

ENERGETICKÉ KOZMICKÉ ČASTICE: VZŤAHY KU KOZMICKÉMU POČASIU A VPLYV NA ATMOSFÉRU

(ENERGETIC PARTICLES IN SPACE: RELATIONS TO SPACE WEATHER AND INFLUENCE ON THE ATMOSPHERE

Karel KUDELA

Ústav experimentálnej fyziky SAV, Watsonova 47, 043 53 Košice
Technická Univerzita, Košice, kkudela@kosice.upjs.sk

SUMMARY

Basic characteristics of energetic particles in space are reviewed: cosmic rays (galactic, solar and anomalous component) as well as magnetospheric particles (radiation belts, ring current). The list of references to particle models is presented. The space weather effects of energetic particles, in particular on airplanes and satellites, are shortly summarized and illustrated from recent month's failures and increases of radiation dose. The effects on the atmosphere, in particular on its ionization status, and possible relations to climate are summarized according to published papers and information from various web sites. The paper and list of references may be useful for physicists working in other branches of physics as well as for teachers.

Keywords: space weather, energetic particles in space, cosmic rays, atmosphere

1. ÚVOD.

Rozvoj družicových a leteckých techník a technológií, rozširovanie ľudských aktivít na okolozemských orbitách a na výške lietadiel ako aj upresňovanie stavu atmosféry zvyšujú záujem aj o vonkajšie efekty reťazca slnečnozemskej fyziky, ktoré ich môžu ovplyvňovať. V poslednom období sa pre tieto efekty používa označenie kozmické počasie (podľa J. Freemana, 1995 sa pod kozmickým počasím rozumejú podmienky na Slnku a v slnečnom vetri, v magnetosfére, ionosfére a termosfére, ktoré môžu ovplyvňovať funkčnosť a spoľahlivosť kozmických a pozemných technologických systémov a môžu ohroziť zdravie a životy ľudí). Jednotlivé javy tohto reťazca sú opísané napr. v [10]. Jedným z dôležitých elementov tohto systému sú energetické kozmické častice. O priamych aj nepriamych vzťahoch kozmického žiarenia ku kozmickému počasiu pojednáva napr. [33,36]. Tu sa venujeme iba priamym účinkom energetických kozmických častíc. Pozemné pozorovania kozmického žiarenia sú obmedzené atmosférou, ktorá nedovoľuje ani v blízkosti magnetických pólov merať sekundárne produkty na zemskom povrchu, pokiaľ energie primárnych protónov nie sú vyššie ako ~400 MeV. Merania na družiciach a kozmických sondách rozširujú možnosti sledovať kozmické častice aj nižších energií. Po veľmi stručnom prehľade o jednotlivých populáciách energetických častíc v okolí Zeme uvidíme ich niektoré účinky na umelé družice Zeme, na lietadlá a zemskú atmosféru podľa nedávno publikovanej literatúry. Výber literatúry nie je úplný a môže byť subjektívny.

2. POPULÁCIE KOZMICKÝCH ENERGETICKÝCH ČASTÍC.

Energetické kozmické častice možno klasifikovať podľa ich pôvodu, resp. podľa oblastí, v ktorých sú ich toky formované. Ak sa zaujímate o blízke okolie Zeme a zemskú atmosféru a o častice, ktoré vykazujú priestorové a časové variácie, ide o častice *a.* heliosferické, *b.* magnetosferické. K typu *a* patrí predovšetkým kozmické žiarenie (KŽ, [11]), tj. korpuskulárne častice (prevážne protóny), ktorých hustota energie vo vnútri slnečného systému je podstatne nižšia ako je hustota energie plazmy slnečného vetra, v ktorej sú ako v dokonale vodivom prostredí magnetické siločiarly „vmrazené“. Konfigurácia vektora magnetického poľa **B** je stabilná v referenčnom systéme pohybujúcom sa voči pozorovateľovi rýchlosťou slnečného vetra a je plazmovým tokom, ktorý nie je homogénny, izotropný ani časovo nepremenný, determinovaná. Variabilita slnečného vetra je určená primárne podmienkami na slnečnom povrchu, v jeho koróne, a medziplanetárnym prostredím. Vo vnútornej heliosfére možno KŽ považovať za „autonómnou populáciu“ jednotlivých vysokoenergetických častíc, ktorá koexistuje s plazmou slnečného vetra (možno zanedbať kolektívne aj gravitačné efekty [29]). Vo vonkajšej heliosfére je však hustota energie KŽ a plazmy slnečného vetra porovnateľná, tj. premenné toky KŽ (v oblasti nižších energií) môžu ovplyvniť dynamiku plazmových tokov. Rozlišujú sa tri zložky KŽ: *aa.* galaktické KŽ, prichádzajúce do slnečného systému z medziplanetárneho priestoru, *ab.* častice heliosferické (urýchľované na plazmových

diskontinuitách v heliosfére a slnečné kozmické žiarenie), *ac.* anomálna zložka KŽ.

