

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

A. Ondrášková; S. Ševčík; L. Rosenberg; P. Kostecký
Schumannove rezonance - Elektromagnetické “zvonenie” Zeme (2. část:
Merania a interpretácia)

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 53 (2008), No. 3, 211--230

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141713>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2008

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Schumannove rezonancie

Elektromagnetické „zvonenie“ Zeme

(2. časť: Merania a interpretácia)

Adriena Ondrášková, Sebastián Ševčík, Ladislav Rosenberg, Pavel Kostecký, Bratislava

V tejto časti článku bližšie ozrejníme problematiku zachytenia a sledovania (monitoringu) signálov Schumannových rezonancií (SchR), ich vlastností a postupov ďalšieho spracovania. Bude popísaná aparátúra k tomu potrebná a požiadavky na ňu kladené. Uvedieme aj skúsenosti z viacročného sledovania signálov SchR na Astronomickom a geofyzikálnom observatóriu (AGO) FMFI UK v Modre. Zaznamenané signály sú spracovávané metódou spektrálnej analýzy, čo umožňuje sledovať dlhodobé variácie hlavných parametrov vlastných módov SchR. V prípade tranzientných javov záznamy a ich analýza dovoľujú presnejšie určiť momentálne charakteristiky rezonátora Zem-ionosféra. V súčasnosti je veľká pozornosť venovaná spojitosti tranzientných javov v pásme ELF a analogických optických javov vo vysokej atmosfére (tzv. TLEs – Transient Luminous Events). Pre detekciu tranzientných javov sa v súčasnosti začína efektívne využívať časovo-frekvenčná analýza na báze waveletov.

Význam SchR pre geofyziku a príbuzné obory prediskutujeme v závere vrátane zatiaľ otvorených otázok. Stručne budú popísané najnovšie výsledky týkajúce sa existencie javu SchR na iných telesách v Slnčnej sústave.

1. Meracia aparátúra, metódy detekcie a vybrané výsledky meraní

a) Charakteristické priebehy signálov

V časovom priebehu signálov prirodzeného pôvodu v pásme ELF (pripomeňme tento akronym: ELF = **E**xtrremely **L**ow **F**requencies) sa vyskytujú tri charakteristické zložky:

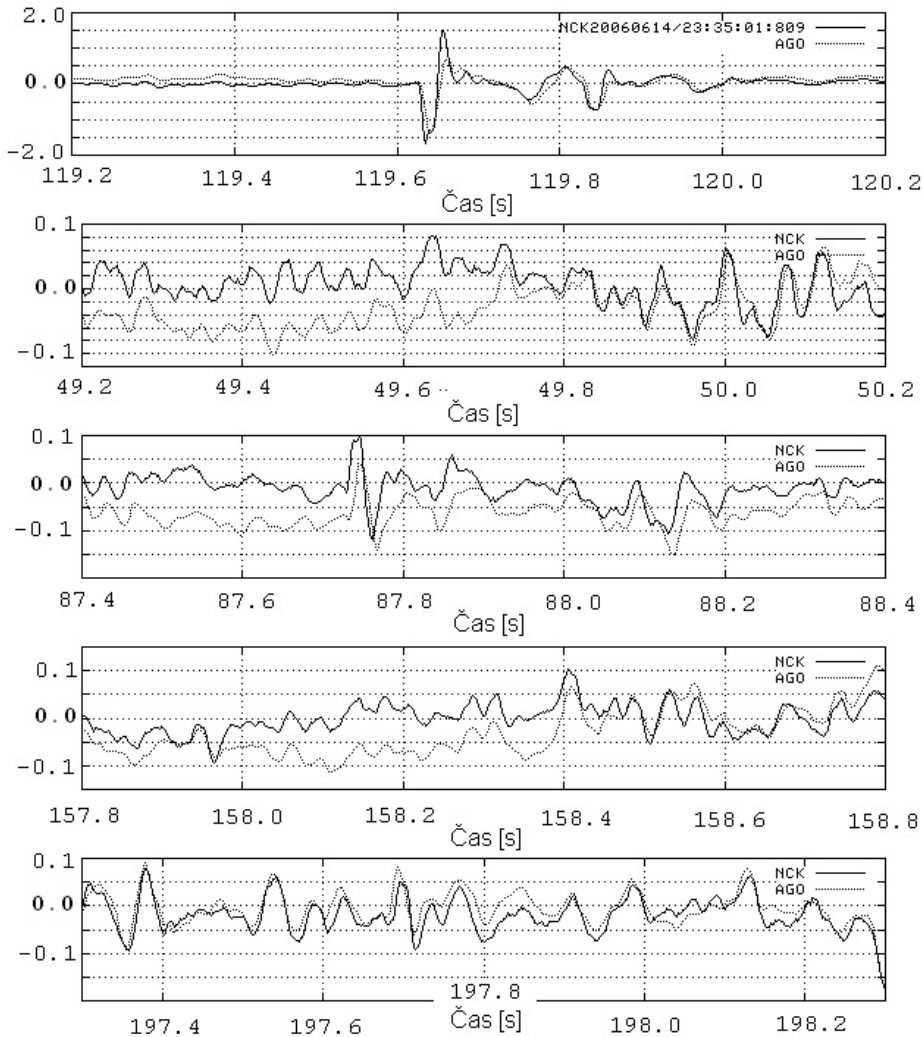
a) Tzv. „schumannovské pozadie“ – súvislý „šumu podobný“ signál, vzniknutý superpozíciou odoziev rezonátora na veľké množstvo nekoherentných výbojov, náhodne rozložených v priestore a čase (v celoplanetárnom rozsahu je frekvencia bleskových výbojov okolo 100–200 za sekundu) – [1]. Napriek zdanlivej náhodnosti toto „schumannovské pozadie“ zaznamenané na rôznych stanovištiach môže mať vysoký stupeň

RNDr. ADRIENA ONDRÁŠKOVÁ, PhD., Doc. RNDr. SEBASTIÁN ŠEVČÍK, CSc., RNDr. Ing. PAVEL KOSTECKÝ, CSc., Univerzita Komenského, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, Mlynská dolina F-1, 842 48 Bratislava, e-mail: ondraskova@fmph.uniba.sk, Pavel.Kostecky@fmph.uniba.sk

RNDr. LADISLAV ROSENBERG, PhD., QBSW, a. s., Prievozská 6, 821 09 Bratislava.

Za podporu tohto výskumu vďačíme Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR a SAV (VEGA), granty č. 1/9167/02, 1/2033/05 a 1/0521/08.

korelácie (ako sa na globálny jav „patrí“), pokiaľ lokálne meteorologické podmienky výrazne neovplyvnia signál. Obr. 1 ukazuje viaceré jednosekundové úseky záznamu signálu vertikálnej elektrickej zložky poľa z observatória FMFI UK pri Modre (AGO) a zo Széchenyi István Geophysical Observatory, Geodetical and Geophysical Institute of Hungarian Academy of Sciences v Nagycenku v Maďarsku. Priama vzdialenosť miest merania je 92 km.

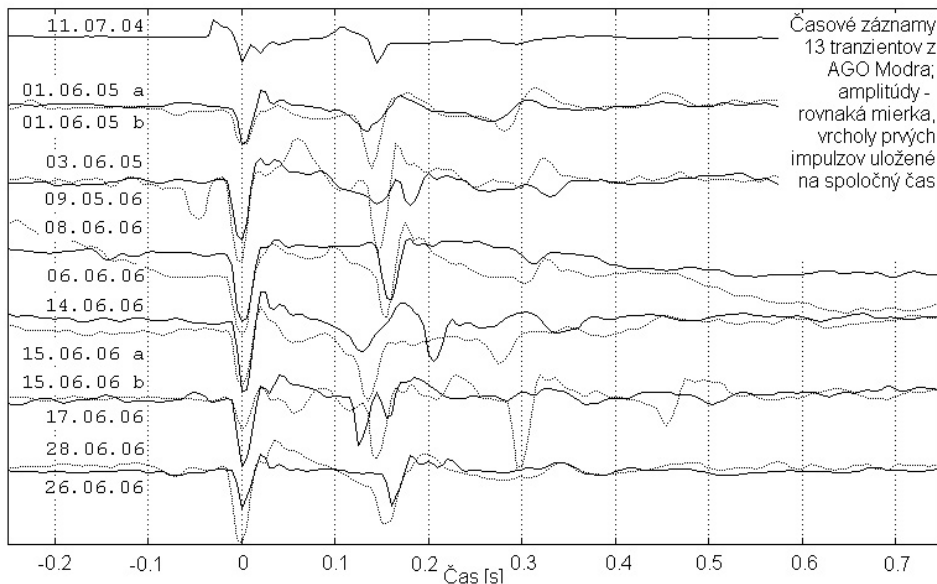


Obr. 1. Príklad typických časových priebehov signálov elektrickej zložky SchR, zaznamenaných 14.6.2006 o 23:35 UT na AGO Modra (bodkovaná čiara) a v Nagycenku, Maďarsko (plná čiara). Jednotlivé úseky majú dĺžku 1 sekunda, vertikálna os je škálovaná v amplitúde signálu na výstupe zosilňovača (vo voltach). Prvý graf odhora zachycuje tranzientný jav (popíšeme ďalej), druhý a tretí graf ukazujú signál bezprostredne pred tranzientom, štvrtý a piaty – bezprostredne za ním. Vertikálna mierka na prvom grafe je odlišná od spodných grafov (amplitúda tranzientného javu výrazne – o rád – prevyšuje priemernú amplitúdu pozadia).

