocí data letu, ICAO kódu letiště odletu a příletu (viz. *příloha C*), zeměpisných souřadnic, času vzletu a přistání.

DATE	ICAO DEP	ICAO ARR	LAT/LON DEP	LAT/LON ARR	T/O TIME (UTC)	LDG TIME (UTC)	FLT TIME (min)
04/2017	LKPR	LPLA	N50 06.1 E014 15.6	N38 45.7 W027 05.5	22:41	3:18	277
04/2017	LPLA	TFFR	N38 45.7 W027 05.5	N16 15.9 W061 31.6	4:18	10:33	375
04/2017	TFFR	TFFF	N16 15.9 W061 31.6	N14 35.5 W060 59.8	18:31	18:59	28
04/2017	TFFF	KHOU	N14 35.5 W060 59.8	N29 38.7 W095 16.7	21:41	3:22	341
04/2017	KHOU	KLAX	N29 38.7 W095 16.7	N33 56.6 W118 24.5	5:03	8:18	195
04/2017	KLAX	PHLI	N33 56.6 W118 24.5	N21 58.6 W159 20.3	9:25	16:02	397
04/2017	PHLI	PHNL	N21 58.6 W159 20.3	N21 19.1 W157 55.2	20:13	20:38	25
04/2017	PHNL	PHLI	N21 19.1 W157 55.2	N21 58.6 W159 20.3	1:49	2:17	28
04/2017	PHLI	NSFA	N21 58.6 W159 20.3	S13 49.8 W171 59.8	17:40	23:39	349
04/2017	NSFA	NZRO	S13 49.8 W171 59.8	S38 06.6 E176 19.0	0:30	4:31	241
04/2017	NZRO	NZAA	S38 06.6 E176 19.0	S037 00.5 E174 47.5	0:31	0:58	27
05/2017	NZAA	YSSY	S037 00.5 E174 47.5	S33 56.8 E151 10.6	6:26	9:47	201
05/2017	YSSY	YPDN	S33 56.8 E151 10.6	S12 24.9 E130 52.6	12:48	17:21	273
05/2017	YPDN	WSSL	S12 24.9 E130 52.6	N01 25.0 E103 52.1	18:51	23:27	276
05/2017	WSSL	VOMM	N01 25.0 E103 52.1	N12 59.7 E080 10.5	14:00	18:03	243
05/2017	VOMM	OMDW	N12 59.7 E080 10.5	N24 55.1 E055 10.5	19:10	23:14	244
05/2017	OMDW	LKPR	N24 55.1 E055 10.5	N50 06.1 E014 15.6	0:25	7:01	396

Tabulka 23 - Prostorové dávkové ekvivalenty H*(10) naměřené detektorem Liulin a efektivní dávky vypočtené pomocí internetové verze programu CARI-6 pro vertikální profil dle tabulky 21. Poslední sloupec tabulky uvádí percentuální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami. CARI-6 počítá přímo hodnoty limitní veličiny, kterou je v našem případě efektivní dávka *E*. Porovnáváme zde tedy dvě rozdílné veličiny se shodnými jednotkami: limitní veličinu *E* a H*(10), který slouží jako její konzervativní odhad. Vzhledem k tomu, že z databáze výpočetního programu není možné zvolit letiště OMDW, bylo použito jemu blízké letiště OMDB.

Datum	ICAO DEP	ICAO ARR	Doba letu	H*(10) LIULIN [µSv]	E (CARI-6) FL380/400 [µSv]	Relativní rozdíl H*(10) a E [%]
04/2017	LKPR	LPLA	277	22,4	24,3	8
04/2017	LPLA	TFFR	375	21,1	23,9	13
04/2017	TFFR	TFFF	28	x	x	x
04/2017	TFFF	KHOU	341	21,0	23,9	14
04/2017	KHOU	KLAX	195	13,9	14	1
04/2017	KLAX	PHLI	397	24,7	25,1	2
04/2017	PHLI	PHNL	25	x	x	x
04/2017	PHNL	PHLI	28	x	x	x
04/2017	PHLI	NSFA	349	14,7	15,5	5
04/2017	NSFA	NZRO	241	14,6	13,6	-7
04/2017	NZRO	NZAA	27	x	x	x
05/2017	NZAA	YSSY	201	16,9	15,6	-8
05/2017	YSSY	YPDN	273	16,5	16,7	1
05/2017	YPDN	WSSL	276	11,0	11,4	4
05/2017	WSSL	VOMM	243	8,5	8,8	3
05/2017	VOMM	OMDB	244	9,7	9,4	-3
05/2017	OMDB	LKPR	396	29,9	28	-6

Tabulka 24 - Prostorové dávkové ekvivalenty naměřené detektorem Liulin a vypočtené efektivní dávky a prostorové dávkové ekvivalenty pomocí programu CARI-7 pro vertikální profil dle tabulky 21, řádku a) CARI-7. Poslední sloupec tabulky uvádí percentuální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami prostorového dávkového ekvivalentu. Vzhledem k tomu, že z databáze výpočetního programu není možné zvolit letiště OMDW, bylo použito jemu blízké letiště OMDB.

Datum	ICAO DEP	ICAO ARR	Doba letu	H*(10) LIULIN [µSv]	E (CARI-7) FL360 [µSv]	H*(10) FL360 (CARI-7) [µSv]	Relativní rozdíl H*(10) [%]
04/2017	LKPR	LPLA	277	22,4	22,8	24,3	9
04/2017	LPLA	TFFR	375	21,1	19,6	20,1	-5
04/2017	TFFR	TFFF	28	x	x	x	x
04/2017	TFFF	KHOU	341	21,0	21,9	22,9	9
04/2017	KHOU	KLAX	195	13,9	16	17	22
04/2017	KLAX	PHLI	397	24,7	22	22,8	-8
04/2017	PHLI	PHNL	25	x	x	x	x
04/2017	PHNL	PHLI	28	x	x	x	x
04/2017	PHLI	NSFA	349	14,7	13,7	13,7	-7
04/2017	NSFA	NZRO	241	14,6	13,5	13,9	-5
04/2017	NZRO	NZAA	27	x	x	x	x
05/2017	NZAA	YSSY	201	16,9	17	18,2	8
05/2017	YSSY	YPDN	273	16,5	15,6	16,1	-2
05/2017	YPDN	WSSL	276	11,0	10,2	10,1	-8
05/2017	WSSL	VOMM	243	8,5	8,4	8,3	-2
05/2017	VOMM	OMDB	244	9,7	9	8,9	-8
05/2017	OMDB	LKPR	396	29,9	24,6	25,7	-14

Tabulka 25 - Prostorové dávkové ekvivalenty naměřené detektorem Liulin a vypočtené efektivní dávky a prostorové dávkové ekvivalenty pomocí programu CARI-7 pro vertikální profil dle tabulky 21, řádku b) CARI-7. Poslední sloupec tabulky uvádí percentuální rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami prostorových dávkových ekvivalentů. Vzhledem k tomu, že z databáze výpočetního programu není možné zvolit letiště OMDW, bylo použito jemu blízké letiště OMDB.

Datum	ICAO DEP	ICAO ARR	Doba letu	H*(10) LIULIN [µSv]	E (CARI-7) FL380 [µSv]	H*(10) FL380 (CARI-7) [µSv]	Relativní rozdíl H*(10) [%]
04/2017	LKPR	LPLA	277	22,4	25	26,6	19
04/2017	LPLA	TFFR	375	21,1	21,3	21,8	3
04/2017	TFFR	TFFF	28	x	x	x	x
04/2017	TFFF	KHOU	341	21,0	23,9	24,9	18
04/2017	KHOU	KLAX	195	13,9	17,5	18,6	34
04/2017	KLAX	PHLI	397	24,7	24	24,7	0
04/2017	PHLI	PHNL	25	x	x	x	x
04/2017	PHNL	PHLI	28	x	x	X	x
04/2017	PHLI	NSFA	349	14,7	14,8	14,7	0
04/2017	NSFA	NZRO	241	14,6	14,7	15,1	4
04/2017	NZRO	NZAA	27	x	x	x	x
05/2017	NZAA	YSSY	201	16,9	18,7	19,9	18
05/2017	YSSY	YPDN	273	16,5	17	17,5	6
05/2017	YPDN	WSSL	276	11,0	11	10,9	0
05/2017	WSSL	VOMM	243	8,5	9,1	9	5
05/2017	VOMM	OMDB	244	9,7	9,7	9,6	-1
05/2017	OMDB	LKPR	396	29,9	26,9	28	-6

Suma prostorových dávkových ekvivalentů H*(10) naměřených dozimetrem Liulin na všech uvažovaných letech cesty kolem světa je rovna 225 ± 56 μSv. Porovnáme-li tedy naměřené hodnoty s výpočtem, jsme schopni určit, jakou modelovou hladinu je vhodné pro výpočty zvolit jako optimální.

Pro internetovou aplikaci CARI-6 dle tabulky 23 platí:

Suma vypočtených efektivních dávek programem CARI-6 je rovna 230 ± 57 μSv. Možnosti programu jsou omezené, takže porovnáváme přímo limitní veličinu, kterou je efektivní dávka a operační veličinu, kterou je prostorový dávkový ekvivalent. I když se nejedná o dvě stejné veličiny, pro naše účely to postačí. Můžeme konstatovat, že profil letu byl vzhledem k naměřené a vypočtené radiační zátěži zvolen poměrně správně. Z tabulky je vidět, že pouze u dvou letů došlo k nadhodnocení výpočtem většímu než 10 % a ve čtyřech případech k mírnému podhodnocení. Celkově výpočet nadhodnotil efektivní dávky přibližně o 2 %.

Pro program CARI-7 dle tabulky 24 platí:

Suma vypočtených efektivních dávek programem CARI-7 je rovna 215 ± 54 μSv a suma vypočtených prostorových dávkových ekvivalentů je rovna 222 ± 56 μSv. Můžeme tak porovnat přímo operační veličinu, kterou je prostorový dávkový ekvivalent. Výsledek je tak zatížen nižší chybou, než v předešlém případě. Z tabulky je vidět, že pouze u jednoho letu došlo k nadhodnocení dávky výpočtem o více než 10 % a v devíti případech k mírnému podhodnocení. Nejvíce byl výpočet podhodnocen na letu z Dubaje do Prahy a to o 14 %. V celkovém součtu výpočet podhodnotil prostorový dávkový ekvivalent přibližně o 1,3 %.

Pro program CARI-7 dle tabulky 25 platí:

Suma vypočtených hodnot efektivních dávek je rovna 234 ± 59 μSv a suma vypočtených prostorových dávkových ekvivalentů je rovna 241 ± 60 μSv. V tomto případě opět porovnáváme přímo operační veličinu. U čtyř letů je vypočtená dávka nadhodnocena o více než 10 % a v jednom z letů mezi Houstonem a Los Angeles dokonce o 34 %. K mírnému podhodnocení došlo pouze ve dvou případech a celkově výpočet nadhodnotil skutečnost přibližně o 7 %.

Z výše uvedeného vyplývá, že nejvhodnější variantou se zdá být použití výpočetního programu CARI-7 a volba modelové hladiny s hodnotou 36 000 stop. Rozdíl od skutečnosti je v tomto

případě pouze 1,3 %. Při porovnání jednotlivých součtů naměřeného a vypočteného prostorového dávkového ekvivalentu je rozdíl od skutečnosti v tomto případě pouze 1,3 %. Skutečná dávka je jistě závislá na mnoha dalších faktorech, jako například na slunečních událostech, na bouřkové aktivitě atp., které není možno ve výpočtech zohlednit. Vzhledem k tomu, že kombinovaná nejistota výpočtu sama o sobě dosahuje velikosti 25 %, je námi zjištěný rozdíl poměrně zanedbatelný. Z důvodu ochrany lidského zdraví se ovšem nabízí spíše konzervativnější řešení, kterým může být například volba modelové letové hladiny s hodnotou například 37 000 stop, nebo zkrácení časů stoupání a klesání. Modelovou hladinu 37 000 stop můžeme například použít v budoucích experimentálních ověřeních.

9 Úpravy plánů služeb letových posádek

Zákon č. 263/2016 Sb., § 93, odst. (3) uvádí, že provozovatel provozující letadla na letech ve výškách nad 8 km, na nichž může být efektivní dávka člena posádky letadla vyšší než 1 mSv za rok, je povinen hodnotit ozáření členů posádek letadel. Na základě výsledků zvážit úpravu rozpisu služeb členů posádek letadla za účelem snížení radiační zátěže v příštím období (viz. příloha B).

Provozovatel má tak vesměs tři možnosti, jak postupovat v případě překročení stanovené úrovně některým ze členů posádek letadel a jak jim snížit radiační zátěž:

a) **snížit pracovní vytíženost člena posádky omezením počtu letových hodin** - toto řešení se zdá být jednoduché, ovšem pro většinu provozovatelů zřejmě obtížně realizovatelné. Pokud by byl provozovatel nucen snižovat služby svých posádek pod hodnotu limitů služeb stanovených předpisy, znamenalo by to buď nutnost rekrutovat další pracovní síly, nebo rušit lety. V obou případech přichází firma o zisk a řešení je pro ni neekonomické. Okamžité řešení je však nutné tehdy, pokud by efektivní dávky členů posádek dosahovaly hodnot 6 mSv.

b) **létat v nižších letových hladinách** - jelikož je zemská atmosféra velmi silným ochranným štítem proti kosmickému záření, bylo by toto řešení velice účinné. Realizace takového řešení je pro provozovatele zřejmě nepřijatelná. Létáním ve vyšších hladinách jsou snižovány náklady společnosti díky nižší spotřebě paliva. Lety ve vyšších

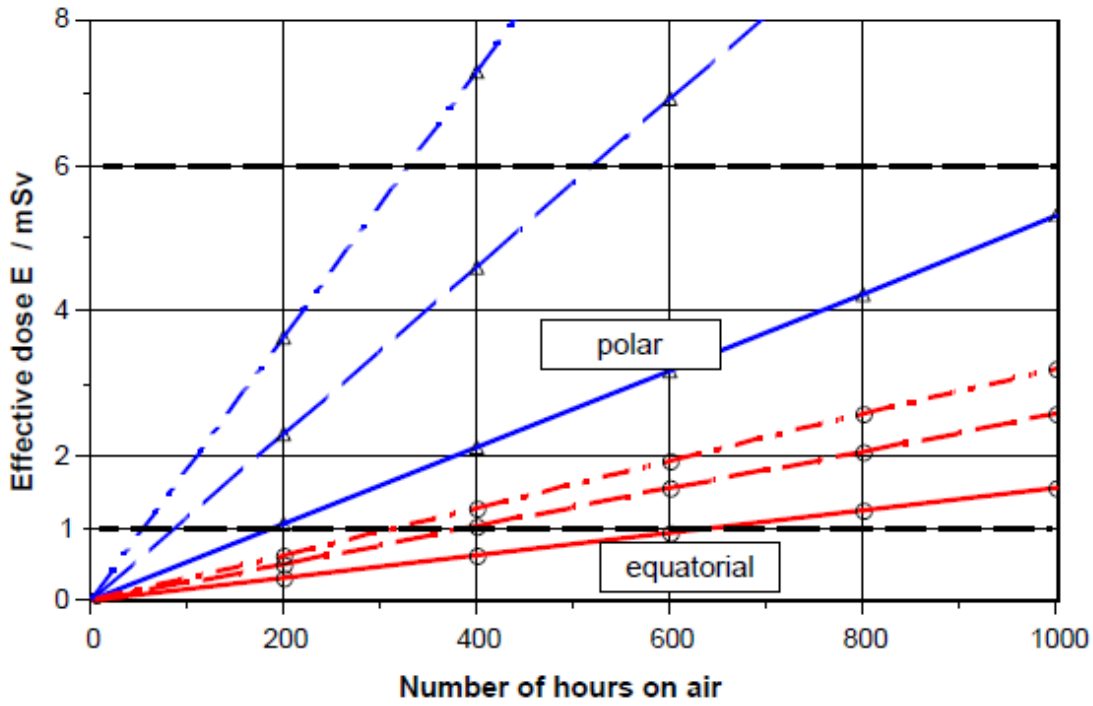
hladinách díky tomu snižují i ekologický dopad provozu letadel na naši planetu. Řešení není tedy ani ekonomicky, ani ekologicky výhodné.

c) **plánovat posádky na lety dle destinací** - pokud provozujeme leteckou společnost s rozsáhlou sítí linek, bylo by možné, v závislosti na geomagnetické poloze destinace, plánovat posádky na určité lety dle jejich aktuální radiační zátěže. Například posádky s relativně nízkými dávkami by bylo možné plánovat na lety směrem k pólům a posádky s vyššími dávkami na lety směrem k rovníku. U společností, které pronajímají svá letadla a posádky do cizích zemí, by tak bylo například možné posádky z Kanady přesunout na další období do Ománu, apod. Toto řešení je velmi dobře patrné z provedeného experimentu na letu kolem světa. Vzhledem k podobně dlouhým letům je vidět, jak se dávky poměrně razantně liší v závislosti na geomagnetické poloze letadla.

