

UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI  
FACULTATEA DE GEOLOGIE ȘI GEOFIZICĂ

**REZUMAT**

**TEZA DE DOCTORAT**

*Contribuții privind descifrarea  
morfologiei câmpului electromagnetic al  
Pământului pe baza analizelor spectrale și  
statistice ale datelor geomagnetice și  
electromagnetice*

**Coordonator științific**

**Prof. dr. ing. Paul GEORGESCU**

**Doctorand**

**Fiz. Agata Monica SĂNDULESCU**

**- București, 2013 –**

## INTRODUCERE

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat a fost reprezentat de descifrarea morfologiei câmpului electromagnetic al Pământului pe baza analizelor spectrale și statistice ale datelor geomagnetice și electromagnetice.

Evaluarea activității magnetice este necesară pentru studiul diferitelor fenomene din ionosferă sau din spațiul extraterestru cât și pentru studiul efectelor lor inductive din subsol. Procedeele de evaluare implică înregistrarea continuă a variațiilor geomagnetice pe perioade mai lungi de timp, în zone ferite de perturbații electromagnetice industriale, operație posibilă doar în observatoarele magnetice.

Câmpul electromagnetic al Pământului prin structura sa complexă, detectat la suprafață (în punctele de observație) aduce informații despre condițiile din locul de origine (sursă), despre mediul dintre sursă și locul detecției, despre fenomenele ce au avut loc de-a lungul drumului parcurs (reflexii, refracții, absorbții), cauzele acestora și a mecanismelor fizice asociate.

Cunoașterea morfologiei câmpului geomagnetic permite determinarea cu mare precizie a variațiilor pe termen scurt ale declinației magnetice (în perioadele de agitație magnetică) ce este folosită pentru corecția în timp real a instrumentelor de navigație de la bordul aeronavelor pe durata manevrelor de aterizare și decolare în aviația civilă și militară. Acest parametru poate fi estimat cu o bună precizie pentru zilele de calm magnetic. Pentru zilele agitate și cu atât mai mult în timpul furtunilor magnetice variația declinației devine semnificativă. Astfel, în momentul începerii unei perturbații geomagnetice sunt necesare datele din observatoarele geomagnetice.

În funcție de conductivitatea subsolului din zona respectivă (paternul geomagnetic local) precum și de variațiile câmpului geomagnetic în timp real pot fi dimensionate corespunzător rețelele energetice (transformatoare, cabluri de transport, etc.) prin cuplarea sau decuplarea anumitor sisteme specifice de protecție în timpul furtunilor geomagnetice de grade diferite.

Este important, de asemenea, calculul curenților suplimentari induși în conductele de mari dimensiuni folosite pentru transportul produselor petroliere pentru determinarea tensiunilor necesare ce trebuie aplicate pe diferite segmente de conductă cu scop anticoroziv.

În contextul dezvoltării continue atât din punct de vedere metrologic cât și al tehnicilor numerice de calcul, a crescut foarte mult atât calitatea datelor monitorizate cât și diversificarea procesării lor.

Monitorizarea variației în timp a câmpului geomagnetic are drept scop obținerea de date necesare la elaborarea de modele și teorii asupra mecanismului de producere și menținere a câmpului magnetic terestru și la studiul conductivității interne a Pământului. Totodată cunoașterea nivelului și a variației câmpului geomagnetic este necesară atât în lucrările de prospecțiune geomagnetică, în care, din datele de teren trebuie extrase variațiile diurne precum și variația seculară atunci când se compară panouri de date obținute la epoci geomagnetice diferite cât și în sondajele geomagnetice și magnetotelurice.

În afara procesărilor standard adoptate de rețeaua internațională de observatoare geomagnetice INTERMAGNET (**I**nternational **M**agnetic **N**etwork), metodologia statistico-spectrală și wavelet aduce o serie de informații interesante ce conduc la o cunoaștere morfologică complexă a câmpului geomagnetic.

Pe baza seriilor de timp achiziționate cu o precizie de  $\pm 1$ nT și cu un pas de eșantionare de 0.5 secunde și medieri la minut, am aplicat atât procedee standardizate de evaluare a gradului de activitate geomagnetică prin diferite tipuri de indici de caracterizare, cum ar fi indicii triorar K propus de Bartels, cât și procedee nestandardizate, cum ar fi diferențierea în funcție de timp a semnalului sau decompoziția spectrală și eliminarea componentelor periodice.

Dintre metodele de analiză a semnalelor discrete ale componentelor câmpului geomagnetic am exemplificat extragerea elementelor periodice predominante din înregistrări, diferențierea în funcție timp, corelația semnalelor ce sunt generate de aceeași cauză globală (în cazul furtunilor geomagnetice), analiza și sinteza semnalelor prin tehnici spectrale și wavelet. Am insistat asupra tehnicilor wavelet, deoarece oferă un punct de vedere diferit față de tehnicile tradiționale.

Analiza wavelet rezumă, în esență, corelația între un semnal și unele funcții de bază cu proprietăți fizice cunoscute iar prin descompunerea semnalului în aceste părți constitutive, se pot înțelege mai bine fenomenele care generează câmpul geomagnetic.

Decompoziția și reconstrucția semnalelor geomagnetice, conduc la modelarea lor considerând simultan atât proprietățile în domeniul temporal, cât și cele din domeniul frecvențial, planul timp – frecvență permițând identificarea caracteristicilor spectrale ale unui semnal la un moment dat.

Un alt domeniu de interes, tratat în aceasta teză, îl reprezintă studierea pulsațiilor câmpului geomagnetic. În acest scop am utilizat înregistrările componentelor câmpului cu cea mai mică rată de eșantionare permisă de aparatura de observator (2 Hz).

Pe componentele electromagnetice înregistrate cu aparatura magnetotelurică pot fi puse foarte bine în evidență pulsațiile, deoarece există o deplasare a liniei de zero în timpul înregistrării. În acest fel oscilațiile de frecvență joasă sunt eliminate, fiind evidențiate doar oscilațiile de tipul pulsațiilor.