Napriek vysokému stupňu korelácie zhoda nie je úplná – čiastočne pre lokálne efekty, ale najmä pre isté rozdiely vo frekvenčných charakteristikách prijímacích traktov na oboch staniách.

b) „Záblesky“ („*flashes*“) – výrazné krátke pulzy, s amplitúdou zvyčajne najmenej o rád prevyšujúcou strednú amplitúdu „schumannovského pozadia“. Väčšinou krátkodobovo saturujú prijímací trakt, analýza nedáva použiteľné výsledky. Ich zdrojom bývajú bleskové výboje v relatívnej blízkosti prijímača (< 300–500 km).

c) „Tranzienty“ (tzv. *Q-bursty*: označenie zaviedol prof. Ogawa ako **Q**uiet-burst) predstavujú najzaujímavejší typ (obr. 2). Na tomto grafe sú viaceré tranzienty (*Q-bursty*) zachytené na AGO Modra.



Obr. 2. Záznamy časových priebehov niekoľkých tranzientov z AGO Modra. Typické časové oneskorenie druhého pulzu okolo 0.15 s zodpovedá jednému obehu čela vlny okolo Zeme (pri rešpektovaní zníženej fázovej rýchlosti vlny vo vrstvách ionosféry).

Typické *Q-bursty* predstavujú krátke (10–20 ms) pulzy (prevažujú pulzy počínajúce negatívnou polaritou, ale vyskytujú sa v menšom počte aj opačne), veľmi často v dvojiciach s časovým odstupom 0.13–0.16 sekundy, čo odpovedá jednému obehu čela elektromagnetickej vlny okolo Zeme. Pri širšom pásme prijímacieho traktu, až okolo 1 kHz, a rýchlejšom vzorkovaní vykazujú zložky *Q-burstov* často „jemnú štruktúru“ [2]. Amplitúda pulzov 3 ÷ 5-krát prevyšuje strednú amplitúdu schumannovského pozadia. Na tyle prvého pulzu sa často pozorujú tlmené kmity okolo 8 Hz (na frekvencii základného módu SR, označované ako „ringing“ – „zvonenie“) – viď ďalej obr. 3.

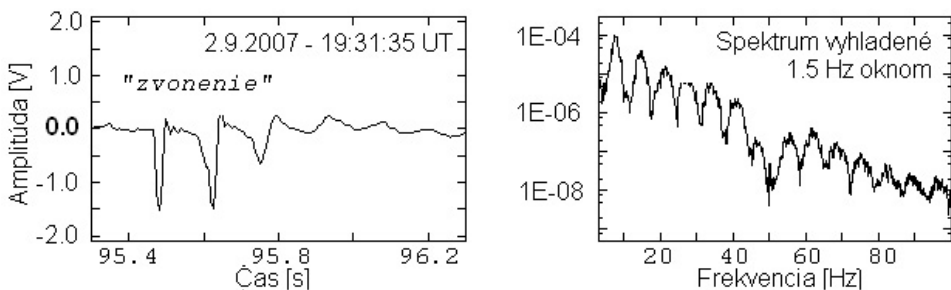
Ak vzdialenosť pozorovacích miest už nie je zanedbateľná voči vlnovej dĺžke prislúchajúcej schumannovským módom, potom sú príspevky jednotlivých módov do výsledného signálu v bodoch pozorovania výrazne odlišné. Charakteristické rozloženia

polí jednotlivých vlastných módov („angular patterns“) budených tým istým zdrojom dávajú odlišné hodnoty amplitúd v odlišných miestach pozorovania. Navyše, ak berieme do úvahy priestorovú a časovú chaotičnosť jednotlivých výbojov (zdrojov), sumárne rozloženie poľa sa neustále akoby „mihá“ („trasie“, ako v kaleidoskope). Preto je korelácia pozadí na vzdialenosť ~ 100 km takmer úplná, na vzdialenosť ~ 2700 km už nie. Naproti tomu tranzient, vybudovaný izolovaným zdrojom, je zreteľne zachytený vo všetkých prípadoch.

U „klasických“ Q-burstov má „sekundárny“ bipolárny pulz („spike“) zreteľne nižšiu amplitúdu ako dôsledok šírenia okolo celej Zeme. Útlm šírenia priečných vln v pásme ELF je veľmi nízky – [3] uvádza hodnoty okolo $0.2 \div 0.25$ dB na 1000 km pri frekvencii 10 Hz. Preto býva amplitúda sekundárneho pulzu okolo 30 % primárneho. Časový priebeh sekundárneho pulzu vykazuje rozšírenie vďaka *frekvenčnej disperzii* pri šírení.

Napriek tomu sa vyskytujú tranzienty, v ktorých tieto príznaky absentujú a sekundárny pulz vyzerá ako „takmer dokonalá kópia“ primárneho. Predpokladalo sa, že ide o prejav dvoch samostatných výbojov, až v roku 1998 upozornil E. W. Huang v nepublikovanej dizertácii [4] (str. 101) na fakt, že početnosť takýchto tranzientných javov v závislosti na *časovom oneskorení* medzi obidvomi pulzami (zložkami tranzientu), čiže „*interpulse interval*“, vykazuje *výrazné maximum* pre hodnoty 0.13–0.16 sekundy, ktoré sa vymyká z náhodného rozdelenia. Jeho práca nevyvolala pozornosť, ale pri štatistickom spracovaní tranzientných javov zaznamenaných v období 2004–2007 na observatóriu AGO v Modre bola prevalencia uvedených hodnôt časového oneskorenia (štatisticky výrazne signifikantná) potvrdená (viď práce [5] a [6]). O jednom z možných fyzikálnych vysvetlení budeme hovoriť neskôr.

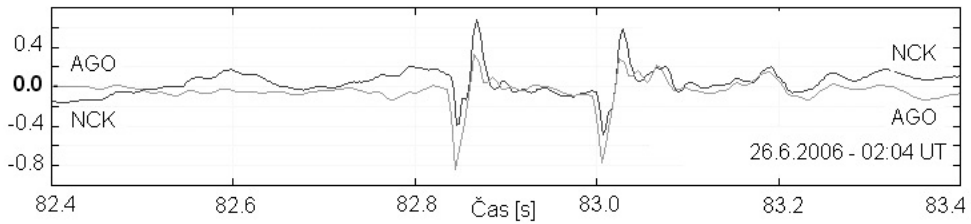
Zaujímavý príklad vidíme na obr. 3, ktorý predstavuje „trojitý“ tranzient zachytený na AGO Modra 2. 9. 2007. Na tyloch prvého aj druhého bipolárneho impulzu zreteľne vidieť „zvonenie“. Štruktúra spektra viditeľne obsahuje vlastné módy SchR až do rádu $n = 14$.



Obr. 3. Zriedkavejší prípad „viacnásobného“ tranzientu zachytený na AGO Modra. Ľavý graf – časový priebeh (intervaly medzi po sebe nasledujúcimi impulzami sú 0.16 s), graf vpravo – amplitúdové spektrum (vyrovnané klzavým priemerom z 25 spektrálnych koeficientov) od 5 do 100 Hz.

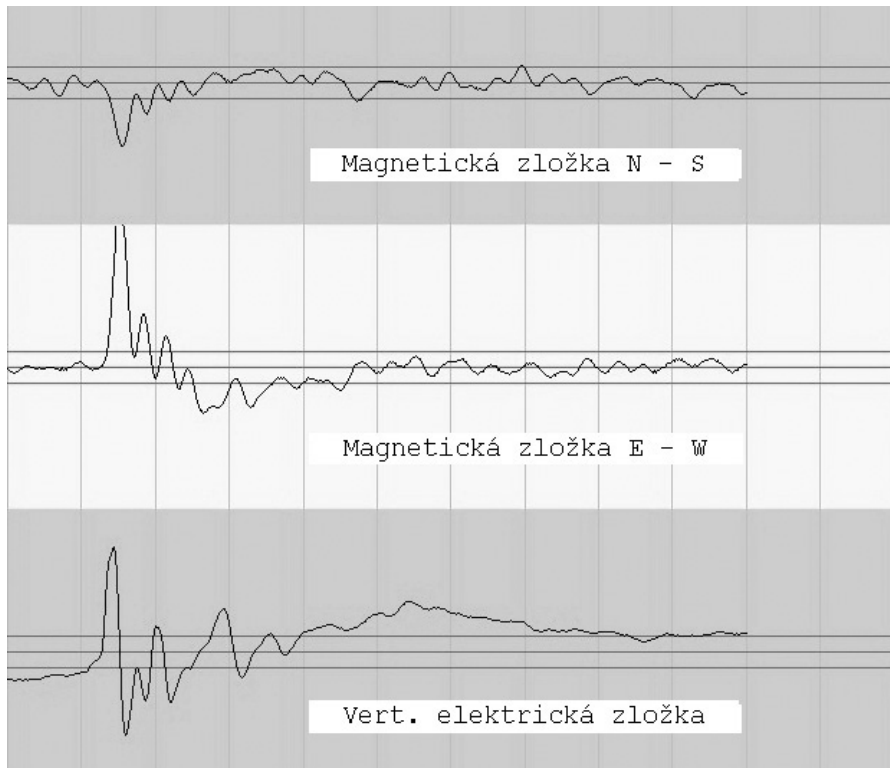
Na obr. 4 máme príklad tranzientného javu tejto triedy, ktorý bol zachytený súčasne v Modre aj v Nagycenku. Jeho zdroj (mohutný izolovaný výboj) sa nachádzal vo

vzdialenosti ~ 4700 km od nás, pri východnom pobreží Grónska, ako vyplynulo z analýzy časových priebehov všetkých troch zložiek poľa zachytených na observatóriu v Nagycenku.