Již víme, že průměrná dávka běžného občana v České republice činí přibližně 3,4 mSv. Při lékařské diagnostice a terapii jsou lidé opět ozařováni a kumulovaná dávka se tím zvyšuje. Průměrná celosvětová dodatečná dávka od kosmického záření pro posádky letadel je přibližně 3 mSv za rok. Tato fakta by provozovatel měl vzít v úvahu a z výše uvedených možností zvolit rozumný kompromis. Hlavní prioritou provozovatele bývá zisk společnosti, avšak měl by vzít ohled i na zdraví svých zaměstnanců, což mu, mimo jiné, nařizuje zákon. Také posádky mají možnost volby. Létání samo o sobě patří mezi zaměstnání, která jsou pro zdraví škodlivá. Kromě stresu, hluku, vibrací, změn tlaku, nepravidelného spánkového režimu atp., se přidává ještě i zvýšená radiační zátěž. Každý budoucí člen letové posádky by ještě před tím, než začne létat, měl zvážit, zda je ochotný podstoupit riziko dodatečného ozáření a na vlastní zodpovědnost přijmout případné následky. Limity jsou zákonem přesně stanoveny a dávky musí být monitorovány. Překročení směrodatné hodnoty 1 mSv/rok v linkové letecké dopravě na letadlech létajících v hladinách nad 8 km je více než jisté. Pomocí *obrázku 29* si můžeme velmi rychle udělat hrubou představu o tom, jak rychle je možné tuto směrodatnou hodnotu překročit v závislosti na počtu letových hodin, na zvolené letové hladině a geomagnetické poloze. Důležité tím pro provozovatele je, aby se snažil radiační zátěž rovnoměrně rozprostřít mezi všechny členy svých posádek a zabezpečit tak, aby v žádném případě dávka kteréhokoli člena nepřesáhla hodnotu 6 mSv/rok a kterékoliv těhotné členky hodnotu 1 mSv/rok. Posádky by se o své dávky měly aktivně zajímat a v případě, že se domnívají, že je jejich radiační zátěž

nadměrná vzhledem ke stanoveným limitům a v porovnání s ostatními kolegy, upozornit na tento fakt plánovací oddělení a vedení provozovatele. Provozovatel by měl mít ve své provozní příručce stanoveno, jak efektivní dávky zpracovává, jak o dávkách a zdravotních rizicích informuje své posádky a jaká přijímá opravná opatření, jestliže dojde k překročení směrodatných hodnot.

Úprava plánů služeb letových posádek, v závislosti na sledování radiační zátěže, jistě smysl má. Úprava by měla současně být, jak ekonomicky, tak ekologicky a zdravotně přijatelná. Jednou z možností by bylo vytvoření pluginu do plánovacího programu dispečerů nebo do programu plánování služeb, který by predikoval efektivní dávky pro všechny plánované lety. Na základě takové predikce by bylo možné v reálném čase snadno optimalizovat plánování a radiační zátěž rozdělovat rovnoměrně mezi všechny členy letových posádek. Při dostatečném množství zaměstnanců by bylo tímto způsobem možné zajistit relativně bezpečnou úroveň ozáření a dodržení limitů. Méně sofistikovanou možností by bylo, například, podobně jako na Slovensku, stanovení dávek v kratší periodě než je jeden rok a tedy možnost průběžného sledování stavu ozáření. Tak by bylo možné kumulativní dávku zaměstnanců rovnoměrně rozdělit mezi všechny členy posádek.



Obrázek 29 - Diagram, který je možné použít pro hrubý odhad minimálního počtu letových hodin, potřebných k překročení směrodatné hodnoty 1 mSv a limitní hodnoty 6 mSv. Výpočty, na kterých je diagram založen, byly provedeny v lednu roku 1998 v období slunečního minima a představují tedy spíše maximální možné efektivní dávky kosmického záření (konzervativní řešení). Červené čáry představují lety v rovníkové oblasti a modré čáry v oblasti polární. Zvolené letové hladiny jsou 30 000 stop (plná čára), 40 000 stop (přerušovaná čára) a 50 000 (čerchovaná čára) [12].

10 Závěr

Osobně se domnívám, díky své dosavadní praxi v letectví, že kosmické záření a jeho vliv na zdraví posádek letadel je leteckému personálu zcela nedostatečně známé téma. Zajímalo mne, v průběhu psaní mé práce, zda mí kamarádi a kolegové, kteří pracují jako piloti/pilotky a palubní průvodčí v letecké obchodní dopravě, o tomto tématu cosi tuší, či vědí. Ptal jsem se také, jaké informace jim jejich zaměstnavatel v průběhu jejich praxe poskytuje/poskytl. Z jejich jednotlivých odpovědí vyplynulo, že někteří sice tuší, že kosmické záření existuje, ale jeho působení na jejich osobní zdravotní stav jim známé není. Vědí, že jako členové posádek letadel jsou mu vystaveni více než ostatní lidé, ale chybí jim nutné a důležité další odborné informace. Potřebovali by se srozumitelně a stručně dozvědět, co to vlastně kosmické záření je, odkud záření pochází a jaký vliv má sluneční aktivita. Pro kvalitní informaci o vlivu na jejich zdraví je vhodné jim vyložit, co znamená hodnota obdržené osobní efektivní dávky, co představuje jednotka 1 Sv (Sievert). Měli by být seznámeni s tím, co jsou stochastické účinky kosmického záření. Jistě by bylo zajímavé, kdyby se dozvěděli, jak se jejich efektivní dávky kosmického záření liší svou hodnotou od jiných ozáření, například od hodnot dávek v lékařské diagnostice (rentgen, CT, apod.). Mnozí by uvítali informace, jak se jejich efektivní dávky stanovují (výpočtem/měřením). Jestliže by následně provozovatel, na základě výsledků efektivních dávek, upravoval rozpis služeb posádek, rozuměli by důvodům takových úprav.

Tato diplomová práce vysvětluje problematiku kosmického záření a jeho účinků na člověka. Ukazuje, jak se dávky záření vypočítávají a jak se měří. Navrhuje, jak by měl zodpovědný provozovatel na základě radiační zátěže posádek přistupovat k plánování služeb. Obsah diplomové práce by mohl posloužit především létajícímu personálu, manažerům leteckých dopravců, dispečerům a plánovačům služeb letových posádek.

Kosmické záření má vliv i na lidi, kteří nejsou členy posádek letadel, ale kteří například vlivem svého povolání často létají letadlem - tzv. *frequent flyers.* Vezmeme-li v úvahu například privátní létání soukromými letadly (business jety), je velmi pravděpodobné, že posádka takového letadla může ročně obdržet i poloviční dávku, než obdrží majitel/cestující takového letadla (z důvodu střídání posádek). V současnosti zřejmě těmto cestujícím nikdo jejich efektivní dávky nestanovuje. Je nanejvýš pravděpodobné, že je na možnost zvýšeného ozáření při létání konkrétní dopravce nebo zaměstnavatel, jenž je vysílá na služební cestu, neupozorňuje. Každý dopravce potřebuje své cestující, tak proč je ještě strašit ozářením? Jako kompenzaci obdrží tisíce nalétaných mil na svém kontě.

V současnosti není možné snížit úroveň ozáření na palubách letadel dodatečným stíněním. Pokud potřebujeme, aby letecká doprava byla efektivní, musí být hmotnost letadla co nejnižší, nelze tedy létat s olověnými letadly. Reálnou možností je nyní omezit, nebo regulovat provoz tak, aby radiační zátěž posádek byla rozumně nízká. Hovoříme tedy o zásadě zvané ALARA - As Low As Reasonably Achievable.

Při letech ve vysokých nadmořských výškách se liší svou skladbou pole záření, oproti svému složení při hladině moře. Rozdíl je především v tom, že při létání je příspěvek záření od částic s vysokým LPE vyšší. Z toho důvodu a též proto, že více než 50 % členů posádek bývají ženy v produktivním věku, je nutné sledovat míru ozáření všech, kteří mohou překročit hodnotu efektivní dávky 1 mSv/rok. Obzvláště těhotné ženy by měly být zodpovědné a nedovolit překročení ozáření sebe sama a plodu o více než 1 mSv. Jako konzervativní řešení je nechat ženu zvážit možnost přestat s létáním po dobu těhotenství.

Podle směrnice Evropské komise je třeba zabezpečit takový systém plánování služeb posádek letadel (netěhotných), aby žádným členem nebyla překročena hodnota efektivní dávky 6 mSv/rok. Díky *obrázku 29* z předchozí kapitoly můžeme hrubě odhadnout, že této hodnoty dosáhneme při ročním náletu cca 500 hodin v polární oblasti pro lety v hladině 40000 stop. Na základě výpočtu pomocí webové aplikace programu CARI-6 pro leden/2017 by v oblasti České republiky (konkrétně na letu LKPR-LKTB) bylo potřeba ∼845 letových hodin pro obdržení dávky 6 mSv při letu v hladině 40000 stop. Za ∼140 letových hodin dosáhneme v České republice dávky 1 mSv pro stejné datum a stejnou letovou hladinu.

Přál bych si, aby moje práce pozitivně ovlivnila její čtenáře, aby porozuměli problematice kosmického záření a chápali jeho možné následky na zdraví člověka. Doufám, že díky této práci vzroste informovanost mých kolegů, létajícího personálu. Kéž jsme si všichni vědomi toho, že jsme během života dodatečně ozařováni nejen při lékařské diagnostice a terapii, ale i při takové krásné činnosti, kterou je létání. Dodatečné ozařování provází členy posádek letadel i všechny cestující v letecké dopravě při letech ve vysokých nadmořských výškách. Je vhodné kontrolovat si přijaté efektivní dávky kosmického záření, volit s rozumem letové hladiny při letech v polárních oblastech a snažit se vyhnout možnosti zasažení letadla bleskem. Vždyť se jedná o ovlivnění kvality zdraví a tím i kvality života každého z nás!

Seznam literatury

[1] D. T. Bartlett; Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew, Radiation Protection Dosimetry, Volume 109, Issue 4, 1 July 2004, Pages 349–355, Oxford University Press

[2] MALLEY, Marjorie Caroline. Radioactivity: a history of a mysterious science. New York: Oxford University Press, c2011. ISBN 019976641X.

[3] ANGELO, Joseph A. Nuclear technology, Westport, Conn.: Greenwood Press, 2004. ISBN 1573563366.

[4] Cronin, James W. "Cosmic rays: the most energetic particles in the universe." Reviews of Modern Physics 71, no. 2 (March): S165-S172. Accessed November 13, 2017. http://dx.doi.org/10.1103/revmodphys.71.s165.

[5] KLENER, Vladislav, ed. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. ISBN 80-238-3703-6.

[6] SPACE WEATHER PREDICTION CENTER [online]. Boulder CO: NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2017 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression/

[7] Jak přežít ve vesmíru se zářením [online]. Havlíčkova 419, Telč, PSČ 58856: OSEL - Objective Source E-Learning, 2008 [cit. 2017-11-13]. ISSN 1214-6307. Dostupné z: http://www.osel.cz/4063-jak-prezit-ve-vesmiru-se-zarenim.html

[8] ISO 20785. Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft: Part 1: Conceptual basis for measurements. 2. Switzerland: ISO copyright office, 2012.

[9] Martina Boháčová; Kosmické záření: Od balonových výstupů k částicovým detektorům [online]. Praha: VESMÍR, 2000, 2000/7(79) [cit. 2017-11-13]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2000/cislo-7/kosmicke-zareni.html

[10] Carlos Granja; Jihoatlantická anomálie vnitřního radiačního pásu Země [online]. Praha: VESMÍR, 2014, 2014/12(93) [cit. 2017-11-13]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2014/cislo-12/jihoatlanticka-anomalie-vnitrniho-radiacniho-pasu-zeme.html

[11] PLOC, Ondřej. K některým dalším aspektům expozice posádek letadel kosmickému záření: diplomová práce. c2005. 63 l.

[12] LINDBORG, L., D. BARTLETT, P. BECK, I. MCAULAY, K. SCHNUER, H. SCHRAUBE a F. SPURNÝ. Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew - Compilation of Measured and Calculated Data, A Report of EURADOS WG 5 to Group of Experts established under Article 31 of the EURATOM Treaty. Luxemburg: Radiation Protection 140, 2004. 289 s. ISBN 92-894-8448-9.

[13] Kendall, Gerry M., Factors Affecting Cosmic-Ray Doses at Aircraft Altitudes, Health Physics 79, no. 5 (December): 560-62. Accessed November 13, 2017. http://dx.doi.org/10.1097/00004032-200011000-00013

[14] Heliocentric Potential. United States Department of Transportation: Federal Aviation Administration [online]. Washington: Federal Aviation Administration, 2017 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/heliocentric/

[15] O'Brien, K., W. Friedberg, Herbert H. Sauer, and D.F. Smart. "Atmospheric cosmic rays and solar energetic particles at aircraft altitudes." Environment International 22 (January): 9-44. Accessed November 13, 2017. http://dx.doi.org/10.1016/s0160-4120(96)00086-4

[16] KYSELOVÁ, Dagmar. Radiační zátěž posádek letadel: Radiation risk of aircraft crew. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření. Vedoucí práce Ondřej Ploc.

[17] VÍTKOVÁ, Lucie. Zavedení nové metodiky stanovení radiační zátěže posádek letadel v české republice. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření. Vedoucí práce Ondřej Ploc.