Pre zložku *aa.* ovplyvňujú jej „históriu“ v heliosfére 4 hlavné procesy, ktoré majú dopad na formovanie tokov aj u Zeme: *konvekcia* ako odpoveď na konvekciu **B** slnečným vetrom; *difúzia* v priestore nábehových uhlov (uhol medzi vektorom rýchlosti častice a **B**) pri rozptyle na nehomogenitách magnetického poľa, ktorá väčšinou vedie ku izotropizácii uhlového rozdelenia v systéme slnečného vetra; *adiabatický ohrev alebo ochladenie*, ku ktorým dochádza v dôsledku vzájomného približovania sa, resp. vzdialovania sa nehomogenít **B** a zmeny energie častíc pri zrážkach s nimi; *drift* častíc KŽ, vznikajúci v dôsledku veľkorozmerovej štruktúry **B** (v nultom priblížení je špirálové nehomogénne) a faktu, že gyračný pohyb okolo **B** je procesom rýchlejšim než rozptyl [29]). Základy teórie transportu KŽ v heliosfére boli položené E.N. Parkerom v r. 1965. Najvýznamnejšími dlhodobými modulačnými efektami heliosféry na galaktické KŽ sú 11 a 22 ročná variabilita ich intenzity, ktorá antikoreluje so slnečnou aktivitou. Modulácia sa zoslabuje s rastúcou energiou ($>10^{12}$ eV je už zanedbateľná). Zatiaľ, čo prvá z nich zodpovedá slnečnej aktivite samotnej (meranej napr. počtom slnečných škvrn), druhá je dôsledkom slnečného magnetického cyklu a driftu častíc do heliosféry, ktorý má rôzny charakter pre rôzne polarities magnetického poľa Slnka. Významnou je aj ~27 denná variabilita zodpovedajúca rotácii slnečného disku a nehomogenitám na slnečnom povrchu. Dlhodobé kvaziperiodické zmeny intenzity KŽ sú opísané napr. v [35]). Pre praktické účely, napr. pre odhad účinkov KŽ na elektronické prvky a iné materiály na družiciach jestvujú modely. Jedným z nich je CREME96 ([69,70,73]). Model zahŕňa tak galaktickú, anomálnu aj slnečnú zložku KŽ a relatívne dobre vystihuje ich variabilitu v blízkosti Zeme. Najväčšie odchýlky od modelov sú pozorované v obdobiach blízko maxim slnečnej aktivity, kedy napr. počas 50 dní je variabilita toku KŽ pozorovaná neutronovým monitorom na Lomnickom štíte len 1.6 krát menšia než zmena toku medzi slnečným maximom a minimom [37]. Neregulárne zmeny, hlavne poklesy KŽ u Zeme, sú pozorované v obdobiach geomagnetických porúch, ale aj v obdobiach, kedy sú pozorované len malé zmeny indexov geomagnetickej aktivity. Sú označované podľa S. Forbusha (tzv. Forbushove poklesy), ktorý ich pozoroval po prvý raz v r. 1937 [19]. Pri výronoch koronálnej látky (CME, Coronal Mass Ejections) je KŽ týmto oblakom so zmenenou konfiguráciou **B** podstatne ovplyvňované, a to aj vtedy, keď CME pri svojom pohybe od Slnka nenarazí na zemskú magnetosféru a nevyvolá geomagnetickú poruchu.

Zložka *ab.* sa vyskytuje sporadicky. Urýchľovanie na postupujúcich medziplanetárnych rázových

vlnách ovplyvňuje populáciu nízkoenergetického KŽ (jednotky až stovky MeV). Pre zemskú atmosféru sú najvýraznejšími príspevkami KŽ produkovaného vo vnútri heliosféry častice urýchľované na povrchu Slnka, ktoré spôsobujú tzv. GLE prípady (pozemné efekty, Ground Level Events). Prvým z nich bol prípad z februára 1942, kedy bolo zistené, že v koincidencii s emisiou slnečných častíc došlo k prerušeniu krátkovlnového spojenia [20]. Doteraz bolo zaznamenaných 63 prípadov GLE. Energetické spektrum slnečného KŽ je oveľa mäkkšie ako galaktického KŽ, ale v oblasti nižších energií môže jeho intenzita na určitú dobu (desiatky minút – niekoľko hodín) mnohonásobne prekročiť intenzitu galaktickej zložky. Preto sú prípady slnečných energetických častíc pre kozmické počasie dôležité. Modely tokov slnečného KŽ sú okrem CREME96 aj opísané v [76,77] a v referenciách tam uvedených.

Zložka *ac.* má pôvod v neutrálnom plyne prichádzajúcim do heliosféry z medzihviezdneho priestoru. Atómy s vysokým prvým ionizačným potenciálom preniknú ako neutrálne hlboko do slnečného systému, sú jedenkrát ionizované nábojovou výmenou s časticami slnečného vetra alebo elektromagnetickým žiarením Slnka a následne sú efektívne urýchlené. Anomálnou sa táto zložka označuje preto, že v oblasti kinetických energií pod ~50 MeV/nukl sú niektoré ióny (napr. He, N, O, Ne) zastúpené anomálne vysoko v porovnaní s protónmi galaktického KŽ [46]. Základné charakteristiky KŽ sú zhrnuté napr. v [37]. K typu *b* patria častice radiačných pásov Zeme (*ba*, RP) a kruhového prúdu (*bb*). Častice RP sú zachytené geomagnetickým poľom a tvoria ich populácie elektrónov do niekoľko MeV a protónov do niekoľko stov MeV. Pri drifte okolo Zeme častice RP dosahujú najmenšiu výšku svojich zrkadlových bodov odrazu v oblasti juhoatlantickej magnetickej anomálie, čo je dôležité pre radiačné poškodenie družicových systémov. Transport týchto častíc v magnetosfére v časovo a priestorovo premenných štruktúrach magnetických a elektrických polí, straty energie pri interakciách s vlnením a zvyškovou atmosférou ako aj urýchľovacie procesy vedú k redistribúcii ich tokov. Dôležité pre atmosféru sú zmeny nábehového uhla častíc RP vedúce k zníženiu výšky zrkadlových bodov a k vysypávaniu do jej horných vrstiev. Statické modely vnútorného aj vonkajšieho radiačného pásu jestvujú a sú označované ako AE, resp. AP modely (napr. [4,21]). Z nich možno odhadnúť očakávaný tok častíc v danom mieste (L,B) priestoru pre danú energiu (napr. podľa [71]). Mc Ilwainov parameter L bol zavedený v práci [91]. Zjednodušene, pre dipólové geomagnetické pole, označuje obálku tvorenú siločiarami, ktorá pretína rovinu magnetického rovníku vo vzdialenosti L zemských polomerov od stredu Zeme.