*Mulțumesc domnului Prof. dr. ing. Paul GEORGESCU și referenților pentru îndrumarea și colaborarea pe care mi-au oferit-o pe parcursul stagiului doctoral, colegilor din cadrul Institutului de Geodinamică al Academiei Române, unde mi-am început activitatea de cercetare, în cadrul colectivului de Electromagnetism și Dinamica Litosferei cât și colegilor și colaboratorilor din cadrul Institutului Geologic al României.*

*Mulțumesc pe această cale institutelor naționale care susțin observatoarele geomagnetice și rețelei INTERMAGNET pentru promovarea unor standarde ridicate ale practicilor de observator.*

## **1. MORFOLOGIA CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC AL PĂMÂNTULUI**

În acest capitolul am prezentat stadiul actual de cunoaștere privind morfologia câmpului electromagnetic al Pământului, sursele acestuia și un rezumat privind câmpul intern principal, câmpul crustal și câmpul extern, arătând principale tipuri de variații periodice și neperiodice.

Partea din câmpul geomagnetic ce are o structură mai simplă și care îi determină predominant distribuția în spațiu se datorează unor cauze situate în interiorul Pământului, pe când cea care îi diversifică morfologia are cauze externe. Prezente în manifestările distribuției în spațiu și evoluției în timp, varietatea manifestărilor câmpului geomagnetic are cauze externe. Această varietate morfologică este suprapusă peste fondul general al câmpului principal.

Mecanismele din interiorul și exteriorul Pământului sunt deosebit de importante, de la procesele din nucleu responsabile de producerea câmpului principal, până la fenomenele din ionosferă și magnetosferă ale căror efecte apar în variațiile și în perturbațiile geomagnetice.

## **2. ANALIZA ARMONICĂ SFERICĂ A CÂMPULUI GEOMAGNETIC ȘI ELEMENTE GENERALE CU PRIVIRE LA SONDAJUL MAGNETOTELURIC**

Am tratat notiunile de bază privind analiza armonică sferică și metodologia sondajelor magnetotelurice.

Magnetismul terestru are o distribuție în spațiu determinată și o evoluție în timp caracteristică. Dubla variabilitate a câmpului geomagnetic, cu locul și cu timpul în care se fac observațiile, structura lui spațio-temporală, este deosebit de complexă.

Atât câmpul geomagnetic principal, cât și cel tranzitoriu pot fi evaluate prin analiză armonică sferică.

Funcțiile sferice, sunt caracterizate prin două proprietăți remarcabile: posibilitatea de a reprezenta o distribuție oarecare de valori, oricât de complicată, pe o sferă și caracterul lor de funcții „armonice”, satisfăcând ecuația lui Laplace, căreia trebuie să i se supună valorile unui câmp ce „derivă dintr-un potențial”.

Sursele câmpului electromagnetic, de interes în metoda sondajelor magnetotelurice, sunt ionosfera și magnetosfera. Datorită faptului că aceste două zone sunt dispuse relativ concentric cu suprafața Pământului, precum și distanța mare până la aceste surse (90-150 Km) conduce la ipoteza fundamentală (în cadrul metodei magnetotelurice), că undele electromagnetice care ajung la suprafața Pământului se comportă ca unde plane iar principalii parametri ce caracterizează câmpul electromagnetic variază după o singură direcție (direcția de propagare).

## **3. PRICIPII PRIVIND ACHIZIȚIA DATELOR GEOMAGNETICE ȘI ELECTROMAGNETICE**

Sunt prezentate principiile achiziției datelor geomagnetice de observator și electromagnetice cu echipamentul magnetoteluric, tipurile de magnetometre și principiile acestora, măsurători comparative cu diferite magnetometre, calibrarea acestora și calculul funcțiilor de transfer.

Fenomene pe care se bazează funcționarea aparaturii geomagnetice sunt: orientarea unui magnet permanent în câmpul magnetic terestru, saturația magnetică, precesia protonică, pompajul optic și efectul Josephson. Sunt descrise tipurile de magnetometre cu o privire specială

asupra celor existente în momentul de față în observatoarele planetare și în particular în cadrul Observatorului Surlari. Este exemplificată calibrarea magnetometrelor, calculul funcțiilor de transfer dintre acestea precum și eroarea de determinare. Rezultatele tuturor comparațiilor dintre magnetometre conduc la o foarte bună corelație a semnalelor înregistrate de acestea. Astfel, dacă se înregistrează întreruperi accidentale în achiziția unui echipament acest gol poate fi completat cu datele celui alt echipament.

Tot în acest capitol sunt prezentate principiile achiziției în domeniul timp a componentelor electromagnetice în cadrul metodei sondajului magnetoteluric, prelucrările ulterioare conducând la exprimarea parametrilor cu semnificație fizico-geologică în domeniul spectral.

Folosirea unei game largi de frecvențe a pulsațiilor electromagnetice naturale își are corespondentul în adâncimi diferite de investigație.

#### **4. ANALIZA DATELOR GEOMAGNETICE DE OBSERVATOR**

Am prezentat procesarea standard a datelor geomagnetice de observator în conformitate cu normativele Asociației Internaționale de Geomagnetism și Aeronomie (IAGA) și INTERMAGNET, stabilirea nivelului de bază al înregistrărilor, calculul indicilor de activitate geomagnetică precum și calculul indicilor triorari de activitate magnetică determinați prin metoda ASM, pentru Observatorul Surlari în perioada 1999-2009.

#### **5. ANALIZA STATISTICO-SPECTRALĂ A DATELOR GEOMAGNETICE DE LA OBSERVATORUL SURLARI**

Acest capitol este structurat în 6 subcapitole ce cuprind principalele tipuri de analize statico-spectrale și wavelet efectuate pe serii lungi de timp (patru cicluri solare), serii medii (câteva ani), serii scurte (între câteva ore și câteva zile; pentru studiul pulsațiilor și furtunilor geomagnetice) și analiza datelor electromagnetice (componentele electrice pe două direcții ortogonale orizontale și componentele magnetice triortogonale; pentru studiul pulsațiilor) înregistrate cu aparatura magnetotelurică.

Din întregul set de date rezultate prin prelucrarea înregistrărilor componentelor câmpului geomagnetic am selectat câteva serii de timp cu rate diferite de eşantionare pentru a fi supuse unor studii statistice și spectrale.