[18] Wallace Friedberg, Kyle Copeland. DOT/FAA/AM-11/9, Ionizing Radiation in Earth's Atmosphere and in Space Near Earth, Civil Aerospace Medical Institute, Federal Aviation Administration, Oklahoma City, OK, dostupné z: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/2010s/media/201109.pdf

[19] Reference Manual: EPCARD.Net ver.5.4.3 Professional - Final version . 2010.

[20] ISO 20785. Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft: Part 2: Characterization of instrument response. 1. Switzerland: ISO copyright office, 2011.

[21] ISO 20785. Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft: Part 3: Measurements at aviation altitudes. 1. Switzerland: ISO copyright office, 2015.

[22] Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation : UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: United Nations, 2000. Official Records of the General Assembly. ISBN 92-1-142238-8.

[23] ZACHARIÁŠOVÁ, Ivanka, Dana DRÁBOVÁ a Helena ŽÁČKOVÁ. Rentgen Bulletin: Přínos nadále převažuje [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, 2009, 2009 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.suro.cz/cz/publikace/lekarske-ozareni/rtg_bulletin_2009.pdf

[24] ZPRÁVA O VÝSLEDCÍCH ČINNOSTI SÚJB PŘI VÝKONU STÁTNÍHO DOZORU NAD JADERNOU BEZPEČNOSTÍ JADERNÝCH ZAŘÍZENÍ A RADIAČNÍ OCHRANOU: Část I [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2016 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/vyrocni_zpravy/ceske/VZ_SUJB_2016_FIN_cast_I.pdf

[25] HERIBANOVÁ, Alena, Dana DRÁBOVÁ a Helena ŽÁČKOVÁ. Rentgen Bulletin: Riziko, nebo přínos pro pacienta? [online]. Praha: Státní ústav radiační ochrany, 2001, 2001 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.suro.cz/cz/publikace/lekarske-ozareni/rentgen9-2001.pdf

[26] Vyhláška č. 422/2016 Sb.: o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje [online]. Praha: SÚJB, 2016 [cit. 2017-11-13]. ISSN 1211-1244. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/sb0172-2016.pdf

[27] Zákon č. 263/2016: atomový zákon [online]. Praha: SÚJB, 2016 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263-2016.pdf

[28] CARI-7 and CARI-7A. United States Department of Transportation: Federal Aviation Administration [online]. Washington: Federal Aviation Administration, 2017 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/

[29] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. AC No: 120-61B: In-Flight Radiation Exposure [online]. Oklahoma City, OK: Federal Aviation Administration,

2014 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_120-61B.pdf

[30] Protokol o stanovení efektívnych dávok členov posádok na palubách lietadel vo výške nad 8 km (Experimentální verifikace výpočtů); AB-2016-E-1; Vypracovali I. Kovář, H. Orčíková, D. Kyselová; schválil O. Ploc (interní dokument)

[31] Chilingarian A. "Universality of the High Energy Physics in Atmosphere (HEPA): origin of particle fluxes from thunderclouds" in conference proceedings of Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2017), October 2-6, 2017

[32] TÝDEN.CZ: Za trosečníky na kře ledové [online]. EMPRESA MEDIA, 2008 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.tyden.cz/rubriky/cestovani/ny-alesund-2008/za-trosecniky-na-kre-ledove_48213.html

[33] Jet Propulsion Laboratory: Earth's Magnetosphere [online]. California Institute of Technology [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://www.jpl.nasa.gov/infographics/infographic.view.php?id=10686

[34] Boundless Physics: Motion of a Charged Particle in a Magnetic Field [online]. LUMEN LEARNING [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field/

[35] Yu, Xiao Xia, Hong Lu, Guan Ting Chen, Xin Qiao Li, Jian Kui Shi, and Cheng Ming Tan. "Detection of solar neutron events and their theoretical approach." New Astronomy 39 (2015): 25-35.

[36] Kudela, K. "A search for solar neutron response in neutron monitor data." The Astrophysical Journal Supplement Series 73 (1990): 297-301.

[37] Metropolis, Nicholas, and Stanislaw Ulam. "The monte carlo method." Journal of the American statistical association 44, no. 247 (1949): 335-341.

[38] Rubinstein, Reuven Y., and Dirk P. Kroese. Simulation and the Monte Carlo method. Vol. 10. John Wiley & Sons, 2016.

Příloha A

Vyhláška SÚJB 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje [26]

§ 88 Stanovení osobních dávek pracovníka na pracovišti s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření

(1) Způsob měření za účelem stanovení osobních dávek

b) pracovníka, který je členem letecké posádky na palubě letadla při letu ve výšce nad 8 km, musí zahrnovat stanovení

1. míry účasti pracovníka na jednotlivých letech,

2. letových charakteristik a

3. parametrů důležitých pro výpočet efektivní dávky, a to opakovaně za každý kalendářní rok.

Příloha B

Zákon č. 263/2016 Sb. (Atomový zákon) [27]

§ 93 Pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření

(1) Pracovištěm s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření je

a) paluba letadla při letu ve výšce nad 8 km,

(2) Každý, kdo vykonává činnost, při níž je provozováno pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření, je povinen

a) zajistit měření za účelem stanovení osobních dávek pracovníka a evidenci výsledků měření a osobních dávek pracovníka,

b) oznamovat Úřadu informace o pracovišti, výsledcích měření a osobních dávkách pracovníka,

c) zajistit optimalizaci radiační ochrany pracovníka, pokud je překročena stanovená úroveň,

d) zajistit ochranu těhotné ženy podle § 64 odst. 3 a

e) informovat pracovníka o

1. možném zvýšeném ozáření z přírodního zdroje záření,

2. výsledcích měření na pracovišti, osobních dávkách stanovených měřením a o související zdravotní újmě v důsledku ozáření a

3. provedených opatřeních ke snížení ozáření.

(3) Každý, kdo provozuje pracoviště s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření, kterým je paluba letadla při letu ve výšce nad 8 km, na němž může být efektivní dávka člena posádky letadla vyšší než 1 mSv za rok, je povinen hodnotit ozáření člena posádky letadla a na základě výsledků tohoto hodnocení zvážit úpravu rozpisu služeb člena posádky letadla za účelem snížení ozáření.

§ 94 Pracoviště se zvýšeným ozářením z přírodního zdroje záření

(1) Pokud po provedení optimalizace radiační ochrany podle § 93 odst. 2 písm. c) může na pracovišti s možností zvýšeného ozáření z přírodního zdroje záření překročit ozáření pracovníka efektivní dávku 6 mSv za rok, pracoviště se považuje za pracoviště se zvýšeným ozářením z přírodního zdroje záření.

(2) Každý, kdo vykonává činnost, při níž je provozováno pracoviště se zvýšeným ozářením z přírodního zdroje záření, je povinen

a) vymezit pracoviště nebo jeho část, kde může efektivní dávka pracovníka překročit 6 mSv za rok, označit je a zabezpečit proti vstupu nepovolaného,

b) zařadit svého pracovníka jako radiačního pracovníka kategorie A,

c) provést každoroční poučení pracovníka o radiačním riziku na pracovišti,

d) zajistit pracovníkovi pracovnělékařské služby podle § 80,

e) zpracovat pokyny pro práci na pracovišti včetně pokynů pro její bezpečné vykonávání a pro vstup fyzické osoby, která není pracovníkem, na pracoviště,

f) zajistit pro pracovníka ochranné pracovní pomůcky,

g) zajistit zpracování postupu monitorování pracoviště a pracovníků a

h) zajistit vedení dokumentace o rozsahu a způsobu zajištění radiační ochrany.

§ 80 Pracovnělékařské služby poskytované radiačním pracovníkům

(1) Zaměstnavatel radiačního pracovníka postupuje při zajišťování pracovnělékařských služeb, pokud dále není stanoveno jinak, podle zákona upravujícího specifické zdravotní služby.

(2) Radiační pracovník, který nevykonává práci v mezích základního pracovněprávního vztahu, je povinen zajistit pracovnělékařské služby pro svou osobu u poskytovatele pracovnělékařských služeb, se kterým uzavře smlouvu o poskytování pracovnělékařských služeb. Při zajišťování pracovnělékařských služeb radiačnímu pracovníkovi, který nevykonává práci v rámci pracovněprávního vztahu, se postupuje, pokud dále není stanoveno jinak, obdobně podle zákona upravujícího specifické zdravotní
služby.

(3) Zaměstnavatel uvedený v odstavci 1 nebo radiační pracovník uvedený v odstavci 2 musí zajistit poskytovateli pracovnělékařských služeb přístup ke všem informacím nutným k ověření zdravotního stavu radiačního pracovníka z hlediska jeho schopnosti plnit svěřené úkoly, včetně údajů o pracovním prostředí, a k výsledkům osobního monitorování.

(4) Pracovnělékařské služby poskytované radiačním pracovníkům musí zahrnovat

a) lékařskou prohlídku před zařazením radiačního pracovníka do kategorie A,

b) periodickou lékařskou prohlídku nejméně jednou ročně, jde-li o radiačního pracovníka kategorie A,

c) lékařskou prohlídku po skončení rizikové

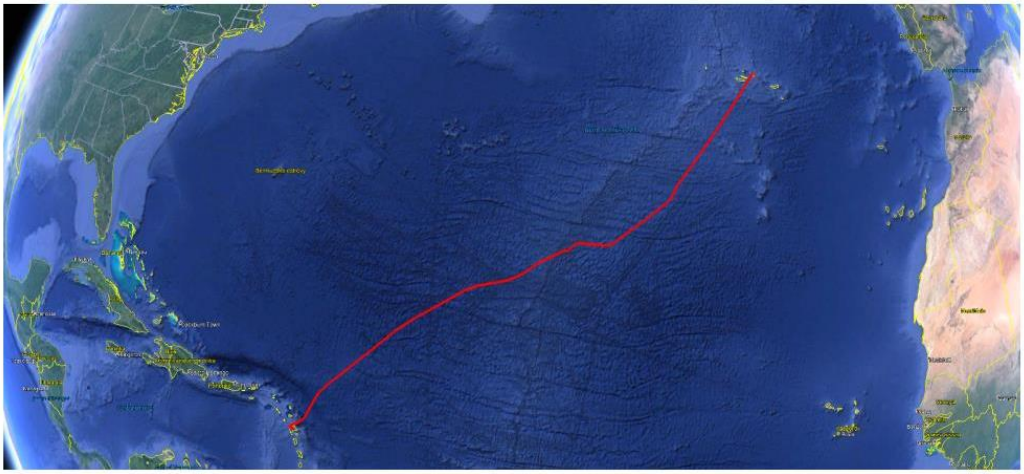
§ 64 Omezení ozáření ve zvláštním případě

(3) Držitel povolení k vykonávání činností v rámci expozičních situací, na jehož pracovišti I. až IV. kategorie pracuje těhotná žena, je povinen neprodleně poté, co žena těhotenství oznámí, upravit podmínky její práce k omezení ozáření plodu tak, aby součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření plodu alespoň po zbývající dobu těhotenství nepřekročil 1 mSv.

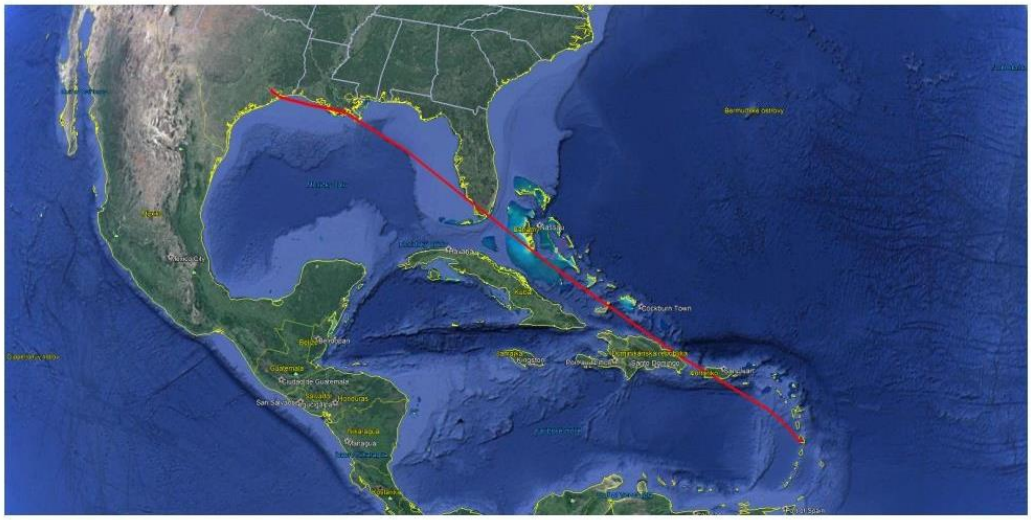
Příloha C

Na obrázcích níže můžeme vidět trasu letů zaznamenanou zapisovačem letadla Embraer Legacy 600 při cestě okolo světa na jaře roku 2017. Kvůli interní chybě zapisovače a z důvodu jeho plné paměti je trasa některých letů pouze odhadnuta. Lety s letovou dobou kratší než 30 minut zde nejsou uvedeny.