Obr. 4. Tranzient z 26. 6. 2006 o 02:04:48.7 UT zaznamenaný súčasne na AGO Modra a na observatóriu Nagycenk (NCK). Oproti hornému grafu na obr. 1 stojí za pozornosť absencia tlmenia a frekvenčnej disperzie sekundárnej zložky (pulzu). Zvislá os je škálovaná vo voltoch na výstupe zesilňovača.

Ako ďalšiu ukážku máme na obr. 5 záznam všetkých troch zložiek poľa iného tranzientu (z 3. 1. 2007, 07:20:28 UT) z observatória Nagycenk v Maďarsku.



Obr. 5. Záznam všetkých troch zložiek poľa pre tranzient z 3.1.2007, 07:20:28 UT, zachytený na observatóriu Nagycenk. Dieliky na časovej osi sú po 62.5 ms.

Zdrojmi Q-burstov sú sólové mimoriadne silné bleskové výboje, často nad morskou hladinou, kde je ináč búrková aktivita dlhodobo slabšia oproti pevninám. Súčasným meraním všetkých troch zložiek poľa je možné určením Poyntingovho vektora zistiť smer (azimut) zdroja a metódou vlnovej impedancie [7] približnú vzdialenosť s presnosťou na stovky km.

Ako vyplýva z vyjadrenia amplitúd vertikálneho elektrického poľa E_r a horizontálneho magnetického poľa (jeho azimutálnej zložky) H_φ – [8], str. 18 a 130 – v ideálnom rezonátore je uhlová závislosť amplitúdy zložky E_r daná Legendreovou funkciou $P_{n,m}(\theta)$, kde θ je sférický uhol medzi bodmi zdroja a pozorovateľa, zatiaľ čo pre amplitúdu zložky H_φ je táto závislosť určená prvou deriváciou $[\delta(P_{n,m}(\theta))/\delta\theta]$. Podiel týchto amplitúd (E_r/H_φ) vykazuje preto charakteristickú kváziperiodickú závislosť na uhle θ , čiže na vzdialenosti zdroj–pozorovateľ, a to odlišnú pre jednotlivé módy podľa rádu n . Ak sa podarí dostatočne presne v spektre tranzientu odlišiť príspevky jednotlivých módov – čo nebýva jednoduché – potom je možné určiť približnú vzdialenosť zdroja.

Keďže tranzienty sú odozvou rezonátora na jeden samostatný výboj (na rozdiel od „schumannovského pozadia“), štúdiom najmä ich krátkodobých spektier je možné usudzovať na vlastnosti rezonátora Zem–ionosféra, čiže vlastne približne riešiť *obrátenú úlohu* elektromagnetizmu.

V posledných rokoch je predmetom intenzívneho výskumu spojitosť týchto elektromagnetických tranzientov s tzv. TLEs (*Transient Luminous Events*) – [9], [10], [11] – čo sú výboje v optickej oblasti vznikajúce vo vysokej atmosfére vo výškach $\sim 40\text{--}70$ km.

b) Experimentálne vybavenie

Schumannove rezonancie sú *longitudinálne*, čiže vlastné módy sú výsledkom konštruktívnej interferencie vln „bežiacich“ *pozdĺž povrchu Zeme*. Ako bolo uvedené v 1. časti článku (v predchádzajúcom čísle tohto časopisu), v poli SchR sú dominantné (aspoň tesne pri zemskom povrchu, čo je náš prípad) *vertikálna (radiálna) elektrická a horizontálna magnetická zložka*. Aparatúra pre ich registráciu je nevyhnutne podstatne odlišná, ako popíšeme ďalej.

Na konci 1. časti článku bola uvedená veľmi nízka *hustota výkonu* elektromagnetického poľa vyvolávaného bleskovými výbojmi (v priemere okolo 10 mW km^{-3} v celej šírke spektra!). Spôsobuje to obrovský objem rezonátora Zem – ionosféra ($\sim 4 \cdot 10^{10}\text{ km}^3$), navyše z celého spektra elektromagnetického žiarenia bleskových výbojov pripadá maximum hustoty energie na frekvenčné pásmo rádu $10 \div 100$ kHz (známe „praskanie“ pri príjme dlhovlnných a stredovlnných rozhlasových staníc počas blízkej búrky) a iba nepatrná časť energie pripadá na pásmo ELF.

To podmieňuje mimoriadne nízku intenzitu polí vlastných módov SchR:

- *intenzita elektrického poľa* $\sim 10^{-7}\text{ V m}^{-1}$;
- *magnetická indukcia* $\sim 10^{-13}\text{ T}$ (0.1 pT , čo je o *8 rádov* (!) nižšie ako priemerná indukcia geomagnetického poľa).

Moderná elektronika dokáže spracovať nepatrné napätia dodávané anténami pre príjem SchR bez zásadných problémov. Vo frekvenčnom pásme SchR ($\sim 5 \div 100$ Hz) sa ale vyskytujú silné rušenia lokálneho, hlavne technogénneho charakteru, napr. verejná elektrovodná sieť 50 Hz, niektoré elektrifikované železnice (rakúske ÖBB, na

niektorých úsekoch aj nemecké DB) používajú trakčnú frekvenciu 16.67 (50/3) Hz, aj iné. Potlačenie týchto rušivých signálov často vyžaduje podstatne väčšie úsilie ako zabezpečenie príjmu z hľadiska intenzity signálov.

V ďalšej časti stručne popíšeme zariadenia používané na príjem signálov SchR.

b1) Elektrická zložka poľa

Prijímacia anténa musí tvoriť *kapacitu* voči povrchu Zeme. V časovo premennom elektrickom poli vzniká na tejto kapacite *elektrické napätie*, ktoré možno snímať a ďalej spracovávať – zosilňovať, filtrovať, digitalizovať a uložiť na pamäťové médium.

V začiatkoch výskumu SchR používané *dlhé horizontálne antény* – izolovaný vodič (100 ÷ 150 m dĺžky) natiahnutý približne vodorovne 15 ÷ 20 m nad terénom – sú výhodnejšie z hľadiska izolačného odporu. Sú však konštrukčne (aj priestorovo) náročné a majú zásadný nedostatok – prakticky nemožno u nich vylúčiť mechanické vibrácie. V blízkosti povrchu Zeme existuje totiž *kvázistatické elektrické pole* („fair-weather field“ – viď [12], [13]) pomerne značnej intenzity (cca 100 ÷ 300 V m⁻¹). Aj slabé vibrácie „aktívnej elektródy“ s frekvenciou rádu Hz generujú falošný signál, ktorý úplne „prehluší“ užitočný signál SchR. Rovnaké poruchy vyvolávajú aj vibrácie predmetov – hoci iba čiastočne elektricky vodivých – v blízkosti antény (vegetácia!). Preto antény treba situovať na širokom otvorenom priestranstve, ak je to možné.

Výhodnejšia sa ukázala koncepcia tzv. „*ball antenna*“. Aktívnou elektródou je v tomto prípade *vodivé teleso* o rozmere cca 0.5 ÷ 1 m, izolovane upevnené vo výške 3 ÷ 6 m nad terénom. Antény tohto typu poskytujú oproti dlhodrotovým slabší signál, ťažšie sa zabezpečuje vysoká izolačná rezistencia aktívnej elektródy voči zemi, ale oveľa jednoduchšie možno potlačiť mechanické vibrácie.

Tak ako vždy v experimentálnej fyzike – princíp jednoduchý, realizácia nie. Prakticky dosiahnuteľné hodnoty kapacity (dané únosnými rozmermi antén) sú limitované rádom ~ 100 pF. Zdvíhanie „aktívnej elektródy“ antény má obmedzený účinok – súčin intenzity poľa a výšky stúpa, kapacita však klesá. Anténa sa správa ako zdroj s vnútornou impedanciou prevažne kapacitného charakteru. Zoberúc do úvahy pracovné frekvencie (dolný okraj pásma okolo 5 Hz), dostaneme kategorickú požiadavku na celkový ohmický odpor (rezistanciu) medzi elektródami „kondenzátora“, ktorý predstavuje dvojica anténa – zem, a to minimálne rádovo ~ 100 MΩ (čím viac, tým lepšie). Do tejto hodnoty sa musí „zmestiť“ nielen vstupný odpor pripojeného zosilňovača a odpor kábla na jeho vstupe, ale aj izolačný odpor upevnenia aktívnej elektródy (stožiar), ktorý môže výrazne degradovať podľa meteorologických podmienok (dážď, vlhký sneh, námraza).

Na obr. 6 je anténa pre príjem elektrickej zložky poľa SchR na AGO v Modre.

Vo funkcii aktívnej elektródy dobre slúži hliníkový pivový sud, stožiar je kombinovaný z dvoch vyradených keramických vysokonapäťových izolátorov a dvoch blokov plastu Ertalon (s vysokým objemovým aj povrchovým izolačným odporom – obvodovo drážkované pre predĺženie zvodových ciest).