Ratele de eşantionare au fost alese în funcție de rezoluția maximă a sistemelor de achiziție, de modul prelucrării datelor, precum și în funcție de lungimea seriei de timp analizate.

În cazul magnetogramelor analogice înregistrate în perioada 1943-1999 rezoluția temporară maximă ce poate fi atinsă este de 3 minute, însă, deoarece necesitatea standardizării prelucrării impune fie prelucrarea valorilor medii la minut fie a mediilor orare, în cazul acestor înregistrări, am utilizat valorile medii orare ale componentelor înregistrate.

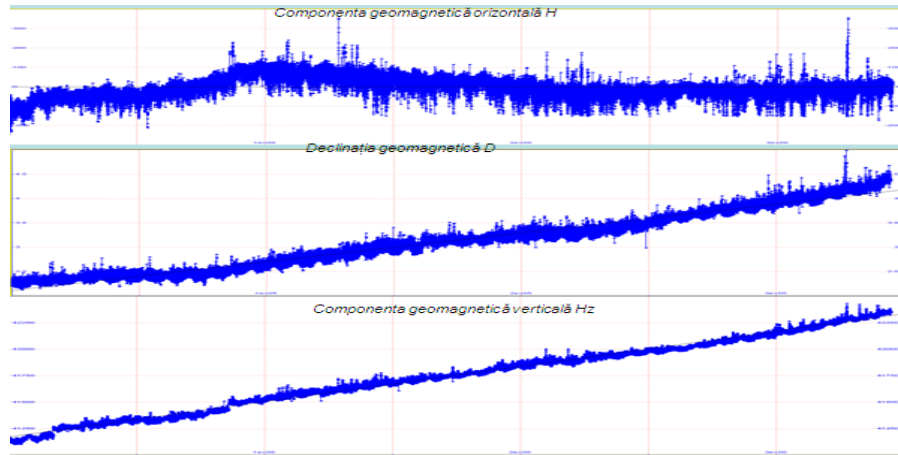
Astfel, datele utilizate pentru studierea periodicităților mari de variație ale câmpului geomagnetic sunt prezentate sub forma unei serii de valori medii orare ce acoperă perioada 1.01.1958 - 31.12.2006. Aceste date au fost descărcate în formatul WDC de pe site-ul <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec1.html> și au fost calculate anual pe baza datelor definitive, atât pentru magnetogramele analogice, cât și pentru înregistrările digitale.

Pentru studierea variațiilor diurne, a variațiilor aperiodice (furtuni geomagnetice, fenomene *ssc* sau *sfe*) am utilizat o serie de valori medii la minut pentru întreaga perioadă în care s-au efectuat înregistrări digitale din observator.

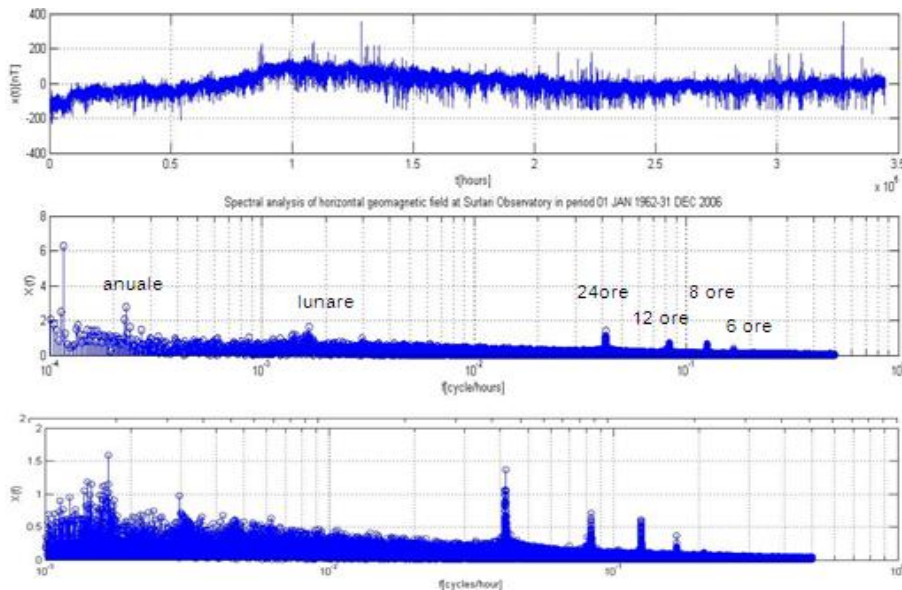
În vederea studierii unor fenomene periodice cu frecvențe mai ridicate am utilizat înregistrări ale valorilor componentelor câmpului geomagnetic achiziționate cu o rată de eşantionare de 2 Hz ce acoperă, în general, perioade de până la 24 de ore.

Primele prelucrări le-am realizat pe seria de valori ale mediilor orare, calculate pe baza datelor definitive, înregistrate la Observatorul Geomagnetic Surlari în perioada 1.01.1958 - 31.12.2006, cu o întrerupere majoră în achiziția datelor în anii 1960 și 1961. Din cauza existenței acestei întreruperi în valorile înregistrate, am tratat perioada mai sus menționată pe două intervale: 1962 – 2006 , respectiv 1958 - 1959.

*Prelucrarea spectrală* am efectuat-o pe o serie lungă, aproape continuă de cca. patru cicluri solare între 1.01.1962 și 31.12.2006, pe valori medii orare, calculate anual pe baza datelor definitive.



**Fig.1** Înregistrările de la Observatorul Surlari, din perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006, pe baza mediilor orare citite din magnetograme. Linia neagră reprezintă trendul liniar al înregistrărilor.



**Fig.2** Componenta geomagnetică orizontală (H)

- A) Componenta geomagnetică orizontală H, din care a fost eliminat trendul liniar, pentru Observatorul Surlari, pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006, pe baza mediilor orare citite din magnetograme;
- B) Analiza spectrală pentru intervalul de frecvență cuprins între  $10^{-4}$  și 0,5 cicl/oră;
- C) Analiza spectrală pentru intervalul de frecvență cuprins între  $10^{-3}$  și 0,5 cicl/oră.