Zložku **bb**. tvoria zachytené ióny a elektróny s energiami desiatky až stovky keV, ktoré azimutálne driftujú okolo Zeme vo vzdialenostiach 2 – 7 zemských polomerov (napr. [87]). Ich intenzita je monitorovaná na zemskom povrchu magnetometrami, nakoľko spôsobujú diamagnetický efekt. Takto je sledovaný rozvoj geomagnetických porúch. Hlavné zosilnenie kruhového prúdu, ku ktorému dochádza na obálkach $L < 4$ je vysvetľované ako kombinácia injekcie častíc počas subbúrky z nočnej strany, transportu a urýchľovania častíc plazmovej vrstvy v chvoste magnetosféry v dôsledku zvýšenej konvekcie zosilneným elektrickým poľom. Častice kruhového prúdu sú monitorované aj „diaľkovo“ – registráciou neutrálnych energetických atómov geokoróny, ktoré svoju energiu získávajú nábojovou výmenou s populáciou **bb**. Charakteristiky častíc **ba**, **bb** sú zhrnuté napr. v [22,26,8,9].

Obraz o komplexe fyzikálnych podmienok zemského okolia s využitím jestvujúcich modelov magnetického poľa Zeme, atmosféry, ako aj energetických kozmických častíc je v [25] a je použiteľný pomocou [80].

3. ÚČINKY NA DRUŽICE A LIETADLÁ.

Zhrnutie základných radiačných účinkov na družice s nízkou orbitou a na lietadlá je napr. v prácach [27,12-15]. Pri nízkych energiách okolitých častíc (materiály družice sú v elektrickom kontakte s plazmovým prostredím, ktoré je zdrojom elektrických prúdov) je dôležitá zmena elektrického potenciálu na povrchoch s možnými následkami ako krátke spojenie vysokonapäťových systémov, resp. vývoj s indukovaným prúdovým pulzom, ktorý môže interferovať s elektronikou. Pri energiách vyšších (častice **ba,bb**) radiácia spôsobuje permanentné poškodenie materiálov a komponentov, čo pri dlhodobom pôsobení môže viesť ku ohrozeniu ich funkčnosti. Príkladmi týchto efektov sú poklesy účinnosti slnečných batérií (napr. skúsenosti z Magionu-5 [68]). Okrem vysokých tokov protónov >100 MeV počas slnečných erupcií sa pre možné poškodenia družicových systémov ukazujú veľmi dôležité prípady zvýšených tokov elektrónov v zemskom okolí [71]. Tie môžu byť urýchľované na Slnku, v medziplanetárnom priestore, ale aj v zemskej magnetosfére. Môžu vznikáť aj „nové radiačné pásy“, ktoré sa prejavujú mnohokrát silnejšími tokmi dokonca aj na nízkych L počas silnej magnetickej búrky [5,6]. Vysokoenergetické elektróny môžu preniknúť do vnútorných oblastí družice a akumulácia náboja na nevodivých materiáloch (nap. káble) môže viesť ku dielektrickému prieboju a elektromagnetickému pulzu poškodzujúcemu vnútorný materiál. V literatúre sú opísané prípady poškodenia družíc týmto mechanizmom (napr. CRESS, Meteosat-3 ap.). Dôležitým monitorom vysokoenergetických

častíc sú geostacionárne družice GOES (v súčasnosti pracujú 8,10 a 11, dáta na [85]). Počas intervalu 21.4. - 20.5.1998 došlo k totálnemu zlyhaniu družice Equator-S, k anomálii prenosu z družice POLAR a ku zlyhaniu komerčnej družice Galaxy 4. V práci [1] je ukázané, že v tomto období došlo na GOES ku zvýšeniu toku elektrónov > 2 MeV o viacej ako 4 rády, zatiaľčo zvýšenia toku protónov nad 100 MeV neboli natoľko dramatické. Silné toky energetických elektrónov boli v období prvých dní mája 1998 pozorované za zemskou magnetosférou na družici Interball-1 ako aj na sonde SOHO vo vzdialenosti $1.5 \cdot 10^6$ km od Zeme [44].

Častice vysokých energií môžu pri interakcii s materiálom vytvoriť elektrický náboj v elektronických súčiastkach dostačujúci na to, aby sa ovplyvnil pamäťový stav (tzv. SEU – single event upset) alebo aby sa indukovali falošné signály napr. v detektoroch CCD. Tieto efekty sú väčšinou vratné a spôsobujú ich jednak častice KŽ, resp. častice radiačných pásov osobitne v oblasti juhoatlantickej anomálie. Pre malé výšky je dôležité monitorovanie vysokoenergetických častíc rôznych typov a energií na polárnych dráhach (napr. detailná mapa rozdelenia tokov gama žiarenia, získaná z družice CORONAS-I [7]). Na vysokých šírkach je výskyt podobných efektov veľmi variabilný a podstatne sa zvyšuje v prípade príchodu častíc od slnečných erupcií. Zatiaľčo napr. družice GOES sústavne monitorujú oblasť energií protónov s najvyšším prahom 100 MeV, je sieť neutronových monitorov na rôznych geomagnetických šírkach jediným zdrojom informácie o tvare spektra častíc od slnečných erupcií pri energiách vyše niekoľko sto MeV. K tomu je potrebná aj detailná znalosť priepustnosti magnetosféry pre častice KŽ.