Vodivé teleso kapacitnej antény tvorí spolu s uzemňovacími doskami zakopanými v pôde pod základňou antény kondenzátor s kapacitou ~ 50–100 pF, na ktorom



Obr. 6. Anténa kapacitného typu („ball antenna“) pre snímanie vertikálnej elektrickej zložky poľa v pásme Schumannových rezonancií na AGO Modra. Výška stožiara antény je 5.5 m, tesne pri báze antény je umiestnená skrinka pre zosilňovač, napájacie a signálové privody sú uložené pod zemou a vedú na vzdialenosť asi 150 m.

vznikne účinkom striedavého vertikálneho elektrického poľa napätie rádu 10^{-6} – 10^{-7} voltu, ktoré zosilníme na úroveň jednotiek voltov, následne filtrujeme, digitalizujeme a zaznamenávame na pamäťové médium (harddisk).

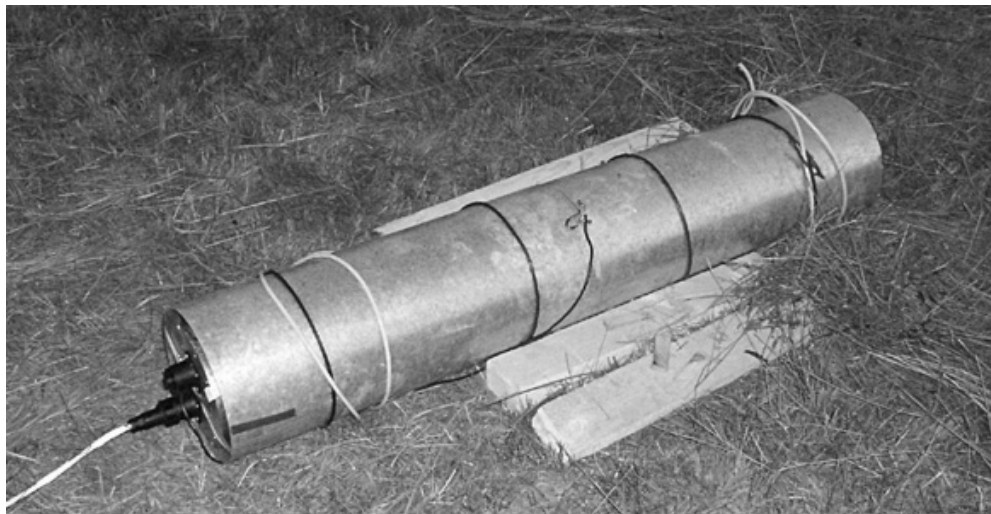
b2) Magnetické zložky poľa

Horizontálna magnetická zložka poľa SchR má odlišný (a vopred neznámy a časovo premenný) smer v rôznych bodoch na povrchu Zeme, preto na registráciu poľa SchR musí byť použitá *ortogonálna dvojica senzorov*, tradične pre smer N–S a E–W.

Senzory magnetického poľa pre snímanie poľa SchR pracujú na základe *Faradayovho indukčného zákona*. Zvyčajne sa používajú tzv. „search coils“, čiže cievky s veľkým počtom závitov. Sú to buď *vzduchové cievky* (vlastne „rámové antény“ s niekoľko tisíci závitmi, ale veľkého prierezu $\sim 1 \div 2 \text{ m}^2$), alebo častejšie cievky menšieho prierezu s podstatne vyšším počtom závitov (rádovo státisíce) na otvorených ferromagnetických jadrách. Na obr. 7 vidíme magnetický snímač používaný na observatóriu v Modre pri skúškach v teréne (v ochrannom a elektrostaticky tieniacom valcovom kryte, kde je v bezprostrednej blízkosti snímača uložený citlivý predzosilňovač), obr. 8 ukazuje snímač otvorený počas montáže.

Napätie indukované poľom SchR do vinutia snímača (spravidla rádu 10^{-7} voltu) spracúva citlivý predzosilňovač, zvyčajne so symetrickým vstupom.

Žiada sa doplniť, že spoľahlivé zachytenie (registrácia) signálov Schumannových rezonancií je v možnostiach aj vyspelejších rádioamatérov, ak je pozorovacie miesto



Obr. 7. Magnetický snímač typu „search-coil“ v ochrannom a tieniacom kryte (elektrostatické tienenie) pri skúškach v teréne na AGO Modra. Vnútri ľavej strany krytu je umiestnený predzosilňovač.

v oblasti dostatočne elektromagneticky „kľudnej“, tj. mimo veľkoplošnej zástavby, priemyselných areálov apod. V USA, Taliansku, Japonsku aj inde pracujú „Schumannovské rádioamatérske kluby“, ktorých pozorovania sú taktiež cenné. Kompletné vybavenie pre registráciu na AGO FMFI UK v Modre bolo – vzhľadom na obmedzené finančné prostriedky – tiež realizované iba vlastnými silami riešiteľského kolektívu a pracovníkov observatória za pomoci mechanických dielní fakulty.

c) Spracovanie signálu

Zosilnený signál treba podrobiť najprv filtrácii *analógovej*, ktorá potlačí zložky nízko-frekvenčného šumu (\sim pod 4 Hz, kde prevládajú poruchy a širokopásmový šum) a odstráni pásmo nad 100 Hz (polovica vzorkovacej frekvencie – „anti-aliasing“ filter) a „vyreže“ úzke pásmo v okolí frekvencie 50 Hz (rušenie umelého pôvodu).

Takto ošetrovaný signál spracujeme analógovo-číslicovým prevodníkom s dostatočne jemným kvantovaním (aspoň 16 bit), prípadne použijeme aj filtráciu *digitálnu*, a uchováme pre ďalšie spracovanie – popis napr. v [14]. Vzorkovaciu frekvenciu treba voliť ako kompromis medzi registráciou jemných detailov v časovom priebehu signálu a objemom zaznamenávaných dát. Na observatóriu AGO používame 200 Hz, čo predstavuje hodnotu okolo dolnej hranice. Je vhodné mať možnosť vzorkovaciu frekvenciu dočasne meniť, pre identifikáciu prípadných falošných píkov vo frekvenčnom spektre.

d) Spektrálne charakteristiky

Ako bolo uvedené v 1. časti článku (obr. 3), pre interpretáciu meraní a analýzu Schumannových rezonancií je podstatné **frekvenčné spektrum** signálu. Zo záznamu časového priebehu v dĺžke minimálne 10–20 s (pre dostatočné frekvenčné rozlíšenie),

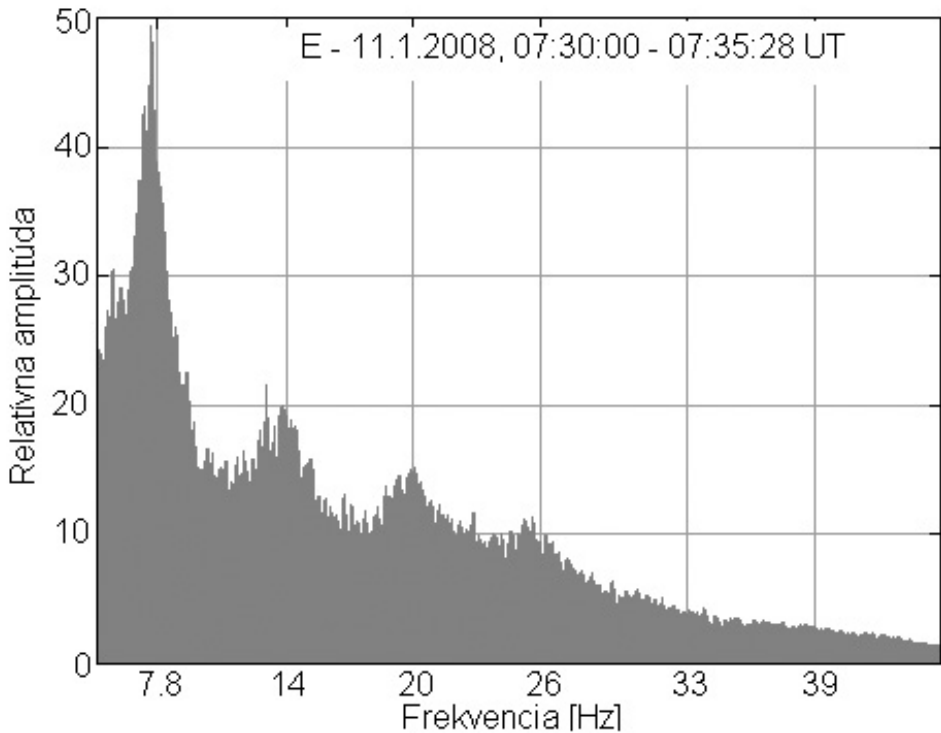


Obr. 8. Otvorený magnetický snímač z obr. 7 počas montáže, sú viditeľné jednotlivé sekcie vinutí (150 000 závitov v 6 sekciách).

prípadne dlhšieho, získame amplitúdové spektrum cez klasickú diskretnú Fourierovu transformáciu. Spektrum z dlhšieho záznamu vykazuje lepšie frekvenčné rozlíšenie a jednotlivé píky najnižších vlastných módov sa viac a viac „vynárajú“ zo šumu. Krásna ukážka je v [8], str. 223, obr. 6.2. Na druhej strane predlžovať záznam pre spektrálne spracovanie nad 15–20 minút už zlepšenie neprinesie, lebo *variácie spektra SchR* (bude o nich reč ďalej) už spektrálny obraz „rozmazávajú“.