Sunt reliefate periodicitățile ciclurilor solare, anuale, lunare, 24ore, 12 ore, 8 ore și 6 ore.

În continuare, am efectuat analiza wavelet folosind variantele Paul, GaussDeriv și Morlet. Toate cele trei variante oferă o bună localizare timp și rezoluție în frecvență, fiecare dintre ele având câteva particularități.

Varianta Paul localizează cel mai eficient frecvențele oscilațiilor în domeniul timp, GaussDeriv este mai puțin eficientă, iar Morlet este și mai puțin eficientă pentru localizarea în timp. Diferențele mari între cele trei variante apar însă în domeniul frecvență. Astfel, Morlet oferă cea mai bună rezoluție în frecvență, GaussDeriv este mai puțin eficientă și Paul este cea mai puțin eficientă.

Comparând cele trei variante atât sub aspectul localizării în timp cât și în frecvență am ales, pentru analiza datelor geomagnetice, varianta Morlet deoarece are o rezoluție foarte bună în frecvență și o localizare acceptabilă în timp. Această rezoluție foarte bună în frecvență este facilitată și de utilizarea numerelor de undă foarte mici.

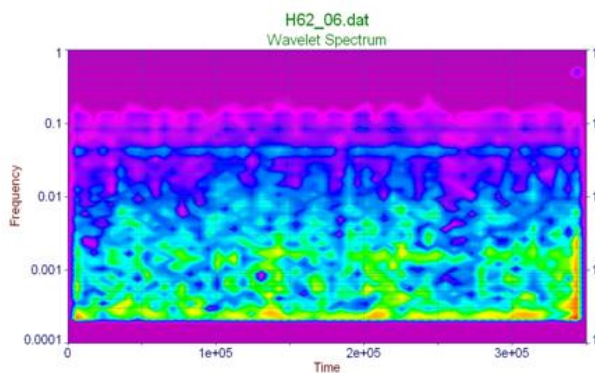


Fig.3 - Analiza wavelet (metoda Morlet) a componentei geomagnetice orizontale, înregistrată la Observatorul Surlari, pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006.

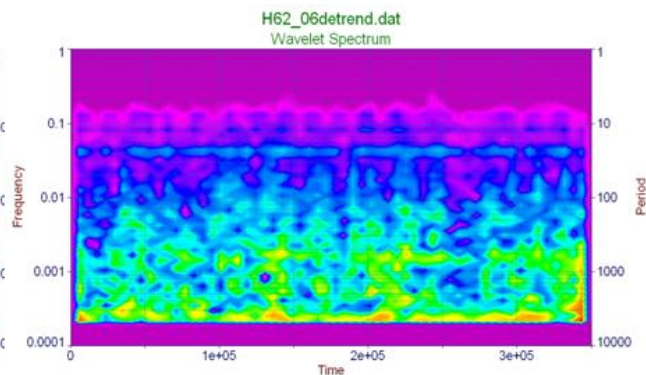
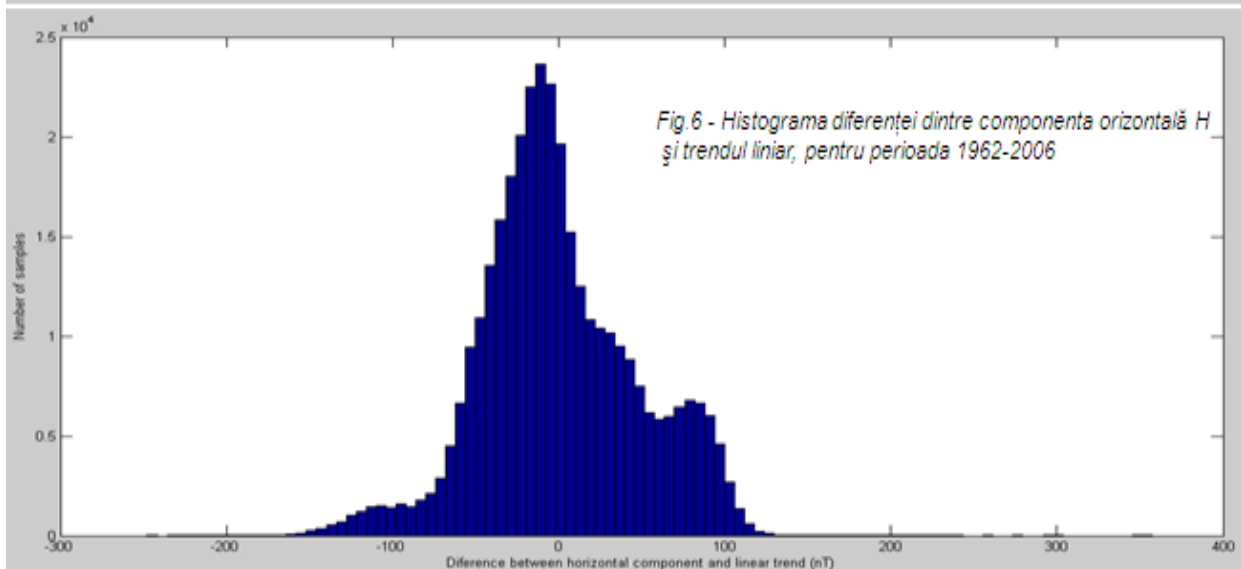
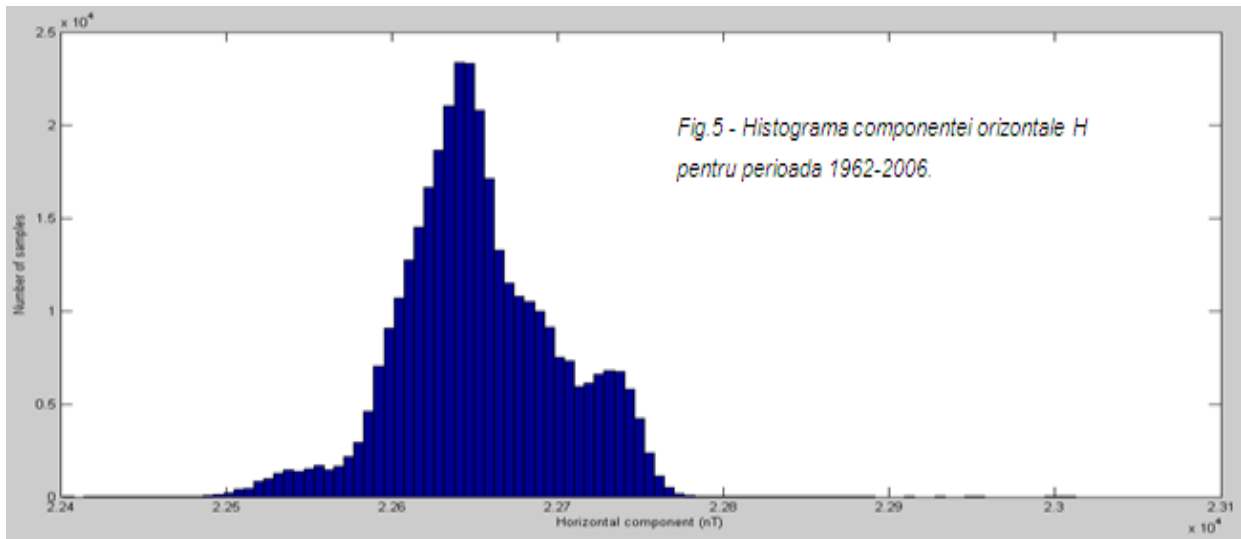