Aj keď príčiny zlyhaní družicových systémov vo veľkom počte prípadov nie sú jednoznačne určené, jestvuje relatívne veľa prípadov s vysokou pravdepodobnosťou vplyvu radiácie ako príčiny poruchy. Z posledného obdobia uveďme 3 z r. 2002 [78]: (i) NASA družica Aqua na 685 km slnečno-synchronnej orbite mala poruchu spôsobenú asi SEU od protónov vysokých energií nad južným Atlantikom 27. 6., ďalší deň sa porucha odstránila, (ii) NASA sonda Genesis (blízko Lagrangeovho bodu L1 hlboko v medziplanetárnom priestore) počas silnej slnečnej erupcie s emisiou protónov vysokých energií dňa 21.4. (ich intenzita o niekoľko rádov prevýšila obvyklú) zaznamenala poruchu orientačného systému, ktorá bola neskôr tiež odstránená, (iii) japonská heliocentrická sonda Nozomi (Planet B) od rovnakej erupcie „pocítila“ poruchu komunikačného systému a jeden zo 14tich vedeckých prístrojov na palube bol poškodený.

KŽ vytvára v atmosfére populácie sekundárnych častíc, ktorých energetické zloženie a toky sa menia s hĺbkou. Na výškach letov lietadiel sa efekty typu SEU, známe už dlhšie pre družicové systémy, začali

študovať relatívne nedávno (napr. [28] a referencie). Jedna z prvých prác opisujúcich funkčnú poruchu na medzikontinentálnom lete kvôli SEU spôsobenému KŽ je [51]. Dôležité je preto tak monitorovanie kozmických energetických častíc na lietadlách ako aj pozemnými metódami. Na výškach lietadiel sú hlavnou komponentou sekundárneho KŽ dôležitou pre poruchy neutróny. Premennou zložkou sú najmä častice slnečných erupcií. Priepustnosť magnetosféry sa počas magnetických búrok zvyšuje a v takých prípadoch je zvýšená radiácia registrovaná aj na podstatne nižších magnetických šírkach než je určené statickým magnetickým poľom IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Pre výpočet produkcie neutrónov v atmosfére sa používa napr. programový systém FLUKA (napr. [3,72]). V najhoršom prípade slnečnej erupcie z 23.2.1956 je odhadované, že toky neutrónov na 17 km a na prahovej rigidite 1 GV by spôsobili poruchy typu SEU každých 7 sek [15].

Okrem možných porúch na elektronike lietadiel je dôležitá aj celková dávka žiarenia, ktorej sú vystavené najmä ich posádky. Na zemskom povrchu tvorí príspevok od KŽ (galaktickej zložky na stredných šírkach) len asi 8 % celkovej dávky a zodpovedá 0.27 mSv/rok [88]. Úroveň radiácie od KŽ rastie s výškou: na úrovni 1,6-2.25 km faktorom 3, na výškach Himaláji (6.7 km) faktorom 30, na výškach 10 km faktorom 150 a na 15 km faktorom 300 (prevzaté z prezentácie [2]). Odhady dávok ožiarenia podľa [15] na výškach lietadiel sa podstatne zvyšujú pri slnečných erupciách: Zatiaľčo dávkový ekvivalent za 1 týždeň letov pre posádky od galaktického KŽ na 1GV a 10 km je asi 700 μ Sv, pre extrémnu slnečnú erupciu z 23.2.1956 (niekoľko hodín) by to bolo 1400 μ Sv a na výške 17 km sa tieto hodnoty odhadujú na 1800 μ Sv, resp. 9300 μ Sv. V tejto výške by aj faktorom 2 prekročila dávka za trvanie erupcie celkovú ročnú dávku od galaktickej zložky KŽ. Nie všetky slnečné erupcie sú sprevádzané emisiou častíc vysokých energií s takou intenzitou a tvrdým energetickým spektrom ako bola erupcia 23.2.1956. V podobnom prípade by ale napr. účinky pre kozmonautov vo voľnom priestore pri práci mimo lode boli pravdepodobne fatálne. Dokonca aj pre "slabší" prípad z októbra 1989 by pri práci kozmonauta na Mesiaci (zanedbateľné magnetické tienenie) mohlo dôjsť k jeho usmrteniu [30]. Pre odhad dávky ožiarenia na lietadlách je užitočný programový kód CARI-6 (napr. [81]). Očakávanú dávku od galaktického KŽ na konkrétnej trase a výške letu možno odhadnúť zo [74]. Komplexný rozbor problematiky radiačnej situácie a jej monitorovania pre posádky lietadiel je v práci [49]. Dozimetrické experimenty na lietadlách sa väčšinou robia integrálne v čase. Pre detailné monitorovanie a preverenie jestvujúcich kódov produkcie sekundárnych častíc ako aj magnetosférickej priepustnosti sú osobitne cenné merania s časovým rozlíšením počas letu. Rozsiahly