Obrázek 30 - trasa letu z letiště Praha (LKPR), Česká republika na letiště Lajes (LPLA), Azory

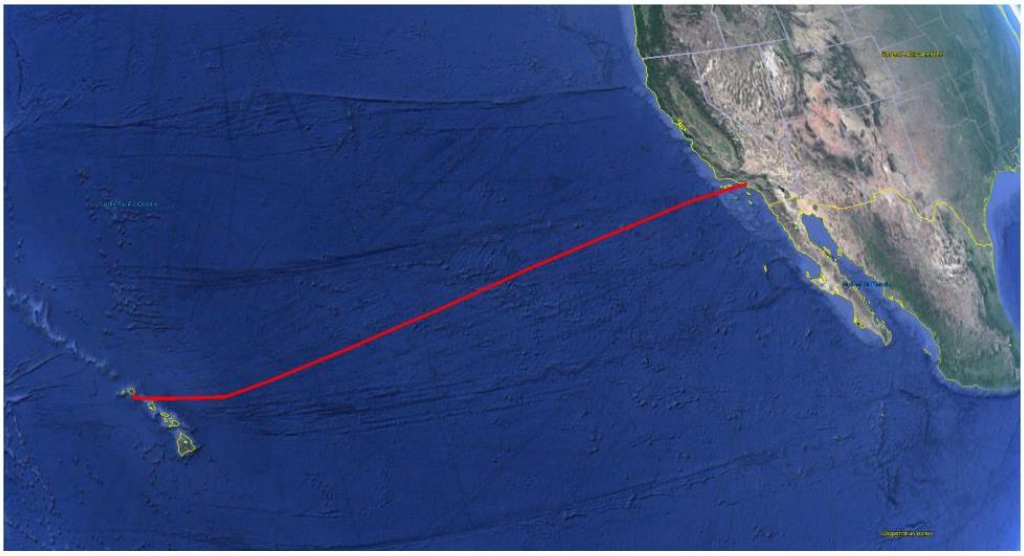


Obrázek 31 - trasa letu z letiště Lajes (LPLA), Azory na letiště Pointe-a-Pitre (TFFR), Guadeloupe

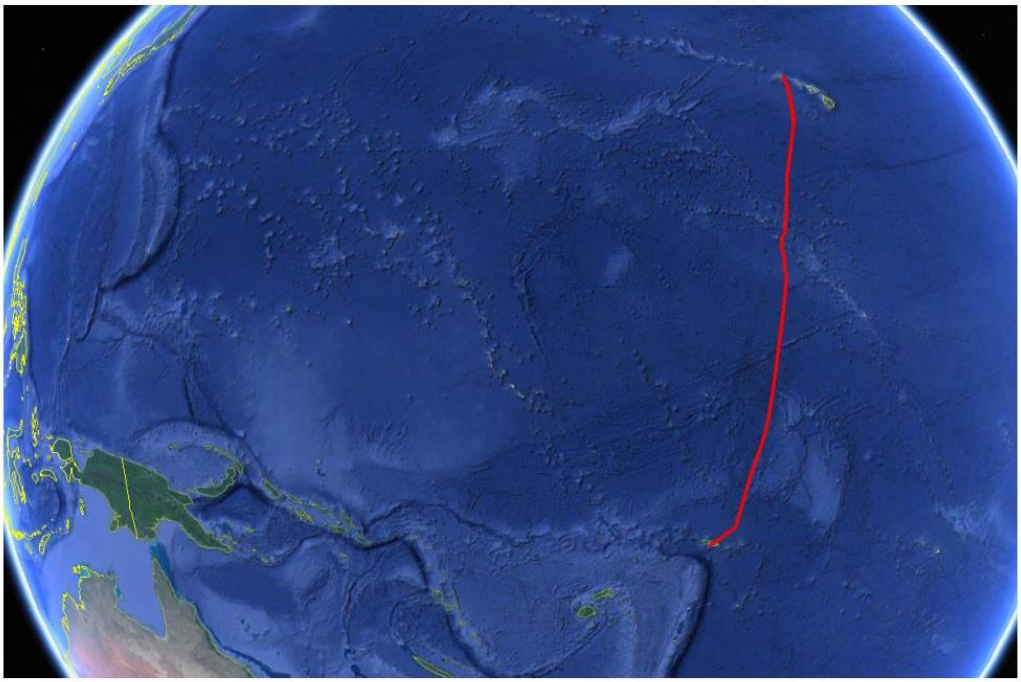


Obrázek 32 - trasa letu z letiště Martinique (TFFF), Martinique na letiště Houston (KHOU), Texas

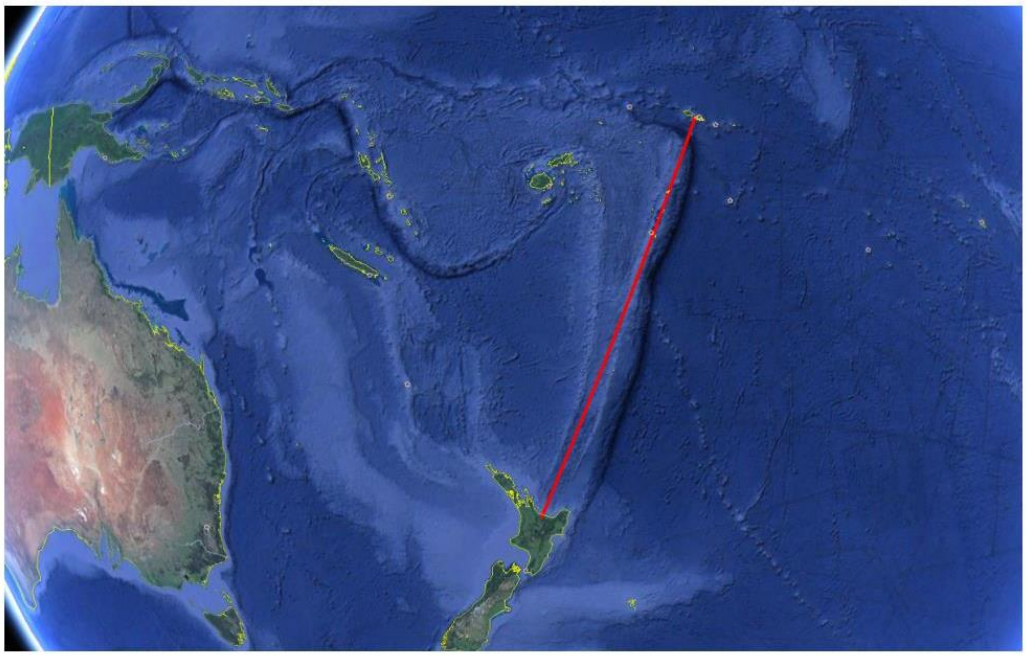
Obrázek 33 - trasa letu z letiště Houston (KHOU), Texas na letiště Los Angeles (KLAX), California



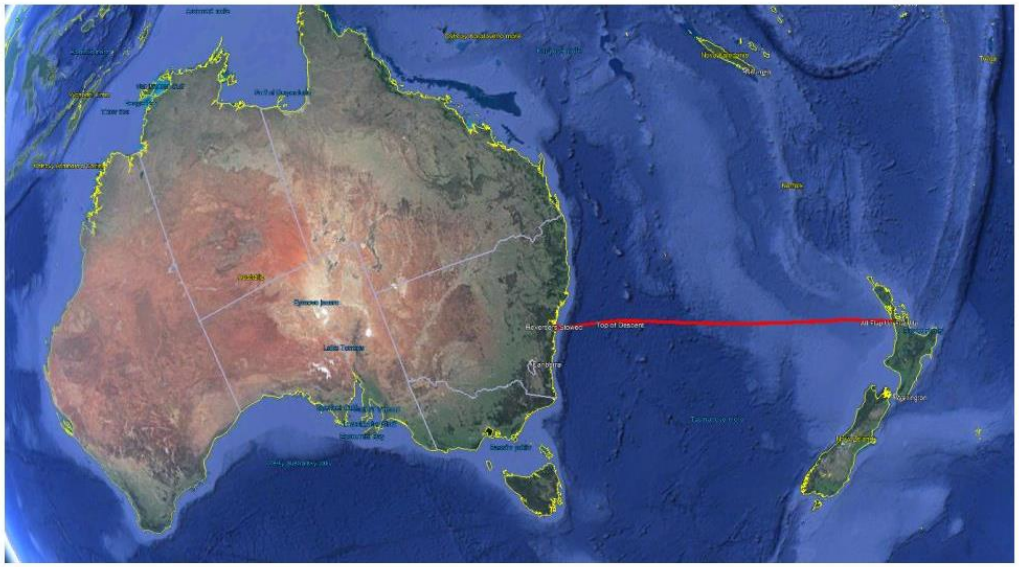
Obrázek 34 - trasa letu z letiště Los Angeles (KLAX), California na letiště Lihue (PHLI), Hawai



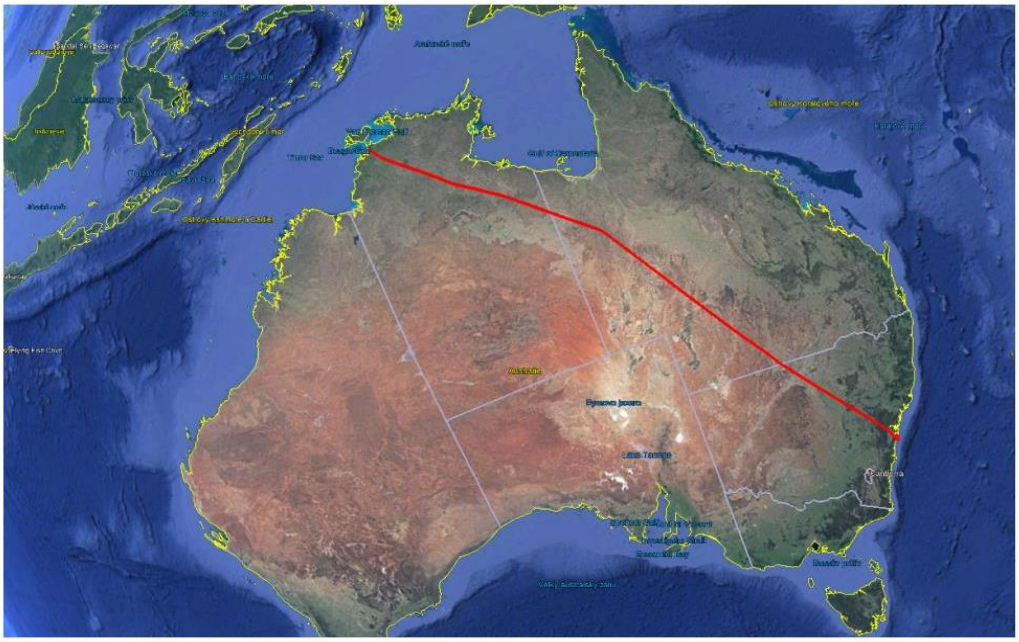
Obrázek 35 - trasa letu z letiště Lihue (PHLI), Hawai na letiště Apia (NSFA), Samoa



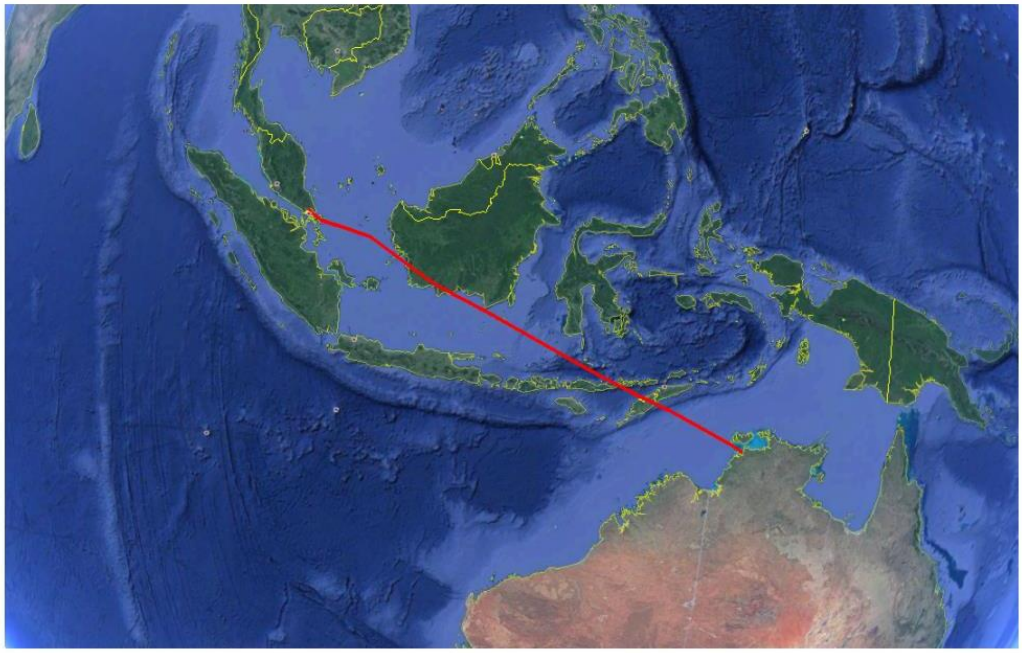
Obrázek 36 - odhad trasy letu z letiště Apia (NSFA), Samoa na letiště Rotoria (NZRO), New Zeland



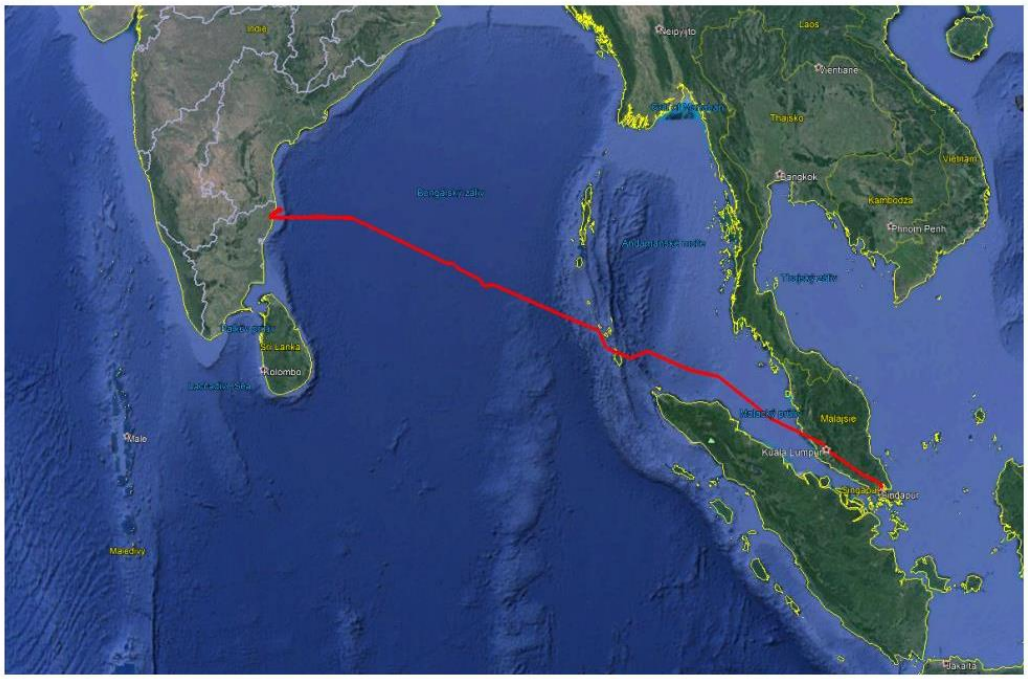
Obrázek 37 - trasa letu z letiště Auckland (NZAA), New Zeland na letiště Sydney (YSSY), Australia



Obrázek 38 - trasa letu z letiště Sydney (YSSY), Australia na letiště Darwin (YPDN), Australia



Obrázek 39 - trasa letu z letiště Darwin (YPDN), Australia na letiště Singapore (WSSL), Singapore



Obrázek 40 - trasa letu z letiště Singapore (WSSL), Singapore na letiště Chennai (VOMM), India

Obrázek 41 - odhad trasy letu z letiště Chennai (VOMM), India na letište Dubai (OMDW), UAE

Obrázek 42 - odhad trasy letu z letiště Dubai (OMDW), UAE na letiště Praha (LKPR), Česká republika

Příloha D

Výpočty efektivních dávek pomocí programu CARI-6 pro sérii letů letadla Embraer Legacy 600 při cestě okolo světa na jaře roku 2017. Ve výpočtech nejsou zahrnuty lety kratší než 30 minut.