Fig.4 - Analiza wavelet (metoda Morlet) a componentei geomagnetice orizontale, din care a fost eliminat trendul liniar, pentru Observatorul Surlari, pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006.

Prin tinte de culoare este reprezentată amplitudinea. Maximul de amplitudine este reprezentat prin culoarea albastru intens. În ordine descrescătoare a amplitudinii, acestea sunt reprezentate prin culorile: verde, galben, roșu. Fondul mov delimitează zona (timp, frecvență) analizată. Timpul este reprezentat în ore, perioada în ore iar frecvența în cicli/oră.

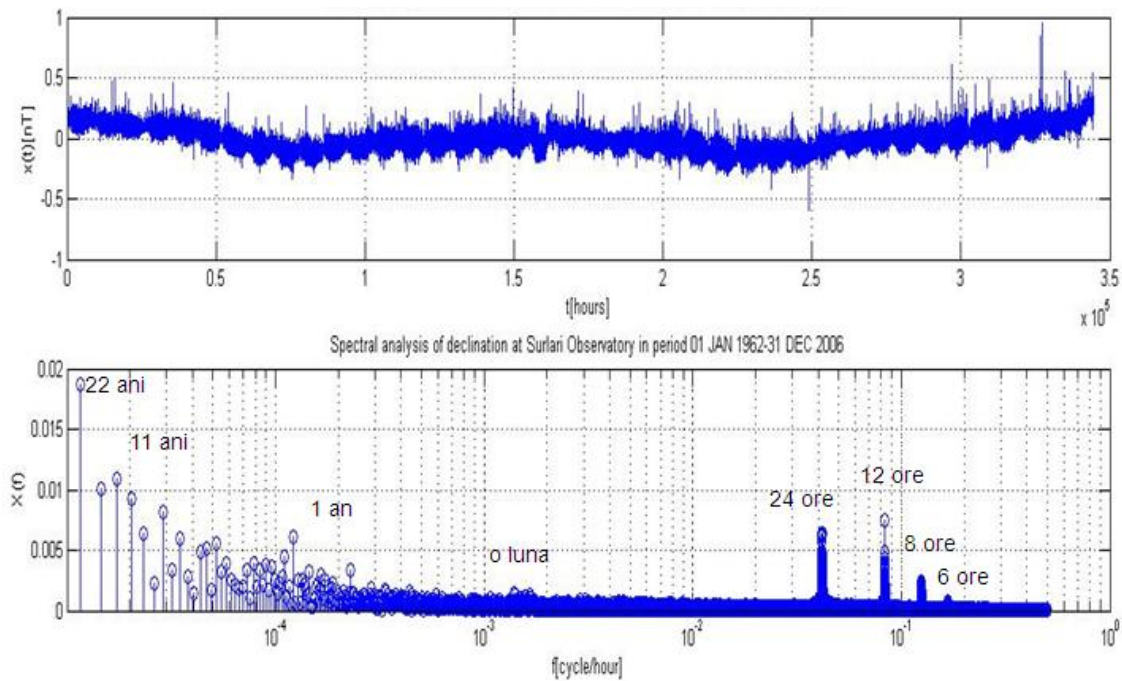


În figura 5 se remarcă o distribuție gaussiană în cazul componentei orizontale  $H_x$  a carei tendință ascendentă este mult mai lentă.

Valorile cuprinse între 22600-22700 nT au ponderea cea mai mare (cu maximum în dreptul valorii de 22650 nT), iar întreaga plajă de valori este cuprinsă în intervalul 22500-22780 nT.

Aspectul histogramei din figura 6 este același ca și în cazul componentei orizontale inițiale, deoarece variația seculară nu apare pe componenta orizontală. Dreapta de regresie trasată (prin metoda celor mai mici pătrate) prin valorile lui  $H_x$ , are panta zero (este paralelă cu axa  $Ox$ ).

În figurile 7-11 am analizat declinația geomagnetică, urmând același procedeu ca și în cazul componentei horizontale H.



**Fig. 7 Declinația geomagnetică**

- A) Declinația geomagnetică înregistrată la Observatorul Surlari pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006, din care a fost eliminat trendul liniar, pe baza mediilor orare citite din magnetograme
- B) Analiza spectrală pentru intervalul de frecvență cuprins între  $10^{-5}$  și  $0,5$  cicli/oră

Sunt reliefate periodicitățile ciclurilor solare de cca.11 și 22 de ani, anuale, lunare, 24ore, 12 ore, 8 ore și 6 ore.