materiál je takto získavaný rutinne merajúcim zariadením na linkách ČSA s rozlíšením 5 min [57]. Počas slnečnej erupcie s relatívne tvrdým spektrom (GLE 60 dňa 15.04.2001, kedy aj na Lomnickom štíte neutronový monitor s prahovou rigiditou 4 GV zaznamenal zreteľný vzrast), bol počas letu z Prahy do New Yorku zaznamenaný vzrast dávky ožiarenia na takmer dvojnásobok očakávaného v časovej koincidencii s maximom GLE na vyšších šírkach [57]. Zaujímavou zostáva otázka, či počas silných Forbushových poklesov alebo zmien priepustnosti magnetosféry sa na výškach lietadiel merateľný efekt dávky ožiarenia prejaví. Stručný prehľad vzťahov kozmického žiarenia a zdravia je napr. v [55,56,53]. Úvod k účinkom elektromagnetického žiarenia na zdravie a s referenciami uvádza [47,48].

4. ÚČINKY NA ZEMSKÚ ATMOSFÉRU.

Atmosférické modely sú opísané napr. v [4]. Jedným z účinkov kozmických energetických častíc na atmosféru je ionizácia. Pre kozmické počasie, najmä pre šírenie elektromagnetických vln a pre navigáciu je dôležitý výškový ionizačný profil atmosféry. Produkciu iónov okrem elektromagnetického slnečného žiarenia spôsobujú aj energetické kozmické častice, osobitne v malých výškach a na nočnej strane. Výsledky starších prác, relevantné pre produkciu iónov kozmickými časticami v rôznych výškach sú zhrnuté napr. v. [34]. Zatiaľčo pre ionosferické vrstvy F a E nie je KŽ veľmi dôležité, pod 100 km je vysypávanie častíc typu *ba* v niektorých prípadoch pre ionizáciu určujúce. Vysokoenergetické elektróny sporadicky prenikajúce do magnetosféry tvoria dominantný zdroj ionizácie na výškach 40-60 km. Pod 40 km, v závislosti od magnetickej šírky a fázy slnečného cyklu je určujúcim faktorom produkcie iónov KŽ. Výškové profily intenzity KŽ na rôznych prahových rigiditách a koncentrácia iónových párov sú systematicky získavané z balónových dlhodobých meraní ([16] a referencie). Výsledná ionizácia je výsledkom kombinácie procesov produkcie, rekombinačných strát (radiačných, disociatívnych, resp. nábojovej výmeny) a difúzie. Zmeny ionizácie od kozmických častíc sú spôsobované najmä variabilitou častíc typu *ab*, *ba*, *bb*. Zatiaľčo pre vrstvy F, resp. E sú pre ionosferické efekty kozmického počasia dôležité geomagnetické búrky (napr. [40]), v menších výškach sa prejavuje kombinácia efektov od geomagnetickej aktivity vyvolanej z medziplanetárneho priestoru ako aj energetických kozmických častíc [38]. Niektoré práce ukazujú na vplyv KŽ a geomagnetickej aktivity na stav ozónovej vrstvy [58-60,18,39]. Práca [41] na základe rozsiahlej štúdie využívajúcej družicové, balónové a pozemné merania ukazuje, že ozónové straty sú silne korelované so zmenami ionizačnej rýchlosti KŽ s výškou, šírkou a časom. Dáta indikujú, že disociácia, vyvolaná časticami KŽ

pre CF_2Cl_2 a CFCl_3 na povrchu ľadu v polárnej stratosfére na výške ~15 km je veľmi účinná. Tj. disociácia uvedených látok pri záchyte elektrónov produkovaných KŽ a lokalizovaná v ľadových čistočkách oblakov polárnej stratosféry môže hrať dôležitú úlohu vo vytváraní ozónovej diery.

KŽ má pravdepodobne súvislosti aj s oblačnosťou a počasím. Svensmark a Friis-Christensen [62] poukázali na vysoký korelačný koeficient medzi celkovým pokryvom oblačnosti určeným z družicových meteorologických meraní a intenzitou KŽ v období rokov 1984 až 1991. V [41] je uvedené, že v dôsledku vyššej teploty nízkych oblakov a toho, že obsahujú kvapôčky vody nukleované aerosolmi, môže existovať fyzikálna väzba medzi KŽ a rozdelením atmosférického aerosolu, ktorá môže objasňovať takúto koreláciu. Ak vzrast v intenzite KŽ môže spôsobiť vzrast v aerosole, potom to môže vysvetliť aj pozorovanú kladnú koreláciu medzi KŽ a povrchovou teplotou nízkych oblakov na veľkej časti zemského povrchu. Tiež bolo poukázané na historické súvislosti (počas uplynulých 1000 rokov) zmeny klímy s intenzitou KŽ zistenou nepriamo z radionuklidu ^{14}C produkovaného primárnym KŽ. Vplyv KŽ na nízku oblačnosť je analyzovaný v [43]. V poslednom období je publikovaných viacero prác o súvislostiach medzi slnečnou aktivitou ako komplexom efektov a počasím. Prekvapujúco sa ukázalo, že vplyv slnečnej aktivity je najsilnejší na nízku oblačnosť (< 3 km), čo ukazuje na mikrofyzikálne mechanizmy, zahrňujúce tvorbu aerosolov (zvyšované pravdepodobne ionizáciou spôsobovanou KŽ). Diskusia o väzbách medzi KŽ a počasím pokračuje. Napr. veľmi podrobné zhrnutie poznatkov spolu s komentármi k problematike možno nájsť v [24]. Práca [32] uvádza štatisticky významnú súvislosť medzi tokom KŽ, zrážkami a ich účinnosťou na oceánoch v oblastiach stredných až vysokých šírok. V [67] je poukázané na zmeny oblačnosti počas Forbushových poklesov KŽ, zatiaľčo tieto zmeny sú nevýrazné počas slnečných erupcií (častice s väčším spektrom málo ovplyvnia oblasti pri povrchu Zeme). Iné atmosférické efekty, ktoré opisujú možné súvislosti s KŽ možno nájsť napr. v [31,52,61]. Samotné korelácie medzi parametrami počasia a intenzitou KŽ indikujú úvahy o príčinnej súvislosti. Súčasne ale je treba zobrať do úvahy to, že (a) zmeny intenzity KŽ sú väčšinou sprevádzané aj zmenami geomagnetickej a slnečnej aktivity, (b) nie je ešte dostatok laboratórnych experimentov, ktoré by vysvetľovali mikrofyzikálne efekty, zodpovedné za takéto súvislosti. Širšími súvislosťami počasia a vonkajších efektov (včítane KŽ) sa zaoberajú napr. [64-66]. Pred nedávnom boli v CERNE zahájené aktivity, využívajúce tamojšiu infraštruktúru, ktorá umožní fyzikom atmosféry podrobne študovať úlohu prirodzenej radiácie na aerosoly a formovanie oblakov [17].