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	LKPR	PRAGUE/PRAHA, CZECH REPUBLIC
Destination Code	LPLA	LAJES, AZORES I
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 72	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	24.27 microsieverts (0.02427 millisieverts)	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	LPLA	LAJES, AZORES I
Destination Code	TFFR	POINTE A PITRE, GUADELOUPE
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 170	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	23.94 microsieverts (0.02394 millisieverts)	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	TFFF	FORT DE FRANCE, MARTINIQUE
Destination Code	KHOU	HOUSTON, TX
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 136	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	23.91 microsieverts (0.02391 millisieverts)	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	KHOU	HOUSTON, TX
Destination Code	KLAX	LOS ANGELES, CA
Number of en route altitudes	1	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 145	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	14.02 microsieverts (0.01402 millisieverts)	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	KLAX	LOS ANGELES, CA
Destination Code	PHLI	KAUAI ISLAND, HAWAIIAN ISLANDS
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 192	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	25.11 microsieverts (0.02511 millisieverts)	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	PHLI	KAUAI ISLAND, HAWAIIAN ISLANDS
Destination Code	NSFA	APIA, WEST SAMOA
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 144	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	15.47 microsieverts (0.01547 millisieverts)	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	04/2017	
Origin Code	NSFA	APIA, WEST SAMOA
Destination Code	NZRO	ROTORUA, NEW ZEALAND
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 36	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**13.64 microsieverts (0.01364 millisieverts)**	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	05/2017	
Origin Code	NZAA	AUCKLAND, NEW ZEALAND
Destination Code	YSSY	SYDNEY, AUSTRALIA
Number of en route altitudes	1	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 151	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**15.59 microsieverts (0.01559 millisieverts)**	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	05/2017	
Origin Code	YSSY	SYDNEY, AUSTRALIA
Destination Code	YPDN	DARWIN, AUSTRALIA
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 68	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**16.71 microsieverts (0.01671 millisieverts)**	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	05/2017	
Origin Code	YPDN	DARWIN, AUSTRALIA
Destination Code	WSSL	SELETAR, SINGAPORE
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 71	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**11.39 microsieverts (0.01139 millisieverts)**	

Galactic Radiation Received In Flight

Flight Summary		
Date of Flight	05/2017	
Origin Code	WSSL	SELETAR, SINGAPORE
Destination Code	VOMM	MADRAS, INDIA
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 38	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**8.76 microsieverts (0.00876 millisieverts)**	

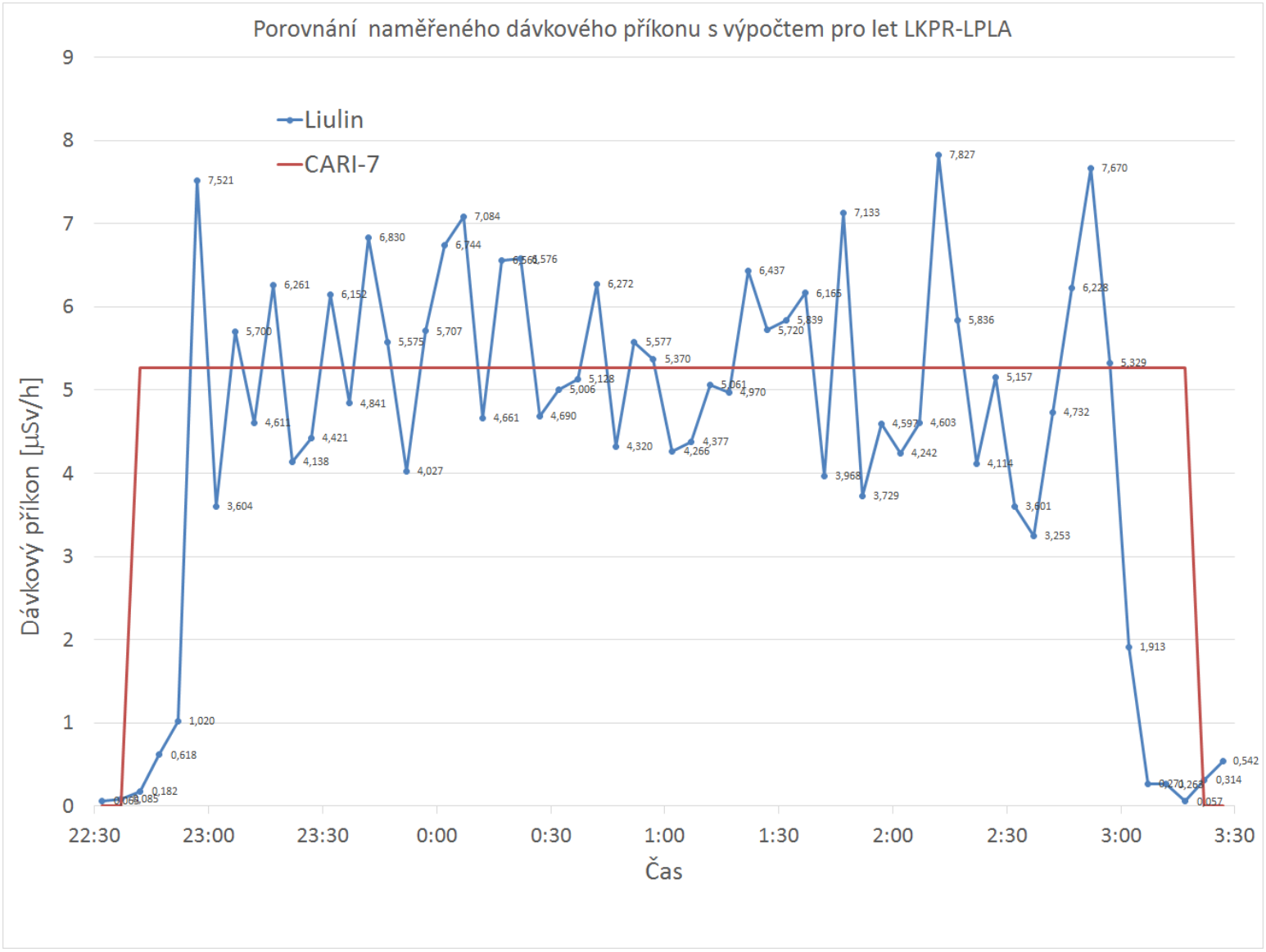
Galactic Radiation Received In Flight

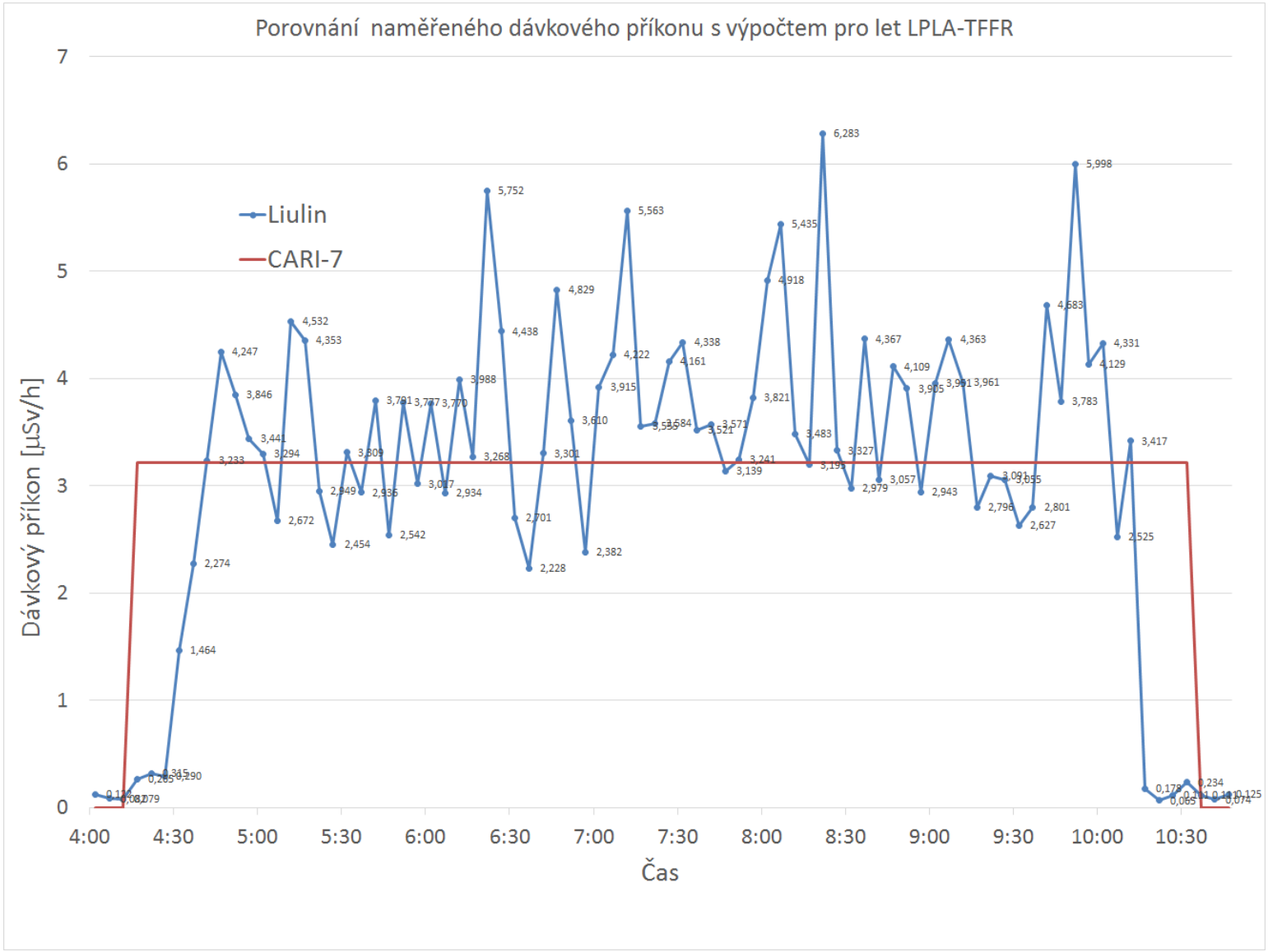
Flight Summary		
Date of Flight	05/2017	
Origin Code	VOMM	MADRAS, INDIA
Destination Code	OMDB	DUBAI, UNITED ARAB EMIRATES
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 39	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**9.38 microsieverts (0.00938 millisieverts)**	

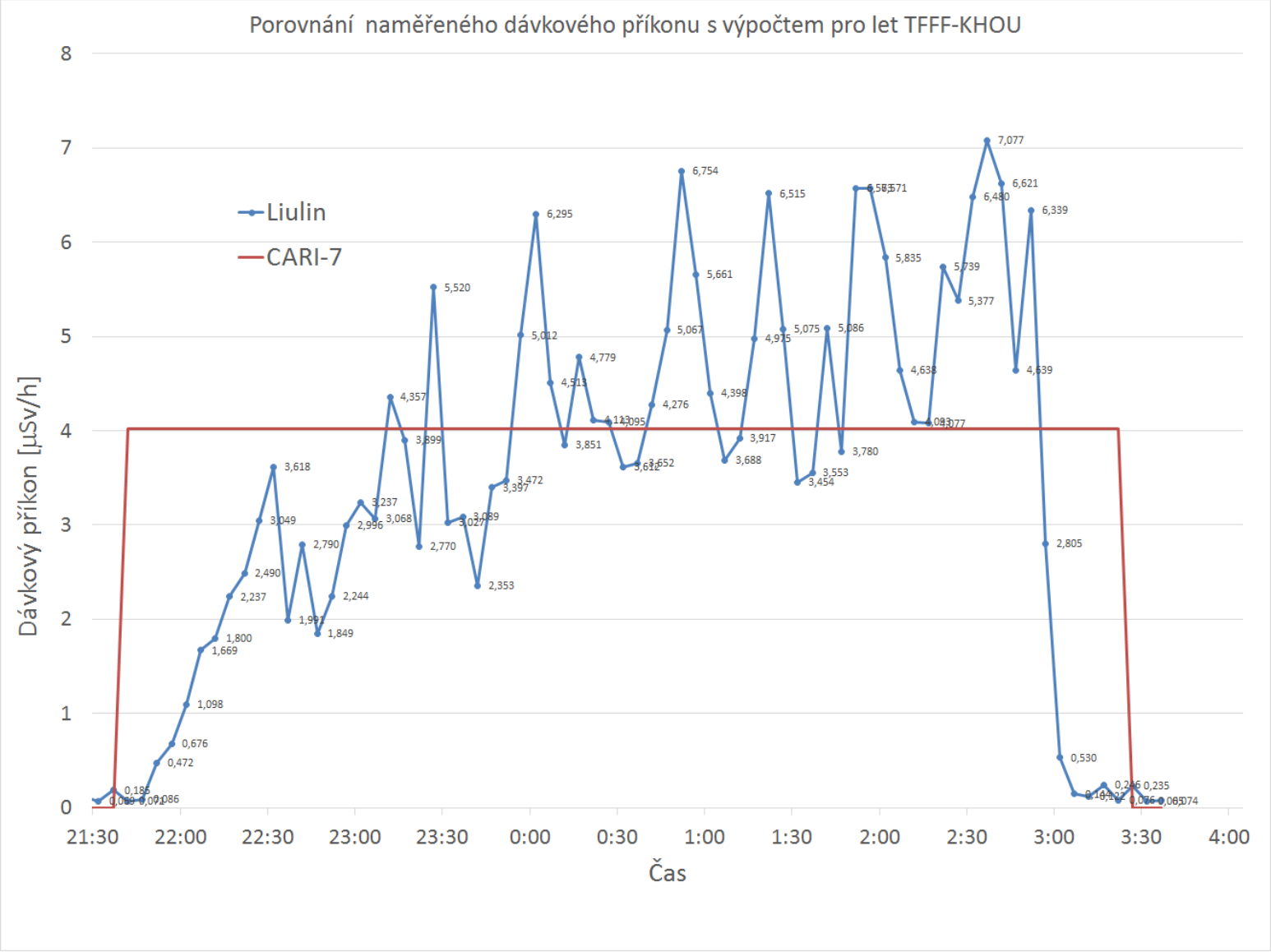
Flight Summary		
Date of Flight	05/2017	
Origin Code	OMDB	DUBAI, UNITED ARAB EMIRATES
Destination Code	LKPR	PRAGUE/PRAHA, CZECH REPUBLIC
Number of en route altitudes	2	
Minutes to 1st en route altitude	25	
En route altitude(s) and time(s)	Altitude (in feet) / Minutes at altitude 38000 / 155 40000 / 191	
Minutes descending to touchdown	25	
Effective Dose	**27.99 microsieverts (0.02799 millisieverts)**	