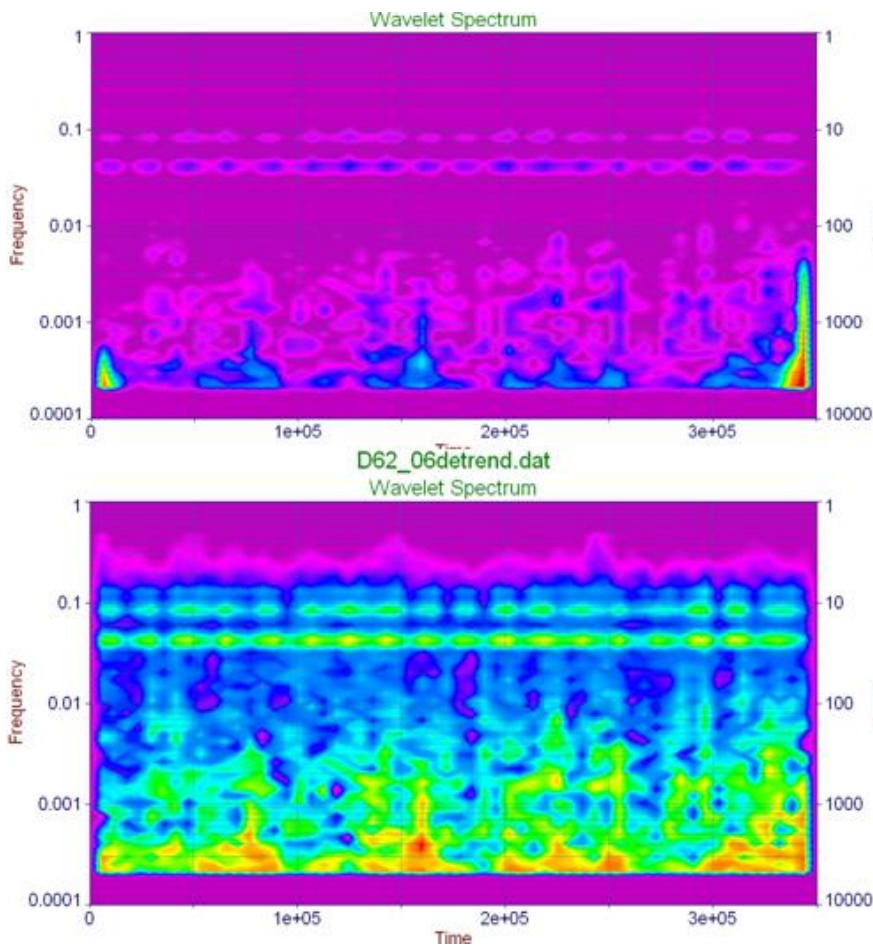
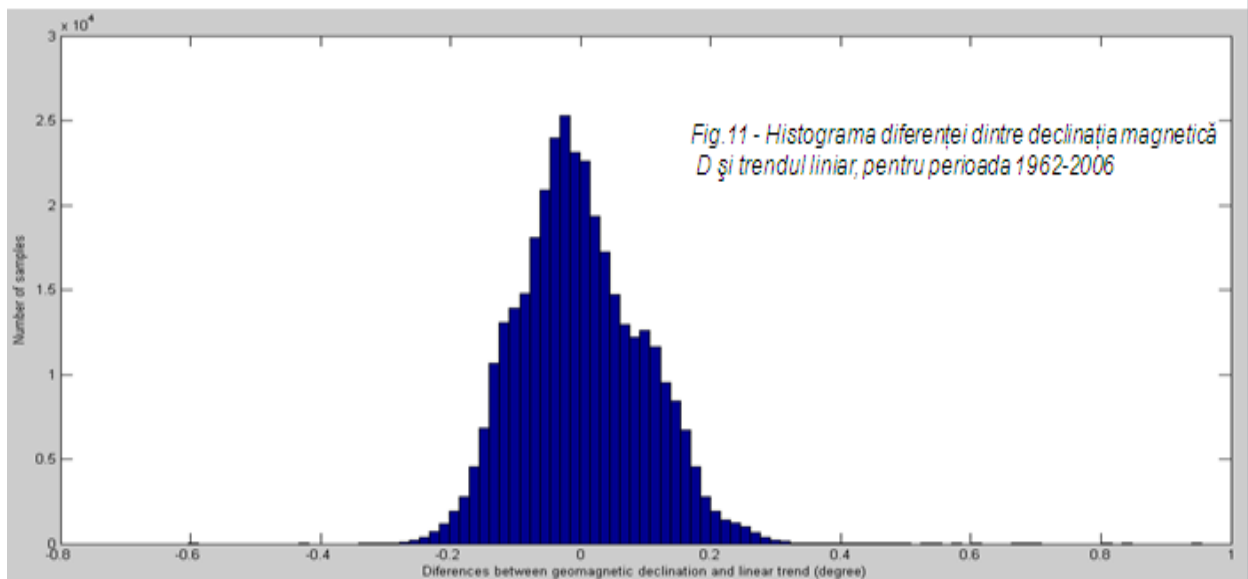
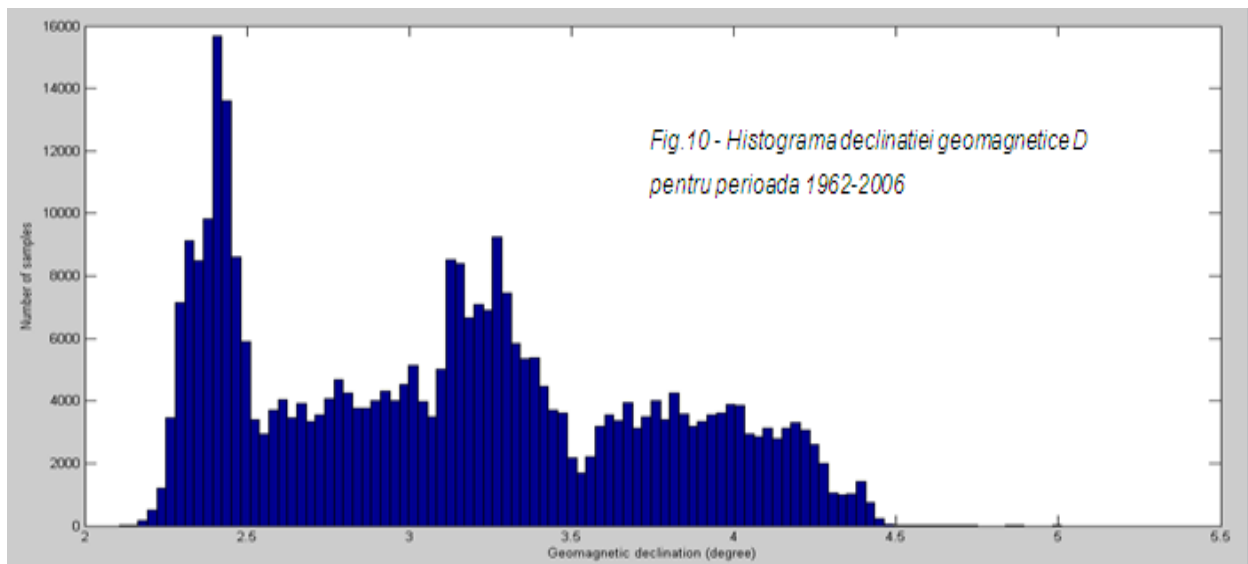