5. ZÁVER.

V rámci SR zatiaľ nebol koncipovaný program výskumu kozmického počasia. Ak sa takéto aktivity budú koncipovať, môžu košické pracoviská (ÚEF SAV v spolupráci s TU a UPJŠ, možno aj s VLN Košice) k nim prispieť špecificky, a to v oblasti štúdií energetických kozmických častíc a ich vplyvov na družice, lietadlá, atmosféru, resp. ľudské aktivity: monitorovaním a analýzou tak pozemných meraní (neutronový monitor Lomnický štít (LŠ) v reálnom čase [90]) ako aj družicových časticových meraní monitorovacieho typu. Vysokohorská poloha LŠ môže byť pre ďalšie práce, v spolupráci s ASÚ SAV, resp. so SHMÚ tiež užitočná.

PodĎakovanie. Práca bola pripravená s podporou grantovej úlohy VEGA 2/1147.

LITERATÚRA.

- [1] Baker, D.N., et al: Disturbed space environment may have been related to Pager satellite failure, *Eos Trans.*, AGU, Vol. 79, NO 40, p. 477, 482-483, 1988
- [2] Bartlett, D.T., et al.: Investigation of Radiation Doses at Aircraft Altitudes during a complete solar cycle, *ESA SP-477*, p. 525-528, 2002
- [3] Battistoni, B.:
<http://lxmi.mi.infn.it/~battist/needs.ppt>
- [4] Bilitza, D.: Solar-terrestrial models and application software, *Planet. Sp. Sci.*, 40, 541-579, 1992
- [5] Blake, J.B., et al.: Correlation of Changes in the Outer Zone Relativistic Electron Population With Upstream Solar Wind and Magnetic Field Measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 24, p. 927/930, 1997
- [6] Blake, J.B., et al: Identification of an Unexpected Space Radiation Hazard, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 39, No 6, p. 1761-1764, 1992
- [7] Bučík, R., et al.: Distribution of Gamma Ray Fluxes at Altitude 500 km: Coronas-I Data, *Acta Physica Slovaca* vol. 50, No. 1, 267-274, 2000
- [8] Daglis, I.A., et al: The terrestrial ring current: origin, formation, and decay, *Rev. Geophys.*, 37, 4, p. 407-438, 1999
- [9] Daglis, I.A.: Ring Current Physics, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 205-214, 2001
- [10] Daly, E.J., Space Weather: A Brief Review, *ESA SP-477*, xvii-xxiv, 2002
- [11] Dubinský, J., K. Kudela, Kozmické žiarenie, pp. 162, VEDA, Bratislava, 1984
- [12] Dyer, C., and D. Rodgers: Effects on Spacecraft and Aircraft Electronics, *ESA WPP-155*, p. 17-27, 1999
- [13] Dyer, C., D. Rodgers : Effects on Spacecraft & Aircraft Electronics, *ESA WPP-155*, p. 17-28, 1999