Obr. 9 a 10 ukazujú dve amplitúdové spektrá (v rozsahu 5–45 Hz) zo záznamov elektrickej zložky poľa na AGO Modra, v trvaní 5.5 minúty (65536 vzoriek po 5 ms).

Spektrá *tranzientov* (ide o „krátkodobé“ spektrá, čiže „short-time spectra“ z úsekov v trvaní do 10 s) majú odlišný charakter (bez ohľadu na horšie frekvenčné rozlíšenie dané dĺžkou časového záznamu). Takéto javy sú analogické – ak sa vrátíme k nášmu príkladu z akustiky – vybudeniu zvona *jediným silným úderom* (impulzom) v určitom mieste. Odozva rezonátora vtedy odráža v prevažnej miere *charakteristiky rezonanč-*



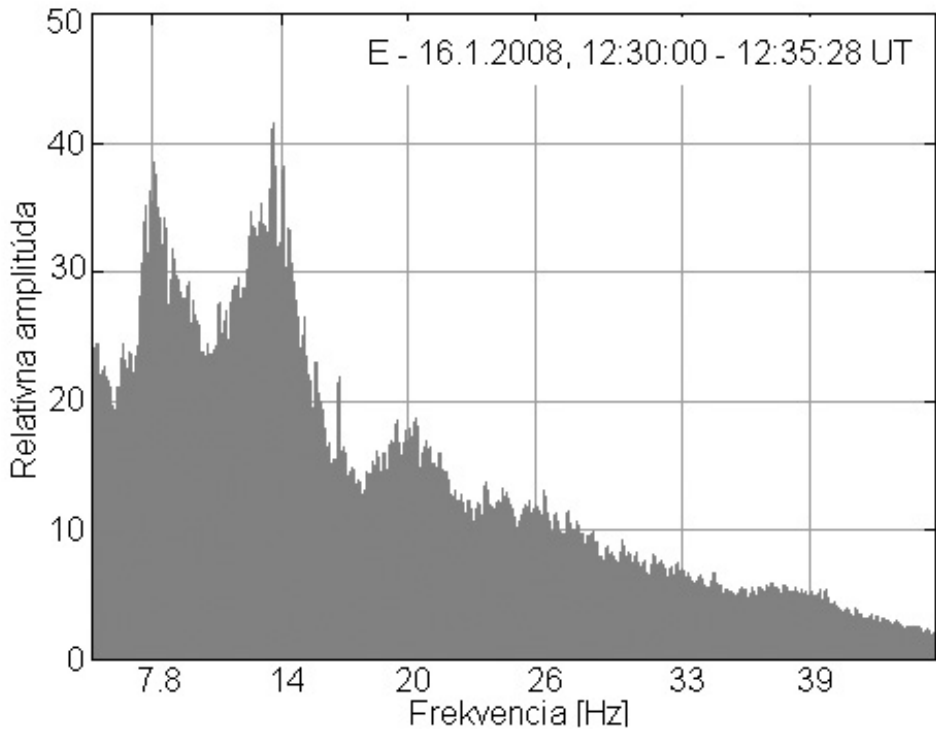
Obr. 9. Amplitúdové spektrum elektrickej zložky poľa v „štandardnej podobe“. Meranie na AGO 11.1.2008, záznam od 07:30:00 do 07:35:27 UT. Základný mód (okolo 7.8 Hz) zreteľne dominuje čo do amplitúdy, vyššie módy – počínajúc piatym okolo 33 Hz – sú pod úrovňou šumu.

ného systému ako takého na rozdiel od schumannovského pozadia, ktorého spektrálne charakteristiky odrážajú skôr *kumulované vlastnosti zdrojov*, teda globálnej búrkovej aktivity v danom čase.

V spektrách úsekov obsahujúcich tranzienty (napr. na obr. 11 hore) sa prejavujú vlastné módy až do 100 Hz (rád módu $n \sim 17-18$), zrejme aj vyššie. Z nameraných frekvencií vlastných módov v spektrách tranzientov z viacerých staníc možno približne rekonštruovať vodivostné charakteristiky spodnej ionosféry, čo vedie k riešeniu tzv. *obrátenej úlohy*. Ich analýzou možno odvodiť okamžité vlastnosti rezonátora presnejšie, inými slovami možno urobiť akúsi „*momentku*“ rezonančnej dutiny Zem–ionosféra s vyšším rozlíšením.

V spektrách schumannovského pozadia vlastné módy pre $n > 6-7$ ($f > 50$ Hz) zanikajú (obr. 11 – spodné spektrum), nakoľko ich frekvenciám zodpovedá vlnová dĺžka ~ 5000 km a menej, čo je už približne na úrovni rozmerov hlavných búrkových ohnísk. Chaotické nábehy fáz od príspevkov jednotlivých výbojov spôsobia „*sriemerovanie*“ ich príspevkov do výsledného spektra.

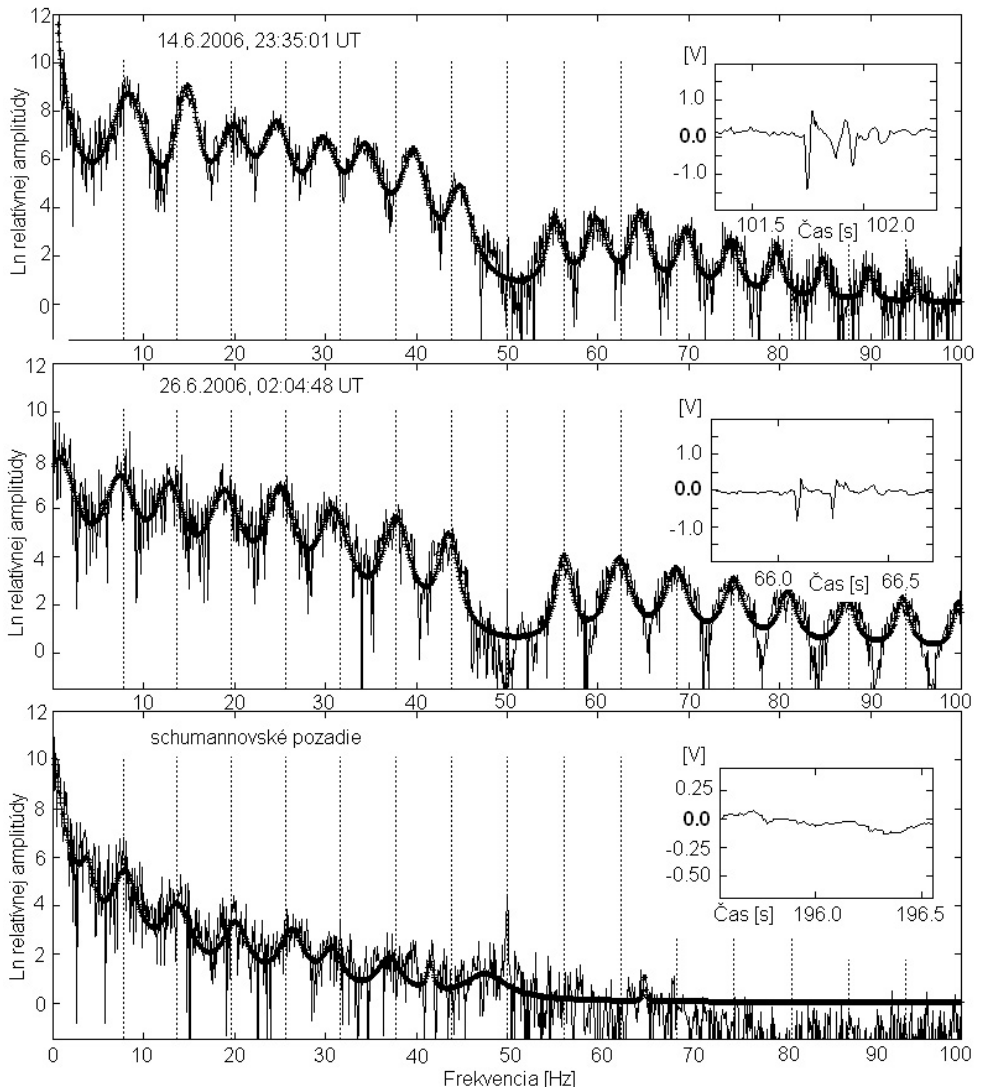
V prípadoch tranzientov, ktoré nevykazujú známky amplitúdového zoslabenia ani frekvenčnej disperzie v sekundárnej zložke a s intervalom medzi impulzami vyššie



Obr. 10. Príklad krátkodobej variácie spektra elektrickej zložky poľa SchR, zachytenej 16.1.2008, 12:30:00 – 12:35:27 UT na AGO. Druhý vlastný mód amplitúdou zreteľne prevyšuje prvý (základný). Nadväzujúce spektrá z 5.5-minútových intervalov tesne pred a po tomto intervale mali „štandardný“ charakter.