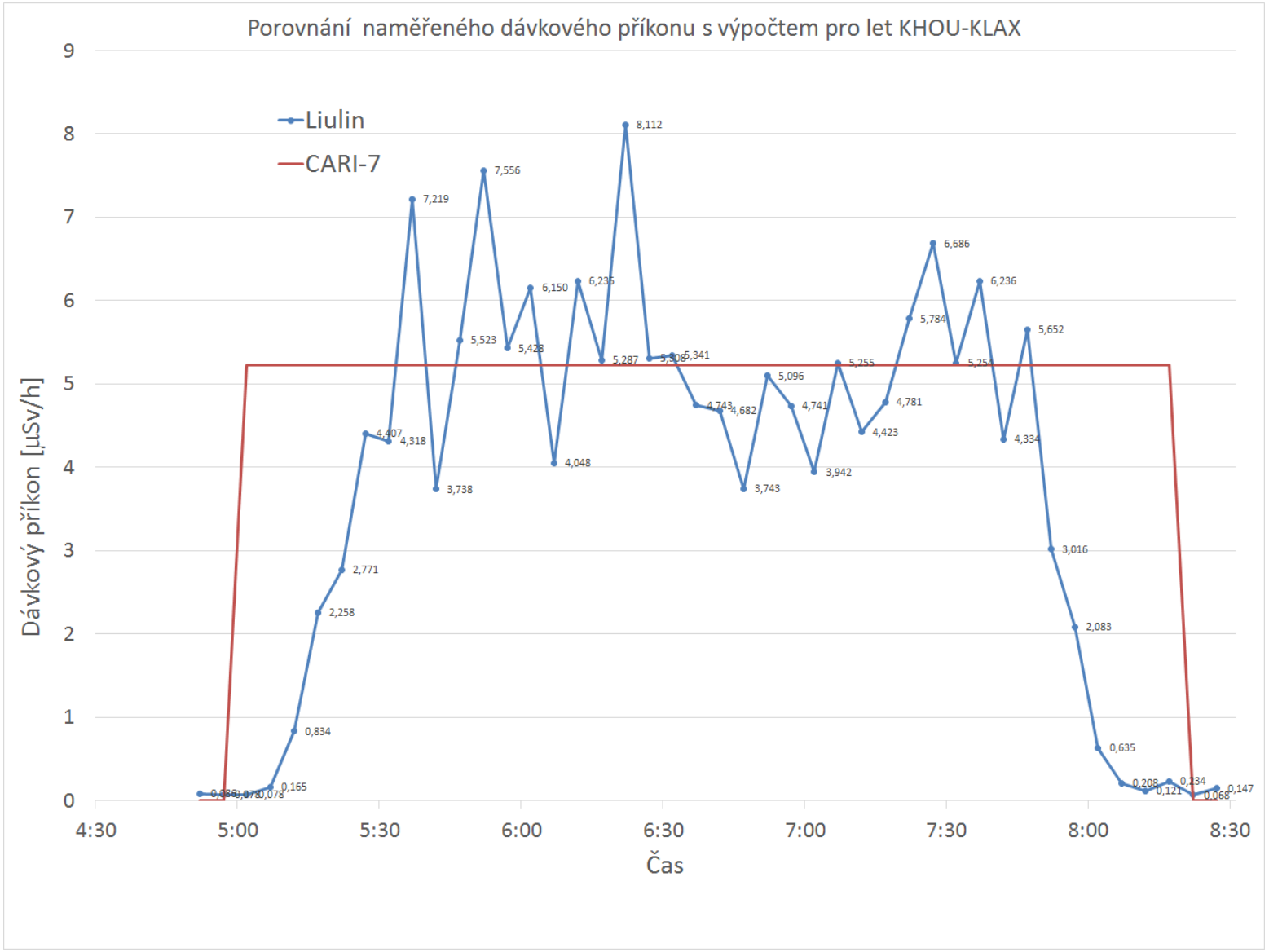
Příloha E

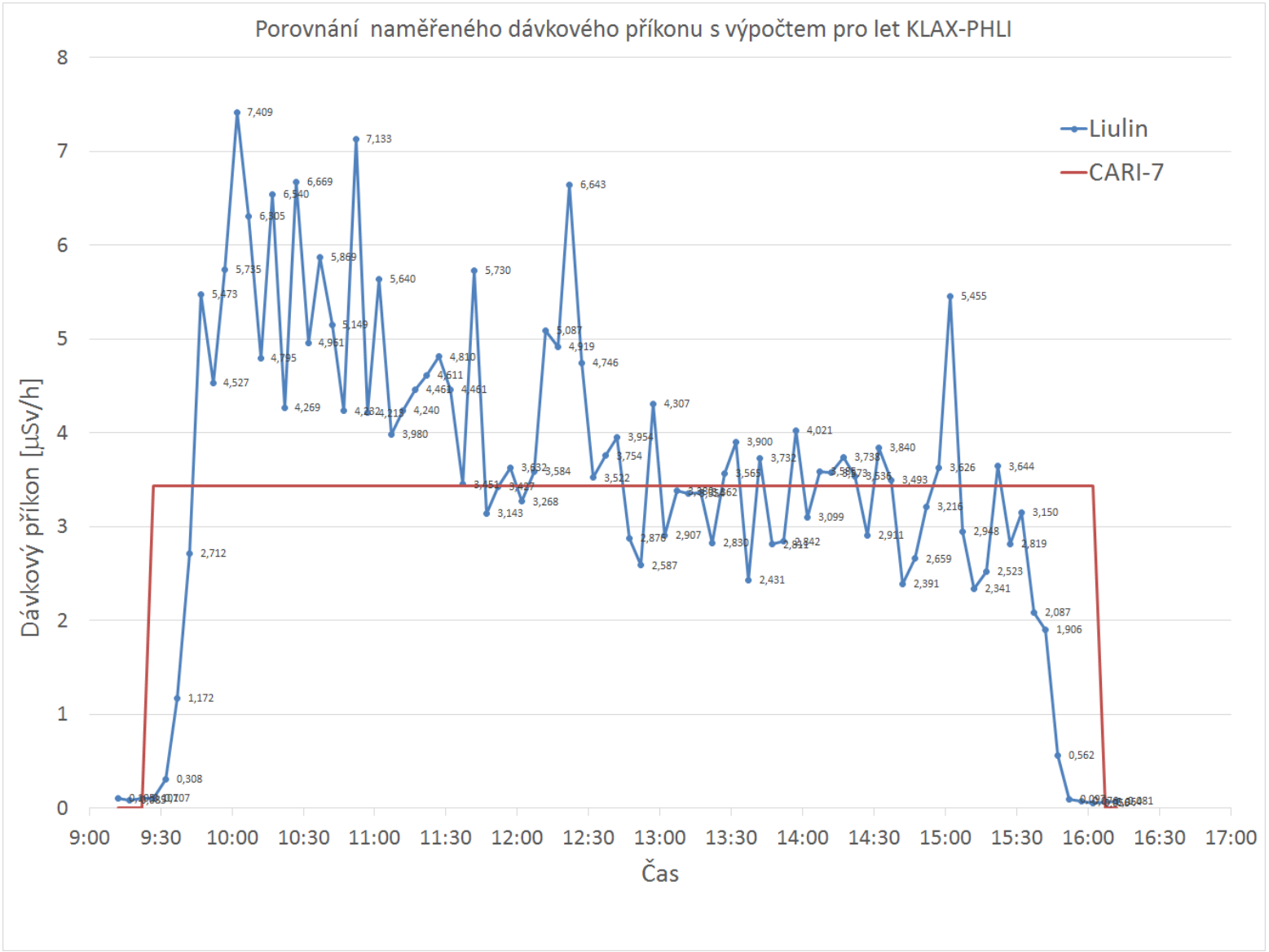
V této příloze můžeme na grafech vidět časové průběhy dávkového příkonu naměřeného dozimetrem Liulin v pěti minutových intervalech na sérii letů letadla Embraer Legacy 600 kolem světa vzhledem k trase a době daného letu. Máme možnost porovnat dávkový příkon naměřený dozimetrem Liulin (modrá křivka) a dávkový příkon stanovený podílem prostorového dávkového ekvivalentu H*(10) pro hladinu 36 000 ft (vypočteným programem CARI-7) a doby letu (červená křivka).

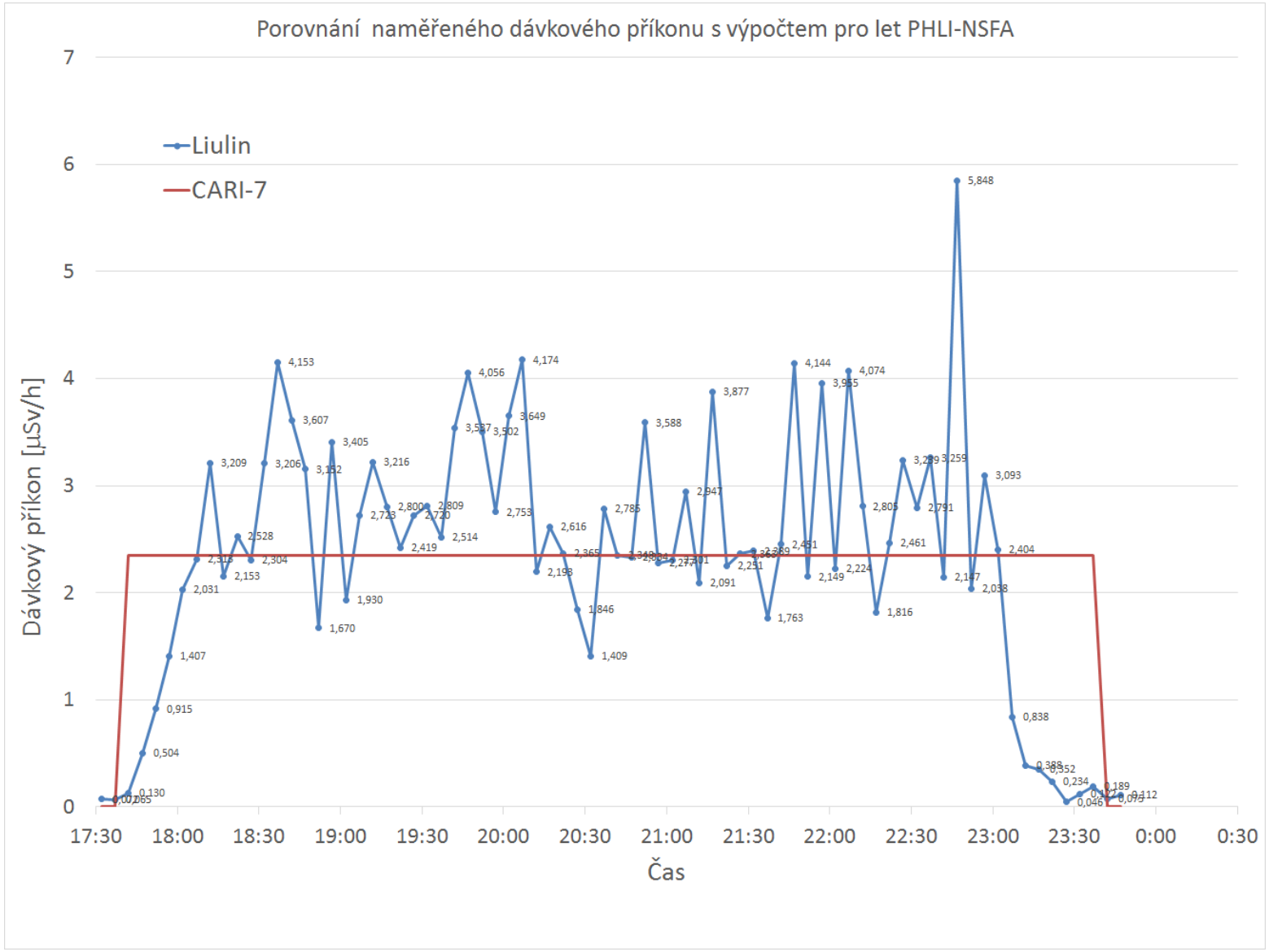

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let LKPR-LPLA
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
22:30
23:00
23:30
0:00
0:30
1:00
1:30
2:00
2:30
3:00
3:30
7,521
3,604
5,700
4,611
6,261
4,138
4,421
6,152
4,841
6,830
5,575
4,027
5,707
6,744
7,084
4,661
6,576
4,690
5,006
5,128
6,272
4,320
5,577
5,370
4,266
4,377
5,061
4,970
6,437
5,720
5,839
6,165
7,133
3,968
3,729
4,597
4,242
4,603
7,827
5,836
4,114
5,157
3,601
3,253
4,732
6,228
7,670
5,329
1,913
0,542
0,314
0,182
0,618
1,020

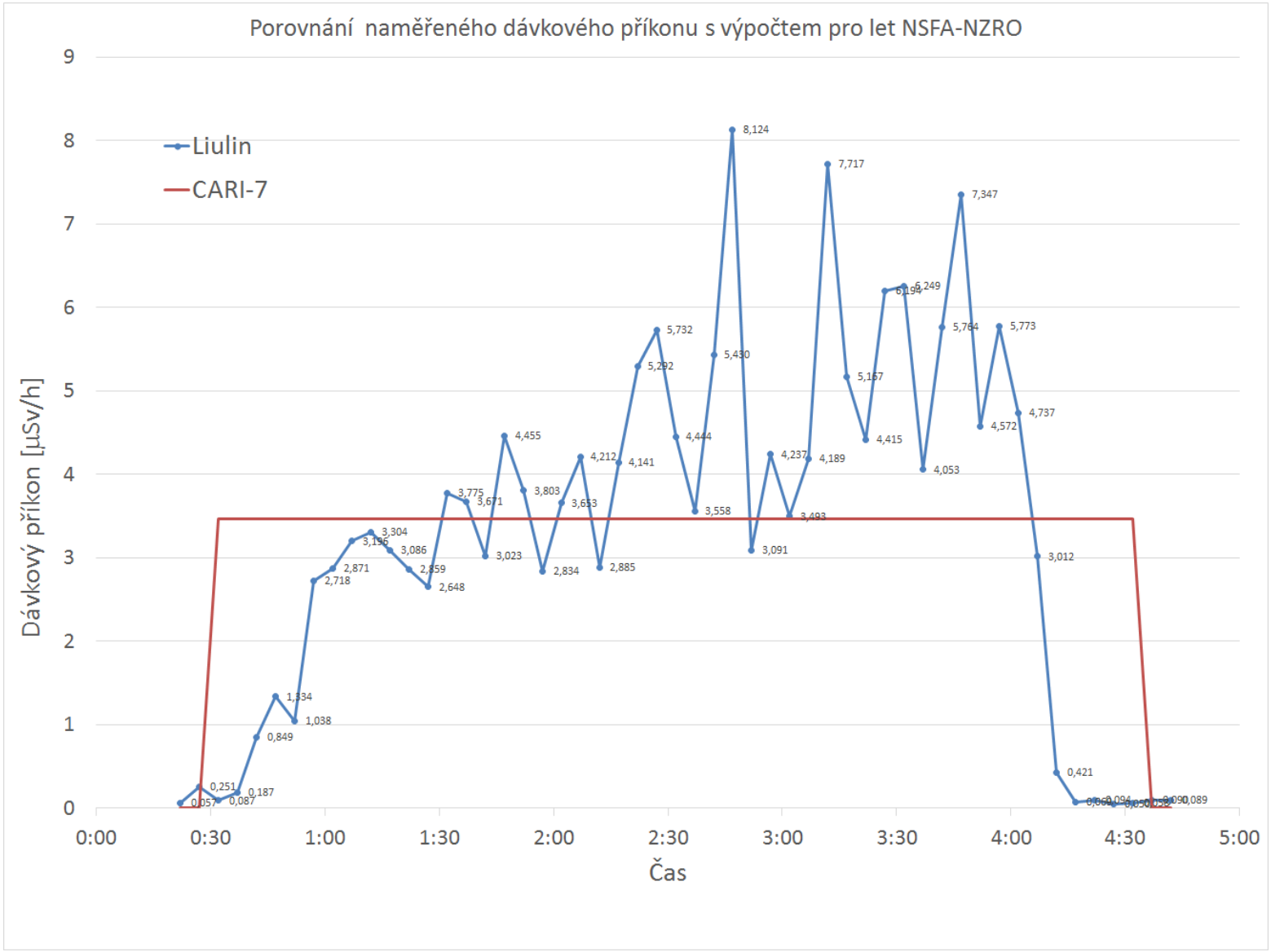

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let LPLA-TFFR
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
4:00
4:30
5:00
5:30
6:00
6:30
7:00
7:30
8:00
8:30
9:00
9:30
10:00
10:30