Fig. 8 - Analiza wavelet (metoda Morlet) a declinației geomagnetice, înregistrată la Observatorul Surlari, pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006. Prin tinte de culoare este reprezentată amplitudinea. Maximul de amplitudine este reprezentat prin culoarea albastru intens. În ordine descrescătoare a amplitudinii, acestea sunt reprezentate prin culorile: bleu, ciclam. Fondul mov delimitează zona (timp, frecvență) analizată. În zona de capăt a semnalului analizat apare o succesiune de culori (galben, verde, roșu); această zonă nu trebuie luată în considerație.

Fig. 9 - Analiza wavelet (metoda Morlet) a declinației geomagnetice la Observatorul Surlari, pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006, din care a fost eliminat trendul liniar. Prin tinte de culoare este reprezentată amplitudinea. Reprezentative sunt cele două benzi cvasicontinue, de culoare verde, din dreptul perioadelor de 12 și 24 de ore. Pentru perioade mai mari, maximele de amplitudine au un caracter neregulat în timp, în funcție de activitatea geomagnetică.

Declinația magnetică, fiind afectată de variația seculară, apar diferențe importante între fig.8 și fig. 9, referitoare la continuitatea benzilor de frecvențe de 12 și 24ore.

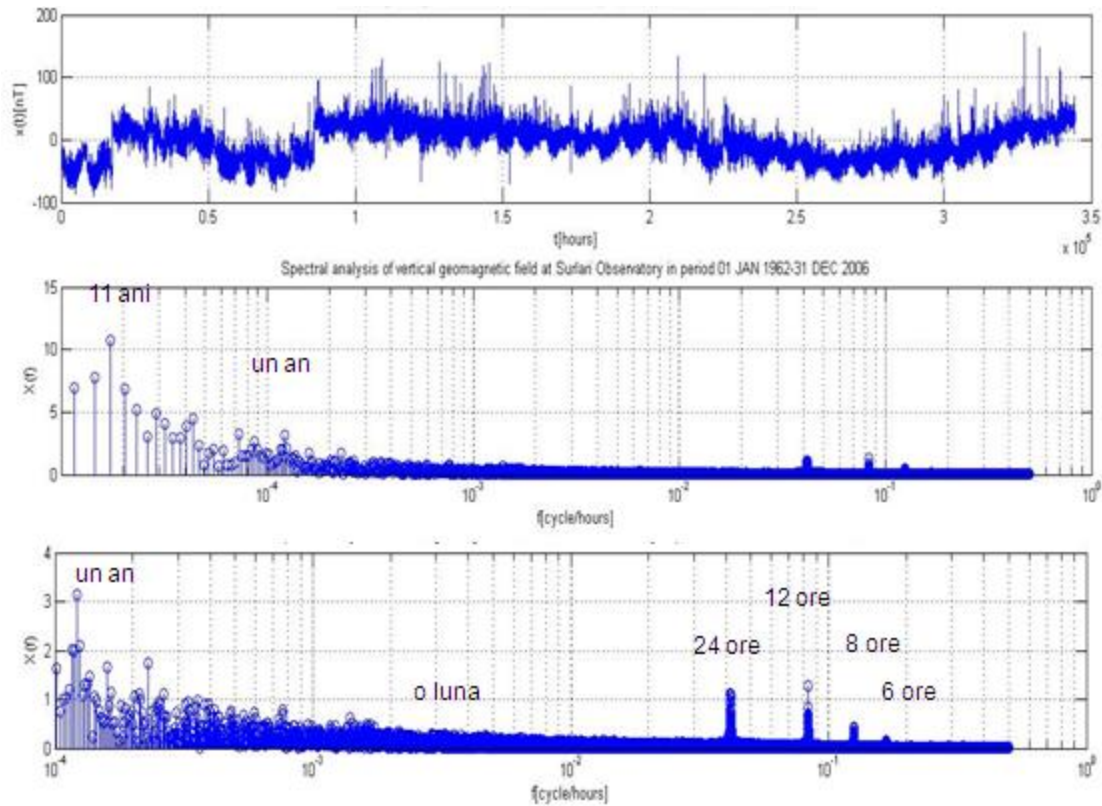


Datorită trendului ascendent al declinației, dat de variația seculară, valorile se distribuie într-un interval foarte larg 2,2 – 4,45 grade (fig. 10).

Extrăgând trendul variației seculare, peste 95% din valorile obținute se încadrează într-un interval de 0,4 grade (sau 24 minute), și au o distribuție gaussiană (fig.11).

În mod similar am procedat și pentru componenta geomagnetică verticală Hz, care este cea mai afectată de variația seculară, iar datele sunt puternic modulate de trendul liniar ascendent al acesteia.