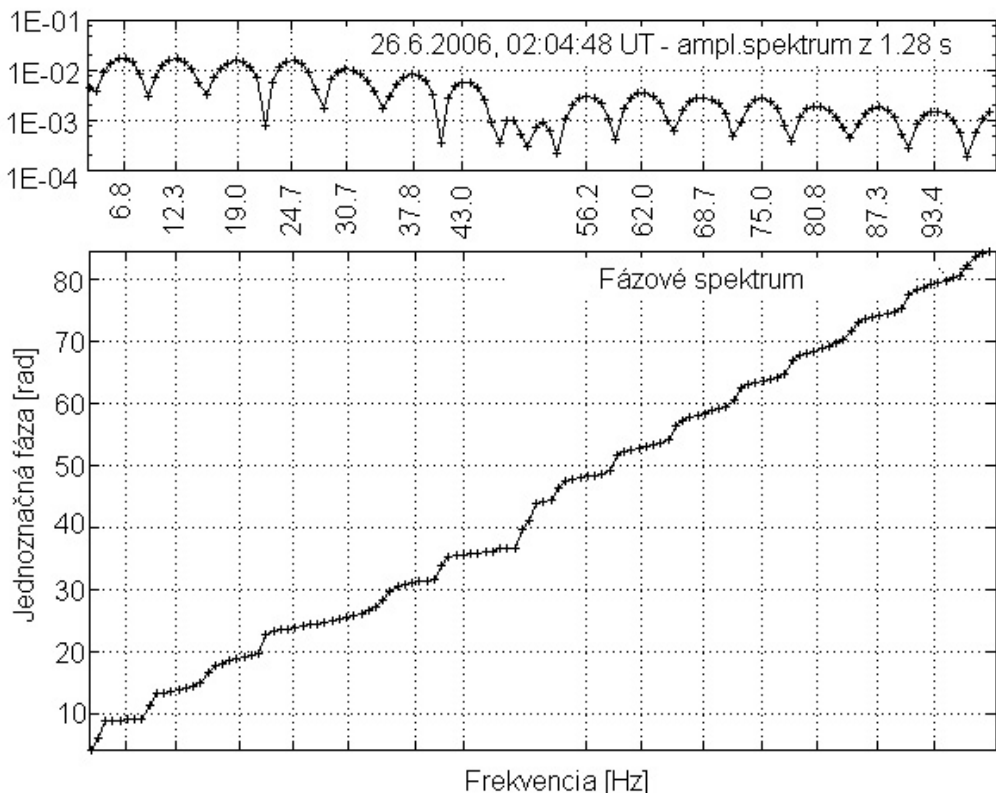
uvedených $0.13 \div 0.16$ s, o ktorých bola zmienka na začiatku v ods. 1a (viď napr. obr. 4.), je pre posúdenie vzájomnej koherencie zdrojov zložiek tranzientu podstatné *fázové spektrum*. Tieto tranzienty sme predbežne označili ako „nezvyčajné“. Obr. 12 ukazuje spektrum nezvyčajného tranzientu zachyteného na AGO Modra 26.6.2006 o 02:04:48 UT (je to časový priebeh z obr. 4). Spektrum bolo vypočítané z veľmi krátkeho (1.28 s) časového úseku. Horný graf predstavuje *amplitúdové spektrum* (malej časovej dĺžke úseku zodpovedá frekvenčné rozlíšenie iba 0.8 Hz). Zachycuje vlastné módy SchR až do rádu $n = 15$ (8. mód práve okolo 50 Hz je zdanlivo „prestrihnutý“ účinkom hore uvádzaných filtrov). Spodný graf ukazuje *fázové spektrum* bez vplyvu skokov funkcie arkustangens („unwrinkled phase“). Symetrické „platá“ okolo frekvencií vlastných módov svedčia o vysokom stupni koherencie zdrojov obidvoch zložiek tranzientu (podrobnejšie v práci [5]).

Jedným z možných vysvetlení genézy nezvyčajných tranzientov môže byť *vzájomná synchronizácia* výbojov. ELF vlna generovaná výbojom by principiálne mohla po jednom obehu celého rezonátora a určitej „autofokusácii“ v mieste zdroja či v jeho blízkom okolí *iniciovat výboj druhý* („triggering“). Z toho by vyplývalo, že oba atmosférické výboje sú „príbuzné“ a nie nezávislé. Analýza nezvyčajných tranzientov



Obr. 11. Trojica amplitúdových spektier z krátkych (10.24 s) časových úsekov (merania na AGO). Dva grafy odhora – spektrá úsekov obsahujúcich tranzienty: horný graf – tranzient z obr. 1, prostredný graf – tranzient z obr. 4, spodný graf – spektrum z 10.24 s časového úseku schumannovského pozadia. Jednosekundové časové výseky vidíme v malých rámečkoch napravo hore. Tenké čiary predstavujú „surové“ spektrá, hrubé čiary – výsledok fitovania sumou 17 funkcií lorentzovského typu. Zvislé bodkované čiary sú vypočítané vlastné frekvencie módov SchR na základe konkrétneho modelu ionosféry (výpočtový program bol vypracovaný a odladený na našej katedre). Zdanlivé „diery“ v spektrách okolo 50 Hz sú spôsobené filtermi v prijímacom trakte.

naozaj presvedčivo ukazuje, že obidve zložky (impulzy) sú stopami priestorovo veľmi blízkych výbojov. Otázkou ale zostáva amplitúda poľa potrebná k „spusteniu“ druhého synchronizovaného výboja. Napriek tomu existencia nezvyčajných tranzientov ako



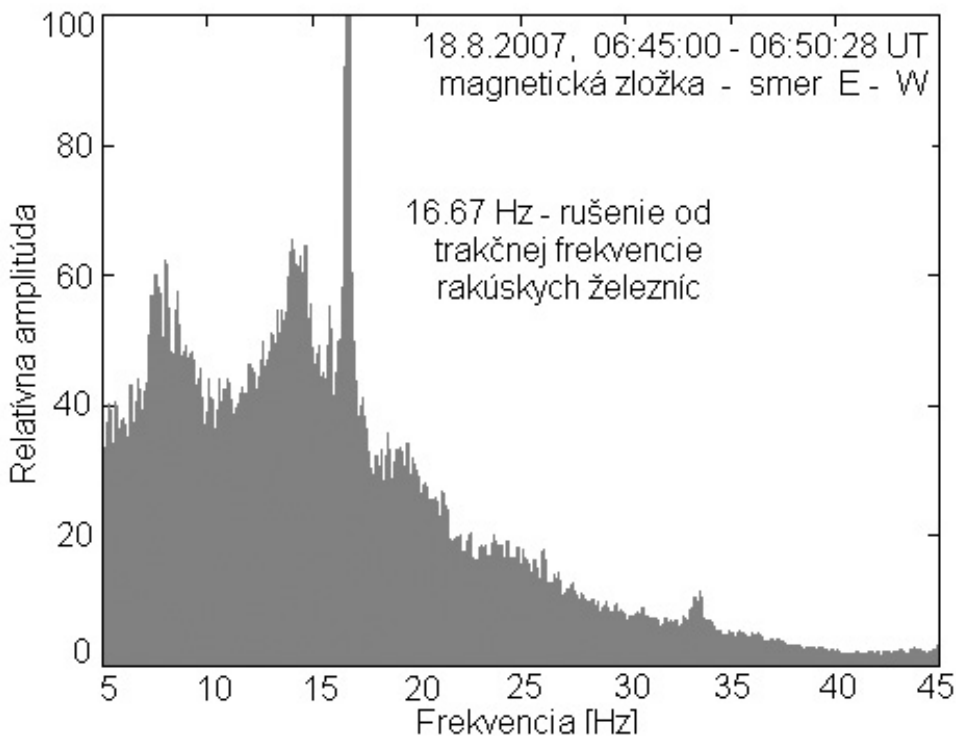
Obr. 12. Amplitúdové (horný graf) a fázové (spodný graf) spektra krátkeho časového úseku (1.28 s) tranzientu podľa obr. 4. Delenie na horizontálnej (frekvenčnej) osi zodpovedá píkovým frekvenciám jednotlivých vlastných módov v amplitúdovom spektre (vzhľadom na malé frekvenčné rozlíšenie dané dĺžkou spracovávaného úseku sú tieto hodnoty približné). Hodnoty fázy sú zakreslené s vylúčením viacznačnosti funkcie arkustangens.

takých je mimo pochybnosť. Potrebne sú ďalšie analýzy a zhromažďovanie štatistického materiálu.

Vzájomné časové vzťahy medzi blízkymi výbojmi a možnosť vzájomnej synchronizácie intenzívne vyšetruje tím prof. C. Pricea z Tel-Avivskej univerzity – práce [15], [16], [17] a ďalšie.

Pokiaľ ide o spektra *magnetických zložiek*, spoľahlivé zachytenie a spracovanie signálov týchto zložiek je obťažnejšie ako v prípade elektrickej zložky poľa SchR. Hlavné problémy sú *optimálne umiestnenie senzorov v teréne*, obmedzenie *parazitného príjmu signálu elektrickej zložky cez vlastnú kapacitu vinutí*, ktorá je pre senzory s veľkým počtom závitov nevyhnutne vysoká (rádu tisícov pF) a potlačenie *vplyvu vlastnej rezonancie vinutí*. Odporúča sa umiestniť senzory pod povrch terénu, čo nie je vždy realizovateľné, alebo do samostatného tieneneho (nemagnetické tienenie!) objektu. Úroveň technogénneho rušenia v pásme ELF je v magnetickej zložke oveľa vyššia ako

v elektrickej, čo vyžaduje efektívnejšiu analógovú filtráciu signálu, najmä na 50 Hz. Na obr. 13 je spektrum magnetickej zložky (na observatóriu AGO, smer osi senzora E–W) za priaznivých podmienok nízkeho rušenia z umelých zdrojov.