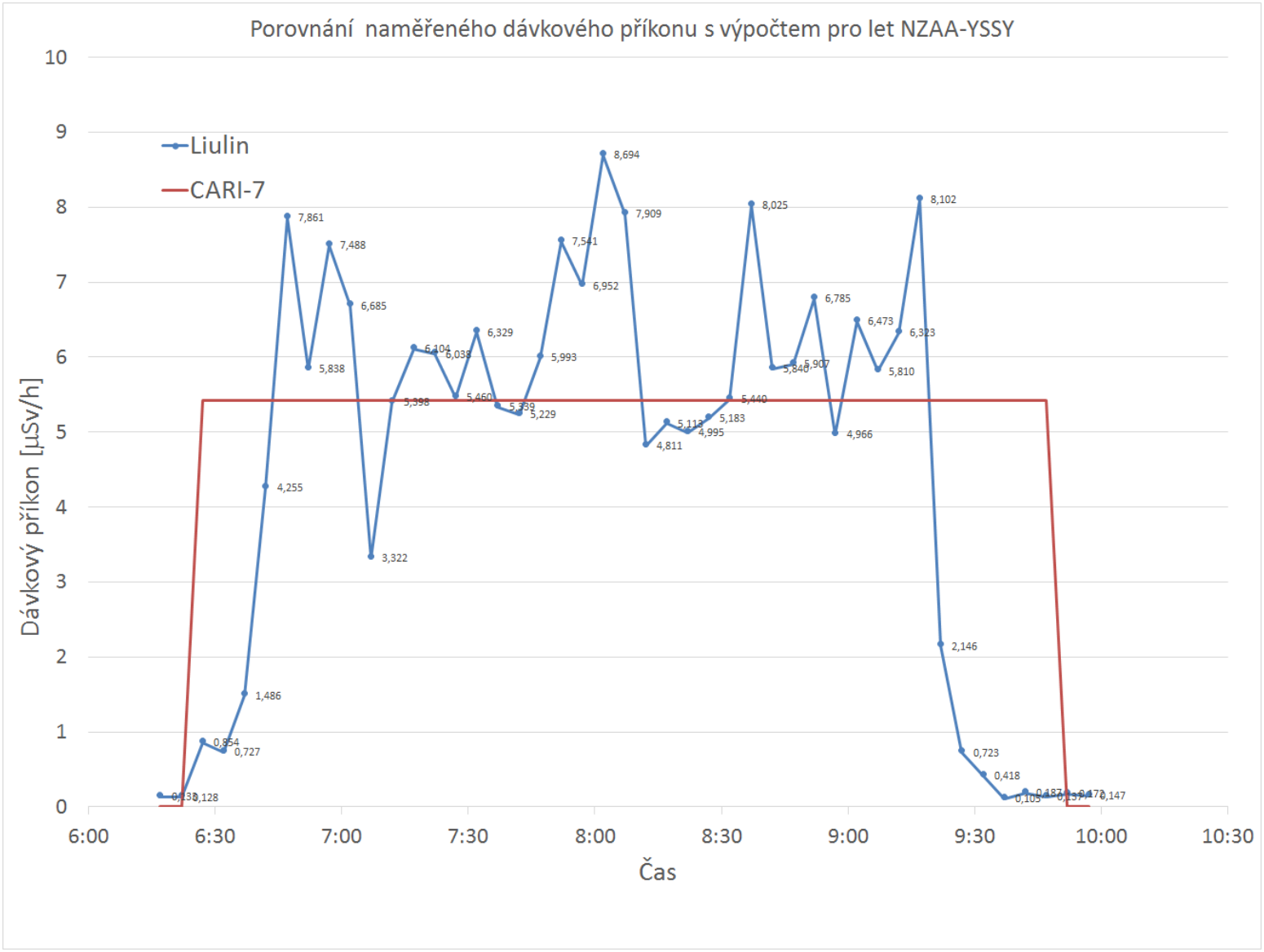

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let TFFF-KHOU
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
8
21:30
22:00
22:30
23:00
23:30
0:00
0:30
1:00
1:30
2:00
2:30
3:00
3:30
4:00

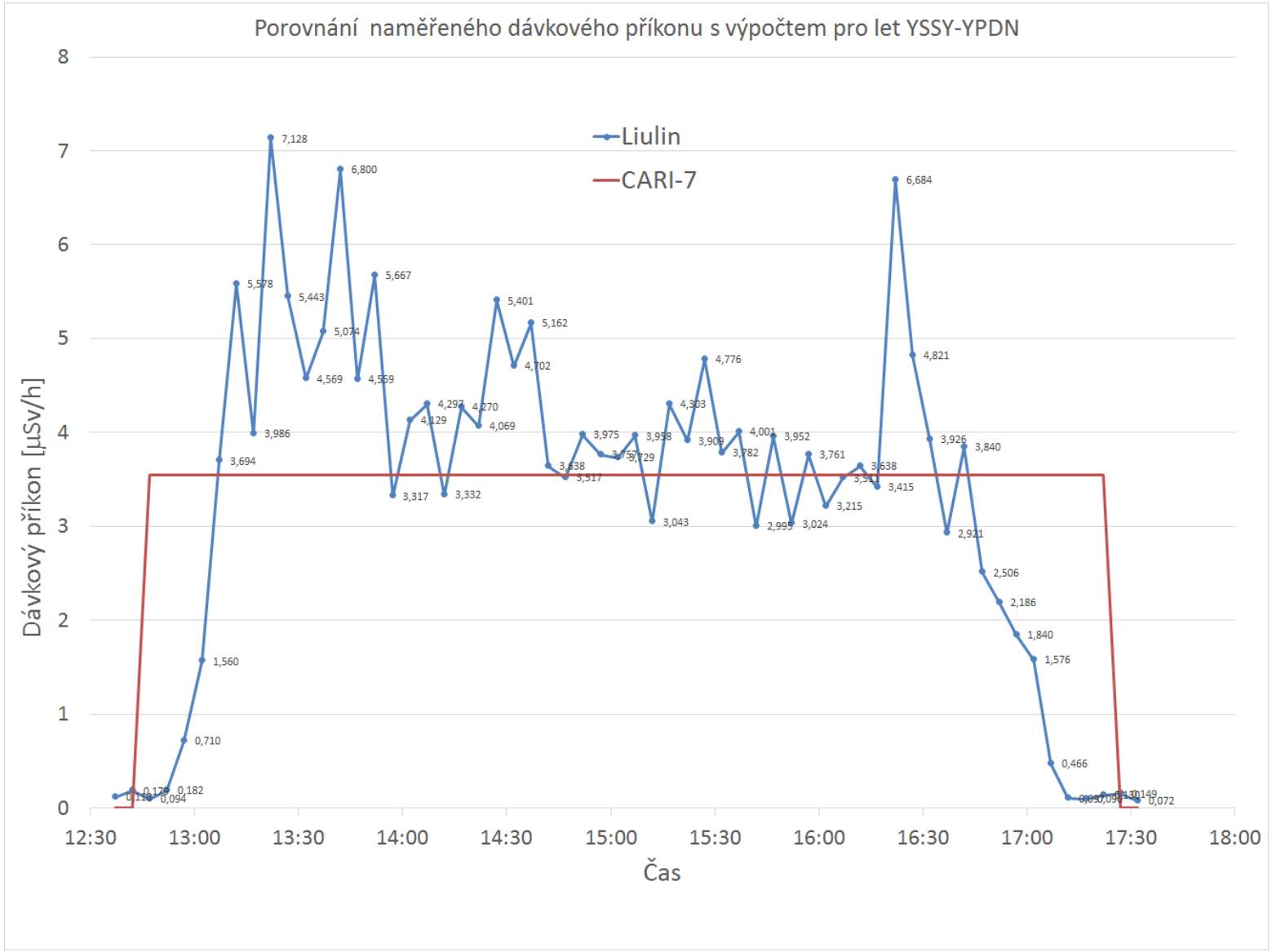

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let KHOU-KLAX
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
4:30
5:00
5:30
6:00
6:30
7:00
7:30
8:00
8:30
0,078
0,165
0,834
2,258
2,771
4,407
4,318
7,219
3,738
7,556
5,523
5,428
6,150
4,048
6,236
5,287
8,112
5,341
4,743
4,682
3,743
5,096
4,741
5,255
3,942
4,423
4,781
5,784
6,686
5,254
6,236
4,334
5,652
3,016
2,083
0,635
0,208
0,121
0,134
0,068
0,147

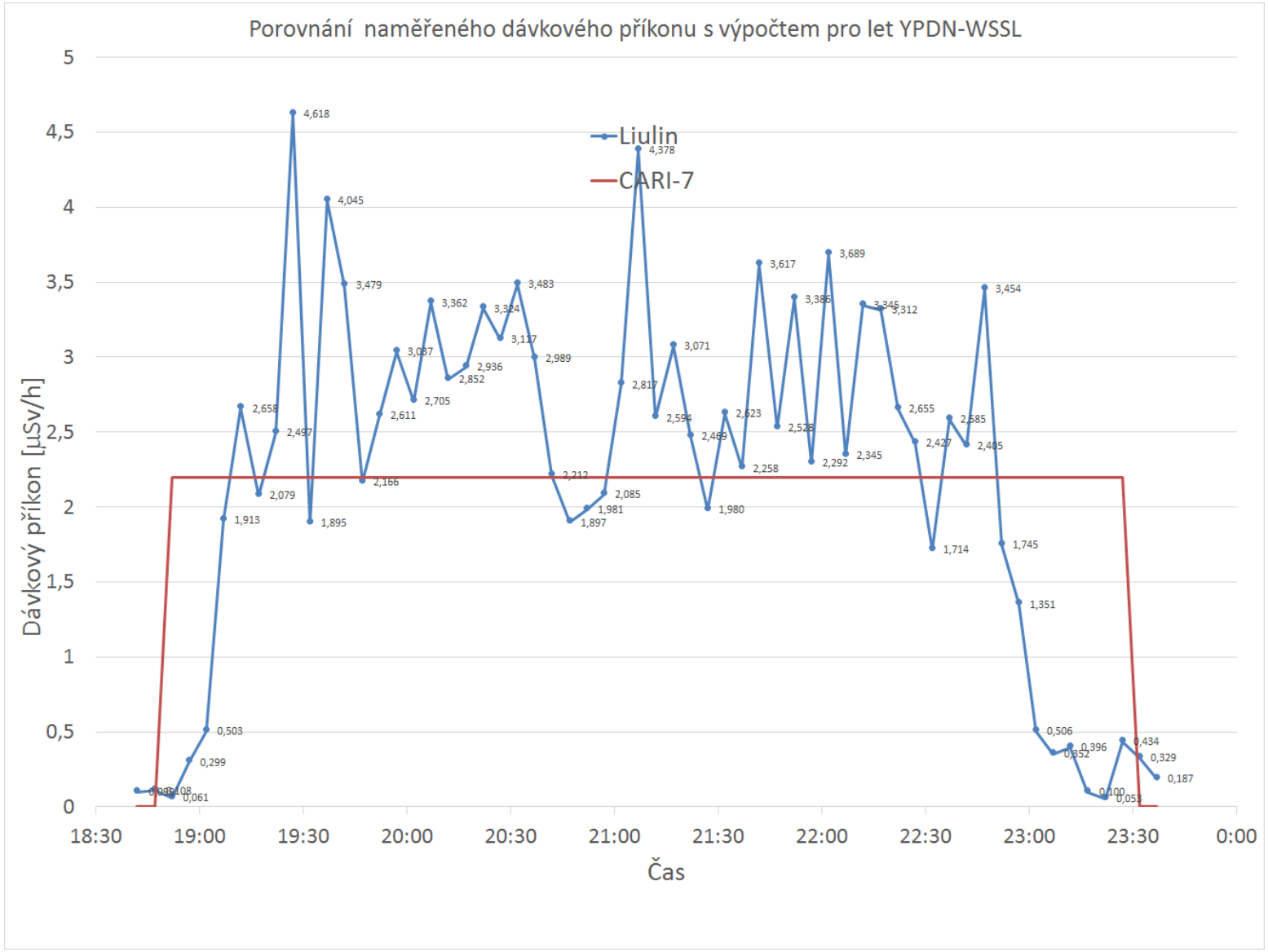

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let KLAX-PHLI
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9:00
9:30
10:00
10:30
11:00
11:30
12:00
12:30
13:00
13:30
14:00
14:30
15:00
15:30
16:00
16:30
17:00

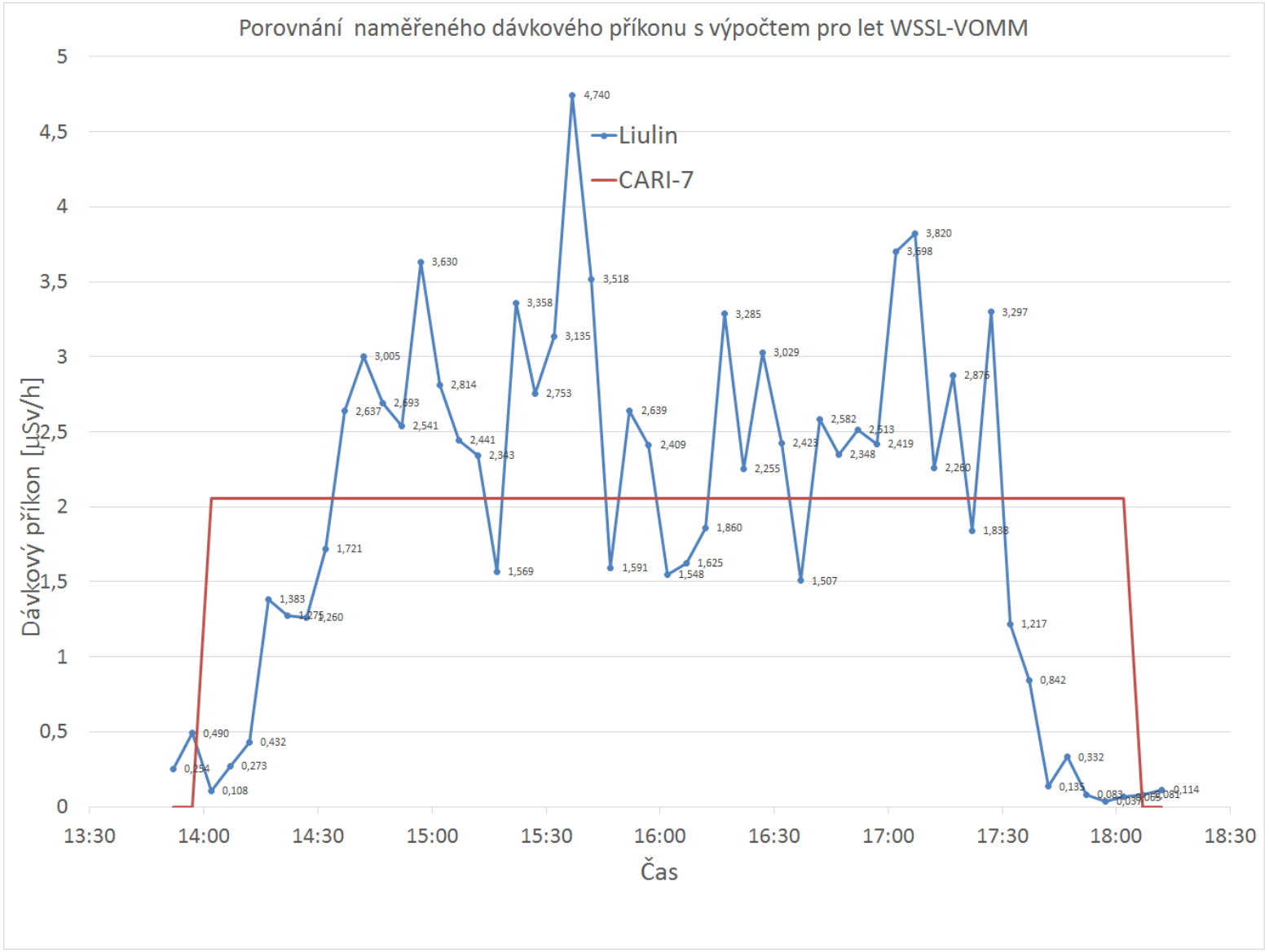

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let PHLI-NSFA
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
17:30
18:00
18:30
19:00
19:30
20:00
20:30
21:00
21:30
22:00
22:30
23:00
23:30
0:00
0:30