- [14] Dyer, C., Radiation Effects on Satellites and Aircraft, *ESA SP-477*, p. 505-512, 2002
- [15] Dyer, C.S., and F. Lei: Monte Carlo calculations of the influence on aircraft radiation environments of structures and solar particle events, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, p. 1-9, Dec. 2001
- [16] Ermakov, V.I., et al: Ion balance equation in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, p. 23413, 1997
- [17] Fastrop, B., et al. (J. Kirkby, spokesman): CLOUD: an atmospheric research facility at CERN, CERN/SPSC 2000-041, pp. 16, 2000
- [18] Fedulina, I., and J. Laštovička: Effect of Forbush decreases of cosmic ray flux on oyone at higher middle latitudes, *Adv. Space Res.*, Vol. 27, No 12, p. 2003-2006, 2001
- [19] Forbush, S.E.: On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm, *Phys. Rev.*, 51, 1,108-1,109, 1937
- [20] Forbush, S.E.: Three unusual cosmic ray increases possibly due to charged particles from the Sun, *Phys. Rev.*, 70, p. 771, 1946
- [21] Gaffey, J., and D. Bilitza, NASA/National Space Science Data Center trapped radiation models, *J. Spacecraft and Rockets*, 31, No 2, p. 172, 1994
- [22] Gendrin, R.: The role of wave particle interactions in radiation belts modeling, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 151-166, 2001
- [23] Grande, M., M. Carter, and C.H. Perry: The radiation belts and ring current: the relationship between Dst and relativistic electron phase space density, , *ESA SP-477*, p. 391-398, 2002
- [24] Harrison, R.G., and K.P. Shine: A review of recent studies of the influence of solar changes on the Earth's climate, 64 pp., <http://www.met.rdg.ac.uk/~radiation/newref2.html#pub2002>, a report produced for Hadley Centre/Meteorological Office, UK, 1999
- [25] Heynderickx, D., et al.: SPENVIS, ESA's Space Environment Information System, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 245-254, 2001
- [26] Heynderickx, D: Predictive radiation belt models, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 139-150, 2001
- [27] Hilgers, A., and E.J. Daly: Space Weather Effects on Space Systems, *ESA WPP-148*, p. 21-28, 1998
- [28] Johansson, K., and P. Dyreklev: Space Weather Effects on aircraft electronics, *ESA WPP-155*, p. 29-34, 1999
- [29] Jokipii, J.R.: Cosmic Rays, in *From the Sun, Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, Ed. S.T. Suess, B.T. Tsurutani, American Geophysical Union, DC, p. 123-132, 1998
- [30] Joselynn, Jo Ann, The human impact of solar flares and magnetic storms, in *From the Sun, Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, Ed. S.T. Suess, B.T. Tsurutani, American Geophysical Union, DC, p. 67-72, 1998
- [31] Kavlaikov, S., and J. Elsner: Some statistical connections between the cosmic ray intensity, solar activities, geomagnetic changes and hurricane intensification, *Proc. ICRC, 2001, Hamburg*, Copernicus Gessellschaft, p. 4169-4172, 2001
- [32] Kniveton, D.R., and M.C. Todd: On the relationship between precipitation, precipitation efficiency and cosmic ray flux, *Geophys. Res. Lett.*, 28, p. 1527-1530, 2001
- [33] Kudela, K., and M. Storini: Cosmic rays: Basic characteristics and relations to Space Weather, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 101-118, 2001
- [34] Kudela, K., Energy deposition of corpuscular radiation in the middle atmosphere, in *Middle Atmosphere Program, Handbook for MAP 29*, ed. J. Laštovička, T. Miles and A. O'Neill, part 1, p. 135-141, 1989
- [35] Kudela, K., et al: Time evolution of low-frequency periodicities in cosmic ray intensity, *Solar Physics*, vol. 205, p. 165-175, 2002
- [36] Kudela, K., et al: Cosmic Rays in Relations to Space Weather, *Space Sci. Rev.*, 93, p. 139-160, 2000
- [37] Kudela, K., M. Storini: Direct and Indirect Relations of Cosmic Rays to Space Weather, *ESA SP-477*, p. 289-292, 2002
- [38] Laštovička, J.: A review of solar wind and high energy particle influence on the middle atmosphere, *Ann. Geophys.*, 6 (4), p. 401-408, 1988
- [39] Laštovička, J., and P. Mlch: Is ozone Affected by Geomagnetic Storms?, *Adv. Space Res.*, 24 (5), p. 631-640, 1999
- [40] Laštovička, J.: Monitoring and forecasting of ionospheric space weather-effects of geomagnetic storms, *J. Atmos. And Solar-Terrestrial Phys.*, 64, p. 697-705, 2002
- [41] Lu, Q.-B., and L. Sanche: Effects of cosmic rays on atmospheric chlorofluorocarbon dissociation and oyone depletion, *Phys. Rev. Lett.*, 87, 078501, August 2001
- [42] Marsh, N., and H. Svensmark: Cosmic Rays, clouds and climate, *Space Sci. Rev.*, prijaté, 2000a
- [43] Marsh, N., and H. Svensmark, Low cloud properties influenced by cosmic rays, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, 23, p. 5004-5007, Dec. 4, 2000
- [44] McKenna, et al: Spacecraft measurements of ions and electrons (> 40 keV) near and far upstream of the Earth's bow shock, *Adv. Space Res.*, 2002 (v tlači)
- [45] Mendoza, B., and R. Ramirez: Cosmic rays, total cloud cover and terrestrial temperature, *Proc. ICRC, 2001, Hamburg*, Copernicus Gessellschaft, p. 4177-4180, 2001
- [46] Mewaldt, R.A., A.C. Cummings, E.C. Stone: Anomalous Cosmic Rays: Interstellar Interlopers in