Obr. 13. Spektrum magnetickej zložky poľa (v smere E–W), v intervale 5–45 Hz z 5.5-minútového záznamu na AGO Modra. Výrazne „preráža“ úzka ostrá čiara na 16.67 Hz (50/3) a čiastočne tiež na dvojnásobnej frekvencii (33.3 Hz) z trakčného systému rakúskych železníc ÖBB (najbližší úsek železnice je od Modry vzdialený 55 km!). V spektre sú zreteľné prvé 3 vlastné módy a „náznak“ štvrtého. Zdanlivá vyššia amplitúda 2. módu (okolo 14 Hz) oproti základnému je nežiadúci dôsledok vlastnej rezonancie vinutia doteraz používaného senzora okolo 22 Hz.

2. Význam a využitie SchR pre geofyziku a príbuzné disciplíny

a) Časové variácie Schumannových rezonancií

Základné parametre Schumannových rezonancií – píkove frekvencie, amplitúdy a činitele kvality jednotlivých módov (viď znova 1. časť článku, obr. 3) – vykazujú charakteristické (kváziperiodické) *variácie* rôznych periód: denné, sezónne, ročné, dvojročné a tiež variácie spôsobené 11-ročným cyklom slnečnej aktivity.

V nich sa odzrkadľujú zmeny parametrov rezonátora Zem-ionosféra (prevažne zmeny vlastností spodnej ionosféry) a zmeny globálnej búrkovej aktivity (časové a priestorové zmeny sumárnej distribúcie budiacich zdrojov).

Hlavnými príčinami sú [18]:

- sezónna migrácia hlavných búrkových ohnísk v smere sever-juh a odlišné trvanie ročných období na severnej a južnej pologuli;
- zmeny priemernej teploty v tropickom pásme (spojené s fenoménmi El Niño a pod. – [19]);
- zmeny stavu spodnej ionosféry v závislosti na toku UV-žiarenia zo Slnka a slnečnej činnosti všeobecne v dlhodobom meradle;
- erupzívne procesy na Slnku, ktorých následkom je zvýšený tok nabitých častíc, UV- a X-žiarenia v blízkosti Zeme. Počas erupcií dochádza ku krátkodobým, ale veľmi výrazným zmenám celkového „obrazu“ Schumannových rezonancií.

Preto dlhodobé, pokiaľ možno nepretržité monitorovanie hlavných parametrov Schumannových rezonancií na viacerých stanoviskách po celej Zemi, predstavuje významný príspevok nielen pre fyziku ionosféry, ale aj pre fyziku atmosférickej elektriny, klimatológiu a príbuzné obory geofyziky.

V práci [20] možno nájsť prehľadový grafický materiál popisujúci variácie elektrickej zložky poľa prvých 4 módov Schumannových rezonancií podľa meraní na observatóriu v Modre za obdobie 2001–2005. Sú dostupné aj prehľady z iných observatórií, pre stručnosť ich neuvádzame.

b) Súvislosti medzi tranzientnými javmi v pásme ELF a optickými javmi

V posledných rokoch je venovaná veľká pozornosť štúdiu súvislostí medzi tranzientnými javmi v pásme Schumannových rezonancií (ELF) a optickými prejavmi tzv. *sprítov* („sprites“), čo sú opticky pozorovateľné záblesky vo výškach okolo 70 km nad búrkovou oblačnosťou – [9], [17]. Prvé pozorovania vyvolávali pochybnosti, dnes sú tieto javy a ich úloha v mechanizme „globálneho elektrického obvodu“ jasne preukázané, okrem iného priamymi pozorovaniami z obežnej dráhy Zeme. Táto problematika by si zaslúžila samostatný článok.

3. Otvorené otázky

a) Ovplyvňovanie ľudskej psychiky a aktivity všeobecne

Pôsobenie nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na psychiku človeka a jej prípadné ovplyvňovanie je často diskutovaná, ale veľmi kontroverzná téma. Ak vynecháme evidentné nezmysly, šírené veľmi často v médiách (napr. údajný „trvalý vzostup frekvencií schumannovských módov“ a blížiaci sa „koniec sveta“, keď frekvencia základného módu dosiahne 12 Hz, označovanie SchR ako „tep srdca živej Zeme“ a pod.), tento problém je stále otvorený. Absolútne popierať možnosť vplyvu SchR na psychické fenomény a priori by bolo kontraproduktívne. Otázkou však zostáva povaha prípadného *sprostredkujúceho mechanizmu*. Často sa poukazuje na istú blízkosť (o zhode

sa nedá hovoriť!) frekvencií najnižších módov SchR a istých frekvenčných pásiem v elektroencefalografických (EEG) záznamoch u človeka (známe α -, β - a θ -rytmy).

Zásadným „kameňom úrazu“ zostáva *mimoriadne nízka intenzita* elektromagnetického poľa SchR. Ako už bolo uvedené, amplitúda poľa elektrickej zložky je rádove 10^{-7} Vm⁻¹ (desatiny mikrovoltov na meter), amplitúda magnetickej indukcie je rádove desatiny pikotesla (10^{-13} T), čo je cca o 8 rádov (!) nižšie ako priemerná indukcia stáleho zemského magnetického poľa. Príčiny boli uvedené na začiatku odseku 1b). Je hodné uvedenia, že človek pracujúci pri osobnom počítači je vystavený magneticému poľu v pásme ELF (zdrojom sú hlavne monitory), ktorého indukcia niekoľko *desaťtisíckrát* prevyšuje indukciu magnetickej zložky poľa SchR.

Experimentálne bádanie v tomto smere je veľmi obťažné, nakoľko psychiku ovplyvňuje veľký počet vzájomne sa podmieňujúcich faktorov a „vyextrahovať“ jeden z nich je takmer nemožné. Niektorí šikovní obchodníci v USA ponúkajú na inštaláciu vo veľkých budovách s oceľovou kostrou (banky, úrady a pod.) „umelé generátory – budiče ELF polí“, ktoré vraj majú nahradiť prirodzené ELF (schumannovské) pozadie a údajne prispievajú k zníženiu chorobnosti zamestnancov, zvýšeniu produktivity práce, zlepšeniu duševnej pohody a pod. Ide ale o čistý biznis.

Zatiaľ treba túto otázku považovať za otvorenú. Potenciálnymi mechanizmami biologických efektov poľa SchR sa zaoberá súhrnná práca [21].

b) Schumannove rezonancie na iných telesách v slnečnej sústave

Principiálne môžu byť SchR pozorované na telese, ktoré:

- má dostatočne mohutnú *ionosféru* (teda elektricky vodivú vrstvu vo vyššej atmosfére);
- nižšie atmosférické vrstvy vykazujú *elektrickú aktivitu* (mechanizmus oddeľovania nábojov opačnej polarity, atmosférické výboje, cirkuláciu hmôt);
- existencia vlastného magnetického poľa nie je nutná.

V slnečnej sústave boli SchR zistené zatiaľ predbežne na Venuši a na najväčšom Saturnovom mesiaci Titan. Obidve telesá majú ionosféru a ich spodné atmosférické vrstvy vykazujú elektrickú aktivitu.

Na *Venuši* [22] viaceré kozmické sondy zistili počas zostupu atmosférou k povrchu (vo výškach od 45 do 12 km) v širokom frekvenčnom rozsahu impulzné signály, veľmi pripomínajúce prejavy pozemských bleskových výbojov v elektrickej aj magnetickej zložke poľa, ELF signály podobné SchR boli registrované tiež na povrchu. Namiesto mračien z vodných kvapôčok zrejme k separácii nábojov dochádza vo vrstvách aerosolu kyseliny sírovej H₂SO₄, prítomných vo vyšších vrstvách atmosféry. Blesky v strednej atmosfére Venuše boli pravidelne registrované aj opticky z obežnej dráhy planéty.

Na *Titane* tiež existuje ionosféra. Spodná atmosféra je zložená z dusíka N₂ a metánu CH₄, ktorého kvapôčky vytvárajú oblačnosť, tlak pri povrchu je 1,5-násobkom pozemského. Pristávací modul Európskej kozmickej agentúry (ESA) *Huygens* bol k Saturnu dopravený sondou *Cassini* vypustenou NASA, ktorá je stále plne funkčná a obieha okolo Saturna. Dňa 14. 1. 2005 modul Huygens mätko pristál na povrchu Saturnovho mesiaca Titan. Už počas zostupu atmosférou Titanu boli zachytené elektromagnetické

(aj akustické!) signatúry bleskových výbojov a v spektre nízkofrekvenčných signálov zachytených na povrchu je zreteľný pík okolo 36 Hz – čo by zodpovedalo základnému módu SchR, ak uvažíme priemer Titanu. Navyše ionosféra Titanu (opakovane potvrdená pri prechode rádiového signálu zo sondy Cassini počas jej „zákrytu“ za Titanom) leží podstatne vyššie nad povrchom ako zemská [23].

Obidve identifikácie sú *vysoko pravdepodobné*, zatiaľ ale iba **predbežné**. V obidvoch prípadoch bola doba merania veľmi krátka. Na povrchu Venuše sondy „prežívajú“ najviac asi 2 hodiny pre vysokú povrchovú teplotu, na Titane išlo o zatiaľ jediné meranie okolo 3.5 hodiny na povrchu pre obmedzenú kapacitu chemických batérií modulu Huygens.