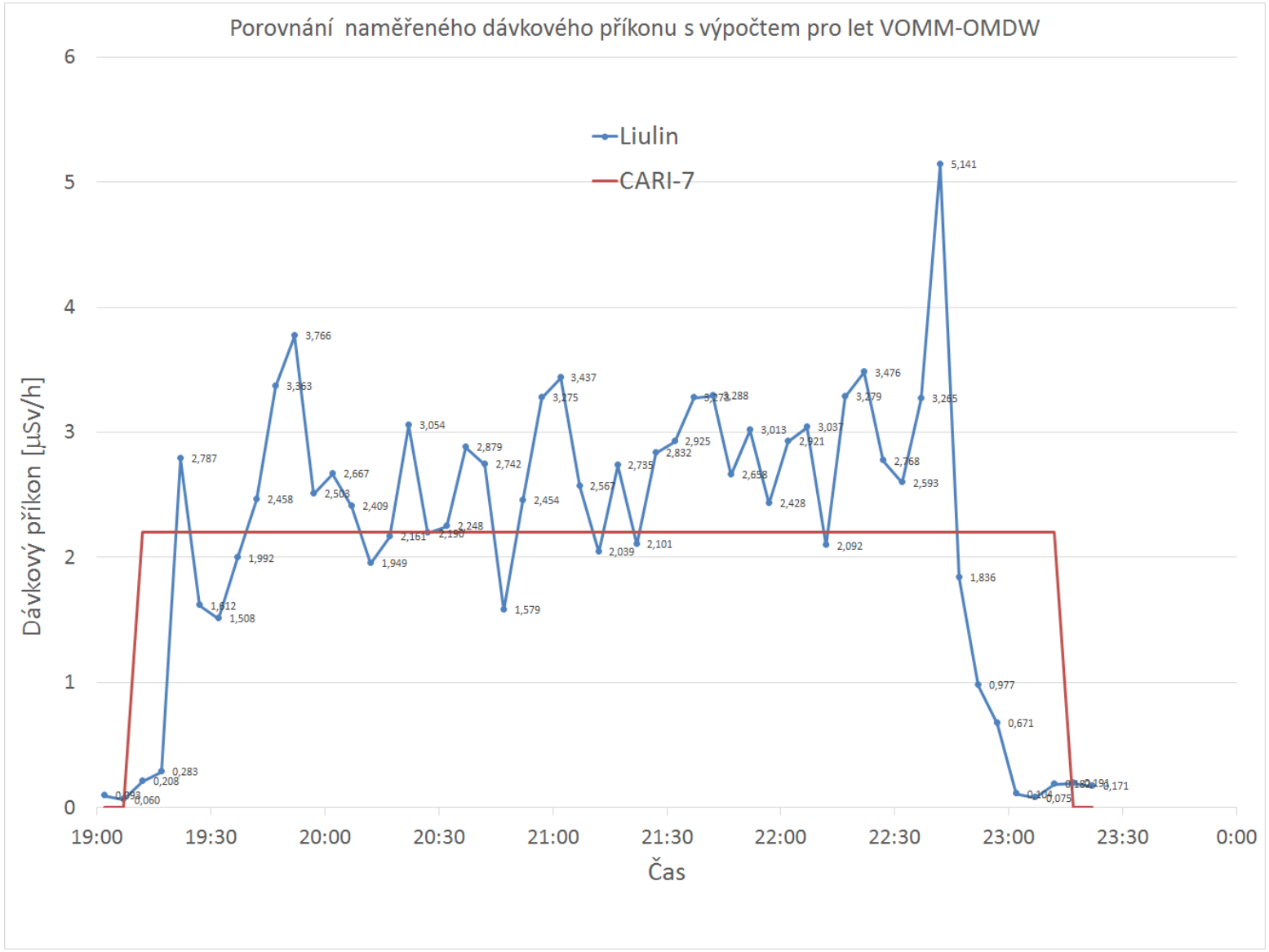

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let NSFA-NZRO
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0:00
0:30
1:00
1:30
2:00
2:30
3:00
3:30
4:00
4:30
5:00
0,057
0,251
0,087
0,187
0,849
1,334
1,038
2,718
2,871
3,196
3,304
3,086
2,859
2,648
3,775
3,671
3,023
4,455
3,803
2,834
3,653
4,212
2,885
4,141
5,292
5,732
4,444
3,558
5,430
8,124
3,091
4,237
3,493
4,189
7,717
5,167
4,415
6,194
6,249
4,053
5,764
7,347
4,572
5,773
4,737
3,012
0,421

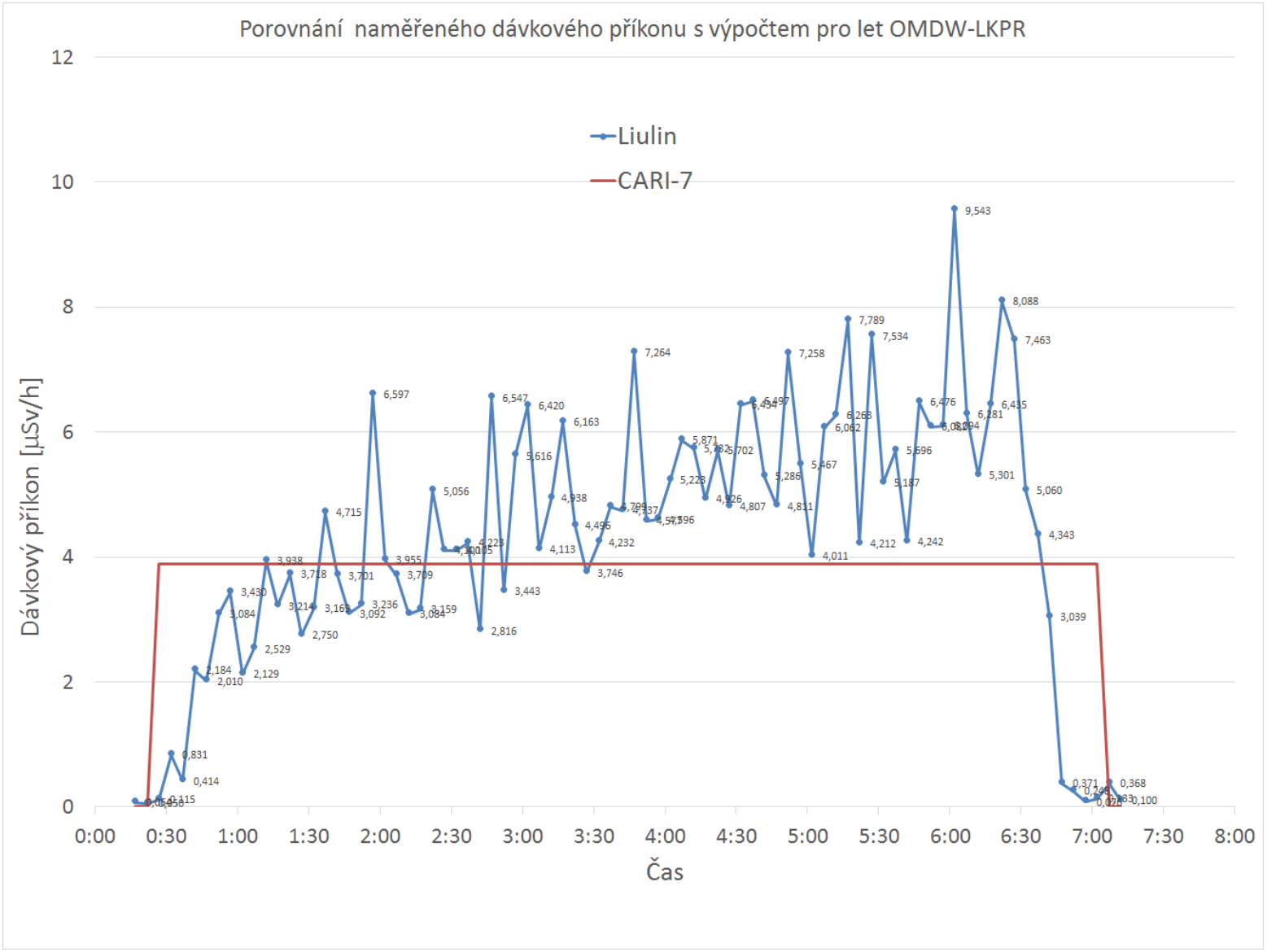

Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let NZAA-YSSY
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
6:00
6:30
7:00
7:30
8:00
8:30
9:00
9:30
10:00
10:30
0,128
0,854
0,727
1,486
4,255
7,861
5,838
7,488
6,685
3,322
5,398
6,104
6,038
6,329
5,460
5,339
5,229
5,993
7,541
6,952
8,694
7,909
4,811
5,118
4,995
5,183
5,440
8,025
5,840
5,907
6,785
4,966
6,473
5,810
6,323
8,102
2,146
0,723
0,418
0,105
0,147


Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let YSSY-YPDN
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
7
8
12:30
13:00
13:30
14:00
14:30
15:00
15:30
16:00
16:30
17:00
17:30
18:00
7,128
6,800
6,684
5,667
5,578
5,443
5,401
5,162
5,074
4,821
4,776
4,702
4,569
4,569
4,303
4,297
4,270
4,129
4,069
4,001
3,986
3,975
3,958
3,952
3,926
3,909
3,840
3,782
3,761
3,729
3,717
3,694
3,638
3,638
3,517
3,511
3,415
3,332
3,317
3,215
3,043
3,024
2,995
2,921
2,506
2,186
1,840
1,576
1,560
0,710
0,466
0,182
0,178
0,149
0,094
0,072


Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let YPDN-WSSL
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
5
18:30
19:00
19:30
20:00
20:30
21:00
21:30
22:00
22:30
23:00
23:30
0:00
0,108
0,061
0,299
0,503
1,913
2,079
2,658
2,497
4,618
1,895
4,045
3,479
2,166
2,611
3,037
2,705
3,362
2,852
2,936
3,324
3,117
3,483
2,989
2,212
1,897
1,981
2,085
2,817
4,378
2,594
3,071
2,469
1,980
2,523
2,258
3,617
2,528
3,386
2,292
3,689
2,345
3,345
3,312
2,655
2,427
2,585
2,405
1,714
3,454
1,745
1,351
0,506
0,352
0,396
0,100
0,434
0,329
0,187


Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let WSSL-VOMM
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
4
4,5
5
13:30
14:00
14:30
15:00
15:30
16:00
16:30
17:00
17:30
18:00
18:30
0,254
0,490
0,108
0,273
0,432
1,383
1,275
1,260
1,721
2,637
3,005
2,693
2,541
3,630
2,814
2,441
2,343
1,569
3,358
2,753
3,135
4,740
3,518
1,591
2,639
2,409
1,548
1,625
1,860
3,285
2,255
3,029
2,423
1,507
2,582
2,348
2,513
2,419
3,698
3,820
2,260
2,876
1,838
3,297
1,217
0,842
0,332
0,135
0,083
0,039
0,068
0,081
0,114


Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let VOMM-OMDW
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
1
2
3
4
5
6
19:00
19:30
20:00
20:30
21:00
21:30
22:00
22:30
23:00
23:30
0:00
0,093
0,060
0,208
0,283
2,787
1,612
1,508
1,992
2,458
3,363
3,766
2,503
2,667
2,409
1,949
2,161
2,196
2,248
3,054
2,879
2,742
1,579
2,454
3,175
3,437
2,567
2,039
2,735
2,101
2,832
2,925
3,273
3,288
2,658
3,013
2,428
2,921
3,037
2,092
3,279
3,476
2,768
2,593
3,265
5,141
1,836
0,977
0,671
0,075
0,171


Porovnání naměřeného dávkového příkonu s výpočtem pro let OMDW-LKPR
Liulin
CARI-7
Dávkový příkon [µSv/h]
Čas
0
2
4
6
8
10
12
0:00
0:30
1:00
1:30
2:00
2:30
3:00
3:30
4:00
4:30
5:00
5:30
6:00
6:30
7:00
7:30
8:00

Příloha F

Seznam použitých zkratek

ARS	akutní radiační syndrom
CERF	The CERN-EU high energy Reference Field facility
CERN	Francouzský název: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire Anglický název: European Council for Nuclear Research
CME	Coronal Mass Ejection
DDREF	Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor
EAS	Extensive Air Showers
Euratom	European Atomic Energy Community
GCR	Galactic Cosmic Rays
GKZ	galaktické kosmické záření
GOES	Geosynchronous Operational Environmental Satellite
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
KHOU	William P. Hobby Airport, Houston, Texas, USA
KLAX	Los Angeles International Airport, California, USA
KZ	kosmické záření
LET	Linear Energy Transfer
LKPR	Václav Havel Airport Prague, Czech Republic
LKTB	Brno – Tuřany Airport, Czech Republic
LPE	Lineární Přenos Energie
LPLA	Lajes Air Base, Azores
NSFA	Faleolo International Airport, Samoa
NZAA	Auckland Airport, New Zeland
NZRO	Rotorua Regional Airport, New Zeland
OMDB	Dubai International Airport, United Arab Emirates
OMDW	Al Maktoum International Airport, United Arab Emirates
OSN	Organizace Spojených Národů
PHLI	Lihue Airport, Hawaii, USA
PHNL	Honolulu International Airport, Hawaii, USA

RBE	Relative Biological Effectivness
SEP	Solar Energetic Particles
SF	Solar Flares
SKZ	sluneční kosmické záření
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚJCHBO	Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
TFFF	Martinique Aimé Césaire International Airport, Martinique
TFFR	Pointe-a-Pitre Le Raizet Airport, Guadelupe
TGE	Thunderstorm Ground Enhancements
TGF	Terrestrial Gamma-ray Flashes
ÚJF AV ČR	Ústav jaderné fyziky Akademie věd České republiky
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
VOMM	Chennai International Airport, India
WHO	World Health Organization
WSSL	Seletar Airport, Singapore
YPDN	Darwin International Airport, Australia
YSSY	Sydney (Kingsford Smith) Airport, Australia