- the Heliopause and Magnetosphere, in *From the Sun, Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, Ed. S.T. Suess, B.T. Tsurutani, American Geophysical Union, DC, p. 123-132, 1998
- [47] Moulder, J.E., <http://www.mcw.edu/gcrc/cop/powerlines-cancer-FAQ/toc.html>
- [48] Moulder, J.E., Radiation and us, <http://www.umich.edu/~radinfo/introduction/radrus.html>
- [49] McAulay, I.R., et al.: Exposure of air crew to cosmic radiation, a report of EURAFOS Working group 11 „The radiation exposure and monitoring of air crew“, Office for official publications of the European Communities, pp. 77, Luxembourg, 1996
- [50] O’Brien, K., W. Friedberg, D.F. Smart, and H.H. Sauer: The atmospheric, cosmic and Solar energetic Particle Radiation Environment at Aircraft Altitudes, *Adv. Space Res.*, 21, p. 1739/1748, 1998
- [51] Olsen, J., et al.: Neutron-induced single event upsets in static RAMS observed at 10 km altitude, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 43(2), p. 74-77, 1993
- [52] Pugacheva G.I. et al.: New evidence of space weather impact on weather and climate in southern hemisphere, *Proc. ICRC, 2001, Hamburg*, Copernicus Gessellschaft, p. 4153-4156, 2001
- [53] Reitz, G.: Biological Effects of Space Radiation, *ESA WPP-155*, p. 53-60, 1999
- [54] Shea, M. A., and D.F. Smart: Space Weather: The effects on operations in Space, *Adv. Space Res.*, Vol. 22, No 1, p. 29-38, 1998
- [55] Shea, M.A., and D.F. Smart: Cosmic ray implications for human health, *Space Sci. Rev.*, 93, p. 187-206, 2000
- [56] Space Studies Board: Radiation Hazards to Crews of Interplanetary Missions: Biological Issues and Research Strategies, National Res. Council, National Academy Press, Washington, USA, 1996
- [57] Spurný, F., and Ts. Dachev: Intense Solar Flare Measurements, April 15, 2001, *Radiat. Prot. Dosim.*, 95, p. 273-275, 2001
- [58] Storini, M., M.A. Shea, and D.F. Smart: Solar corpuscular radiation and its relation to the atmospheric ozone issue, in *Proc. Third SOLTIP Symp.*, eds. X.S. Feng, F.S. Wei and M. Dryer, p. 505-512, Int. Academic Publishers, Beijing, 1998
- [59] Storini, M.: Geomagnetic Storm Effects on the Earth's ozone layer, *Adv. Space Res.*, No 12, p. 1965-1974, 2001
- [60] Storini, M.: Galactic Cosmic Rays for Solar-Terrestrial Physics, *Il Nuovo Cimento*, 20C, p. 871-880, 1997
- [61] Stozhkov, Z.I., V.I. Ermakov, and V.S. Makhmudov: Cosmic rays and atmospheric processes, *Proc. ICRC, 2001, Hamburg*, Copernicus Gessellschaft, p. 4157-4160, 2001
- [62] Svensmark, H., and E. Friis-Christensen: Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 59, No 11, p. 1225-1232, 1997
- [63] Svensmark, H.: Influence of cosmic rays on Earth's climate, *Phys. Rev. Lett.*, 81, p. 5027-5030, 1998
- [64] Tinsley, B.A., G.M. Brown, and P.H. Scherer: Solar variability influences on weather and climate: possible connections through cosmic-ray fluxes and storm intensifications, *J. Geophys. Res.*, 94, p. 14783-14792, 1989
- [65] Tinsley, B.A., and R.A. Heelis: Correlations of atmospheric dynamics with solar activity: evidence for a connection via the solar wind, atmospheric electricity and cloud microphysics, *J. Geophys. Res.*, 98, p. 10375-10384, 1993
- [66] Tinsley, B.A., and G.W. Dean: Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds?, *J. Geophys. Res.*, 96, p. 22283-22296, 1991
- [67] Todd, M.C., and D.R. Kniveton: Changes in cloud cover associated with Forbush decreases in galactic cosmic rays, *J. Geophys. Res.*, 106 (D23), p. 32031-32042, 2001
- [68] Triska, P., personal communication, 2000
- [69] Tylka, A.J., et al.: CREME96: A revision of the cosmic ray effects on microelectronics code, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 44, N.6, p. 2120-2130, 1997a
- [70] Tylka, A.J., et al.: Probability distribution of high-energy solar heavy ion fluxes from IMP-8, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 44, N.6, p. 2140-2149, 1997b
- [71] Vampola, A.L.: The Aerospace Environment at High Altitudes and its Implications for Spacecraft Charging and Communications, *J. Electrostat.*, 20, p. 21-26, 1987
- [72] Zuccon, P.: <http://ams.cern.ch/AMS/Analysis/hpl3itp1/psfiles/P.ZucconMar01.pdf>
- [73] <http://crsp3.nrl.navy.mil/creme96/>
- [74] <http://jag.cami.jccbi.gov>
- [75] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/magnetos/radbelt.html>
- [76] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/sun/jpl.html>
- [77] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/sun/solpro.html>
- [78] <http://sat-nd.com/failures/index.html>
- [79] <http://spaceweather.com>
- [80] <http://spenvis.oma.be>
- [81] <http://www.cami.jccbi.gov/aam-600/610/600radio.html>
- [82] <http://www.estec.esa.nl/wmwww/spweather>
- [83] <http://www.hps.org/publicinformation/ate>
- [84] <http://www.irf.lu.se>
- [85] <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GOES>
- [86] <http://www.nwra.com/space.html>
- [87] http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/ring_current.html
- [88] <http://www.umich.edu/~radinfo/introduction/radrus.html>
- [89] <http://www-istp.fsfc.nasa.gov/istp/outreach/care.html>
- [90] <http://neutronmonitor.ta3.sk>

[91] McIlwain, C.E.: Magnetic coordinates, *Space Sci. Rev.*, 5, p. 585-598, 1966

BIOGRAPHY.

Karel Kudela (doc,ing,DrSc), born in 1946. Graduated at Faculty of Nuclear Physics and Engineering, Czech Technical University Prague in 1969, defended his CSc, DrSc and habilitation at UPJS Kosice (1977), at UK Bratislava in 1991 and 1994, respectively. Working at IEP SAS in Space Physics, analyzing satellite and ground based data of energetic particles in space. PI, Co-PI or Co-I of several energetic particle measurements in space as well as of neutron monitor at Lomnický štít. Lectures at TU and UPJŠ Košice.