V prípade obrovských „plynových“ planét *Jupitera* a *Saturna*, ktoré majú tiež mohutné ionosféry, bola už dávnejšie zistená z pozemských pozorovaní (opticky aj rádioastronomickými metódami) a aj z kozmických sond intenzívna výbojová aktivita vo vrchných vrstvách ich atmosfér, ale tieto planéty nemajú pevný povrch, takže SchR, ak tam existujú, zrejme nebude možné pozorovať. Doteraz jediné teleso, ktoré (ako fungujúce) preniklo do atmosféry Jupitera, bol zostupný modul sondy NASA *Galileo* dňa 7.12.1995, ktorý meral iba do hĺbky ~ 160 km pod viditeľnú hranicu oblakov, kde bol nakoniec rozdrvený vonkajším tlakom okolo 25 atmosfér. Nijaké signály pripomínajúce SchR nezistil.

Na *Marse* by mohli rezonancie byť tiež prítomné, ale jeho ionosféra je veľmi slabá a elektrická aktivita v troposfére (vzhľadom na povrchový tlak okolo stotiny pozemského) je pochybná. Hoci na povrchu Marsu pristálo už veľa sond a niektoré stále fungujú, nebolo nič pozitívne zistené.

4. Záver

Schumannove rezonancie predstavujú globálny (celoplanetárny) fyzikálny jav v „dotykovej zóne“ fyziky elektromagnetického poľa a ionosféry, fyziky atmosférickej elektriny, geomagnetizmu, meteorológie a klimatológie. Ich dlhodobé sledovanie a analýza môžu významne prispieť k prehĺbeniu poznania vzájomných súvislostí v oblastiach pôsobnosti uvedených disciplín.

Radi by sme tiež podčiarkli, že experimentálne vybavenie pre štúdium SchR môže byť pomerne jednoduché a finančne nie veľmi náročné.

Naše pracovisko ponúka vážnym záujemcom bez akýchkoľvek nárokov (okrem citovania zdroja) detailné oboznámenie sa s našim experimentálnym vybavením, vrátane podrobnej dokumentácie. Spektrá elektrickej zložky poľa z nášho observatória v Modre (v polhodinových intervaloch) možno v reálnom čase sledovať na: <http://193.87.5.150/>. Tak isto vďačne prijmemo skúsenosti a postrehy z iných pracovísk v tejto oblasti.

Podakovanie

Autori ďakujú:

- pracovníkom Astronomického a geofyzikálneho observatória Univerzity Komenského v Modre pod vedením Dušana Kalmančoka, za neoceniteľnú pomoc pri konštrukcii aparatury aj pri vlastných meraniach;
- vedúcemu Katedry astronómie, fyziky Zeme a meteorológie FMFI UK prof. RNDr. Petrovi Moczovi, DrSc., a pracovníčke Geofyzikálneho ústavu SAV Mgr. Miriam Kristekovej, PhD., za nasmerovanie do oblasti časovo-frekvenčnej analýzy (TFA) a metód na báze waveletov pre identifikáciu tranzientných javov;
- pánovi Tiborovi Opálekovi a pracovníkom mechanických dielní našej fakulty a dielní spoločnosti Thermofluor;
- doc. Ing. Karlovi Draxlerovi, CSc., a doc. Ing. Petrovi Kašparovi, CSc., z Katedry měření FEL ČVUT Praha za cenné rady a skúsenosti;
- pánovi Pavlovi Karabinovi, vedúcemu prevádzky Navigáreň spoločnosti TPC, s.r.o., Liptovský Hrádok, za mimoriadnú ochotu prevziať a realizovať našu netypickú (a maloobjemovú) požiadavku na špeciálne vinutia senzorov;
- dr. Józsefovi Bórovi z Geodetického a geofyzikálneho výskumného ústavu Maďarskej akadémie vied (GGKI MTA) v Nagycenku, prof. Colinovi Priceovi a dr. Eranovi Greenbergovi z observatória Mitzpe Ramon, Katedra geofyziky a fyziky planét University Tel-Aviv, Izrael, za prístup k nameraným dátam a cenné diskusie pri vedeckej práci.

L i t e r a t ú r a

- [1] WILLIAMS, E. R.: *The Global Electrical Circuit: A Review*, submitted to Special Issue of Atmospheric Research following the Internat. Conf. on Atmospheric Electricity, Beijing, China (Dec. 2007).
- [2] OGAWA, T., KOMATSU, M.: *Analysis of Q-burst Waveforms*, Radio Science, 42, RS2S18 (2007), doi: 10.1029/2006RS003493.
- [3] GALEJS, J.: *Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves*, Pergamon Press, Oxford, New York 1972, 360 str.
- [4] HUANG, E. W.: *Electromagnetic Transients, Elves, and Sprites in the Earth-Ionosphere Waveguide*, unpublished dissertation, Dept. Electr. Engrg. and Comp. Sci., Massachusetts Institute of Technology (1998), 257 str.
- [5] ONDRÁŠKOVÁ, A., BÓR, J., ŠEVČÍK, S., KOSTECKÝ, P., ROSENBERG, L.: *Peculiar Transient Events in the Schumann Resonance Band and Their Possible Explanation*, J. Atm. Sol.-Terr. Phys., 4 (2008), 937–946, doi: 10.1016/J.JASTP.2007.04.013.
- [6] NICKOLAENKO, A. P., HAYAKAWA, M.: *Recent Studies of Schumann Resonances and ELF Transients*, J. of Atm. Electricity, 27, No. 1 (2007), 19–39.
- [7] JONES, D. LL., KEMP, D. T.: *Experimental and Theoretical Observations of Schumann Resonances*, J. Atm. Terr. Phys., 32 (1970), 1095–1108.
- [8] NICKOLAENKO, A. P., HAYAKAWA, M.: *Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston (2002), 378 str.
- [9] SENTMAN, D. D.: *Overview of Transient Luminous Events*, presented at Space Science Laboratory Seminar, Univ. of California at Berkeley, 15 February 2005.

- [10] CUMMER, S. A., INAN, U. S., BELL, T. F., BARRINGTON-LEIGH, C. P.: *ELF Radiation Produced by Electrical Currents in Sprites*, Geophys. Res. Letts., 25, No. 8 (1998), 1281–1284.
- [11] PASKO, V. P., INAN, U. S., BELL, T.F., REISING, S. C.: *Mechanism of ELF Radiation from Sprites*, Geophys. Res. Letts., 25, No. 18 (1998), 3493–3496.
- [12] ADLERMAN, E., J., WILLIAMS, E. R.: *Seasonal Variation of the Global Electric Circuit*, J. Geophys. Res., 101, No. D23 (1996), 29 679–29 688.
- [13] BESPALOV, P. A., CHUGUNOV, YU. V., DAVYDENKO, S. S.: *Planetary Electric Generator Under Fair-Weather Conditions With Altitude-Dependent Atmospheric Conductivity*, J. Atm. Terr. Phys., 58, No. 5 (1996), 605–611.
- [14] ROSENBERG, L.: *Data Processing Methodology of the Electric and Magnetic Components of the Schumann Resonance at Modra Observatory*, Acta Astronomica et Geophysica Universitas Comeniana, XXV (2004), 1–8.
- [15] YAIR, Y., AVIV, R., PRICE, C., ASFUR, M., RAVID, G.: *Can Spontaneous Synchronization of Lightning Flashes Occur in a Network of Distant Thunderstorms?* Geophysical Research Abstracts, 9, 03235 (2007), SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-03235.
- [16] YAIR, Y., AVIV, R., RAVID, G., YANIV, R., ZIV, B., PRICE, C.: *Evidence of Synchronicity of Lightning Activity in Networks of Spatially Remote Thunderstorms*, J. Atm. Sol.-Terr. Phys., 68, No.12 (2006), 1401–1415.
- [17] YAIR, Y., LEVIN, Z., JOACHIM, J., ISRAELEVICH, P., PRICE, C., DEVIR, A., ZIV, B., MOALEM, M.: *Summary of Observations of Thunderstorms, Sprites and Elves from the Space Shuttle Columbia During the MEIDEX*, AM 33, Kiruna, Sweden 2006, 50 str.
- [18] NICKOLAENKO, A. P., SÁTORI, G., ZIEGER, B., RABINOWICZ, L. M., KUDINTSEVA, I. G.: *Parameters of Global Thunderstorm Activity Deduced from the Long-Term Schumann Resonance Records*, J. Atm. Sol.-Terr. Phys., 60, No. 3 (1998), 387–399.
- [19] YANG, H., PASKO, V. P.: *Power Variations of Schumann Resonances Related to El Niño and La Niña Phenomena*, Geophys. Res. Lett., 34, L11102 (2007), doi: 10.1029/2007GL030032.
- [20] ONDRÁŠKOVÁ, A., KOSTECKÝ, P., ŠEVČÍK, S., ROSENBERG, L.: *Long-Term Observations of Schumann Resonances at Modra Observatory*, Radio Science, 42, RS2S09 (2007), doi: 10.1029/2006RS003478.
- [21] MICEK, S., MICEK, G.: *Are the Earth Magnetic Field and Schumann Resonance Related to Global Human Activity?*, Bio-Algorithms and Med-Systems, 1, No. 1–2 (2005), 301–306.
- [22] RUSSELL, C. T., SCARF, F. L.: *Evidence for Lightning on Venus*, Adv. Space Res., 10, No. 5 (1990), 125–136.
- [23] FULGHINONI, M.: *Results on Titan Atmosphere Structure by the Huygens Atmospheric Structure Instrument (HASI)*, in: LEBRETON, J.-P., Nature, 438 (2005), 758–764.