**Fig.12** Componenta geomagnetică verticală Hz

- A) Componenta geomagnetică verticală Hz, din care a fost eliminat trendul liniar, pentru Observatorul Surlari, pentru perioada 1.01. 1962 – 31.12. 2006 pe baza mediilor orare citite din magnetograme;
- B) Analiza spectrală pentru intervalul de frecvență cuprins între 10-5 și 0,5 cicl/oră;
- C) Analiza spectrală pentru intervalul de frecvență cuprins între 10-4 și 0,5 cicl/oră

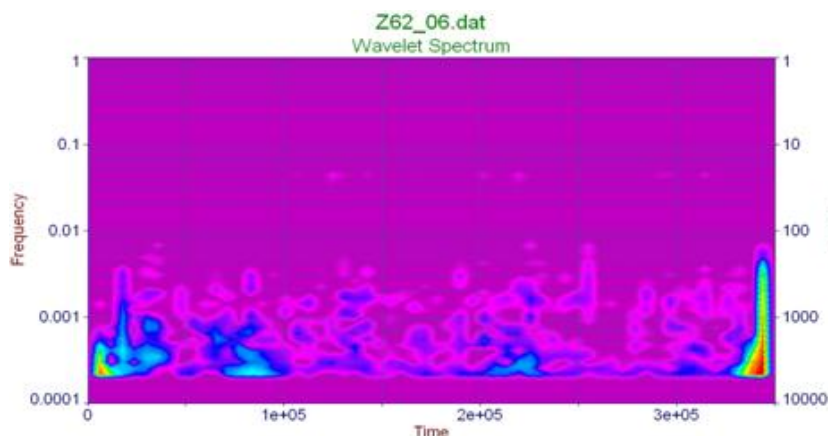


Fig.13 - Analiza wavelet (metoda Morlet) a componentei geomagnetice verticale Hz, înregistrată la Observatorul Surlari, pentru perioada 01.01.1962-31.12.2006.

Nu se individualizează benzi continue de maxim al amplitudinii datorită trendului ascendent al componentei verticale, dat de variația seculară.

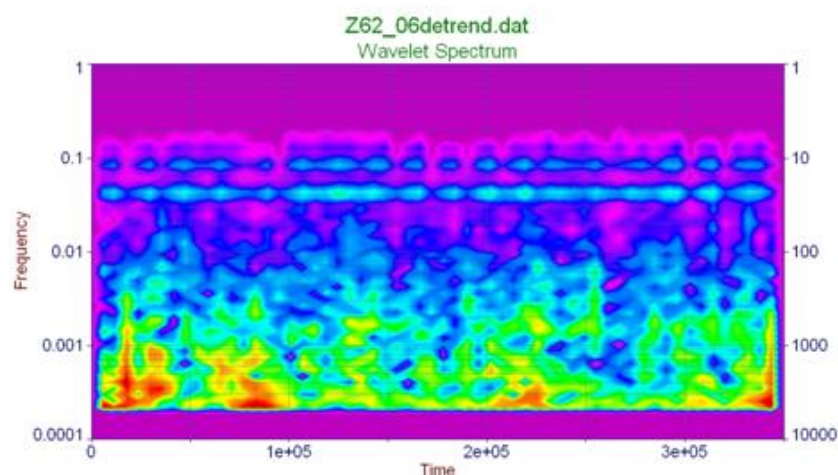


Fig.14 - Analiza wavelet (metoda Morlet) a componentei geomagnetice verticale la Observatorul Surlari, în perioada 01.01.1962-31.12.2006, din care a fost eliminat trendul liniar.

Prin tinte de culoare este reprezentată amplitudinea. Maximul de amplitudine este reprezentat prin culoarea albastru intens. În ordine descrescătoare a amplitudinii, acestea sunt reprezentate prin culorile: verde, galben, roșu. Fondul mov delimitează zona (timp, frecvență) analizată. Timpul este reprezentat în ore, perioada în ore iar frecvența în cicluri/oră.

Prin descompunerea semnalului în aproximări și detalii, se pot înțelege cauzele producerii semnalului. Tendința generală a semnalului cu amplitudine mare și frecvență scăzută este dată de aproximări, iar oscilațiile cu amplitudini mici și frecvențe mari, care se suprapun peste tendința generală, sunt date de detalii.

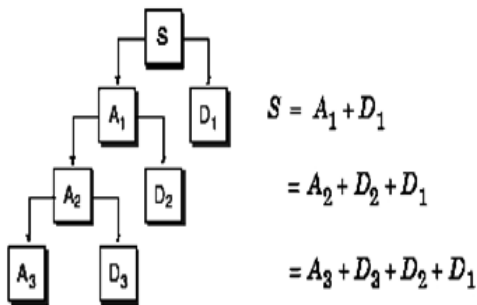
Descompunerea semnalului se repetată în mod iterativ, cu aproximări și detalii succesive, pe o structură arborescentă wavelet.

În analiza datelor geomagnetice am folosit undinele Haar, deoarece acestea sunt cel mai des utilizate în analiza și sinteza unui semnal, ele conducând la o bază ortonormată, familia de undine fiind restrânsă la translații și dilatații întregi, utilizând puterile lui 2.

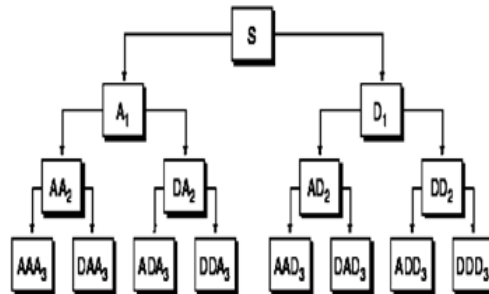
Procesul iterativ de descompunere al semnalului poate continua până cel mult la nivelul în care s-a ajuns la un eşantion.

Aceasta este o modalitate intuitivă de analiză a unui semnal bazată pe algoritmul de procesare denumit “subband coding” (Vetterli M. și Kovačević, 1995). Prin aplicarea unui ansamblu de filtre ce au frecvențe centrale și lărgimi de bandă adecvate, semnalul original este prelucrat mai întâi printr-o pereche de filtre de tip trece-jos și trece-sus. Ieșirea filtrului trece-jos este la rândul său procesată din nou cu o pereche de filtre de aceeași natură, cu observația că frecvențele de tăiere ale acestora sunt înjumătățite față de prima pereche. Mecanismul este continuat apoi pentru un număr oarecare de pași. În principiu, există posibilitatea ca benzile filtrelor să fie alese independent, în acord cu tipul și localizarea informației considerate de interes.

Există diverse moduri posibile de reconstrucție a semnalului.



A) un mod de analiză/sinteză în care sunt descompuse/reconstruite doar aproximările. Acest mod este utilizat practic în aplicațiile din Matlab.

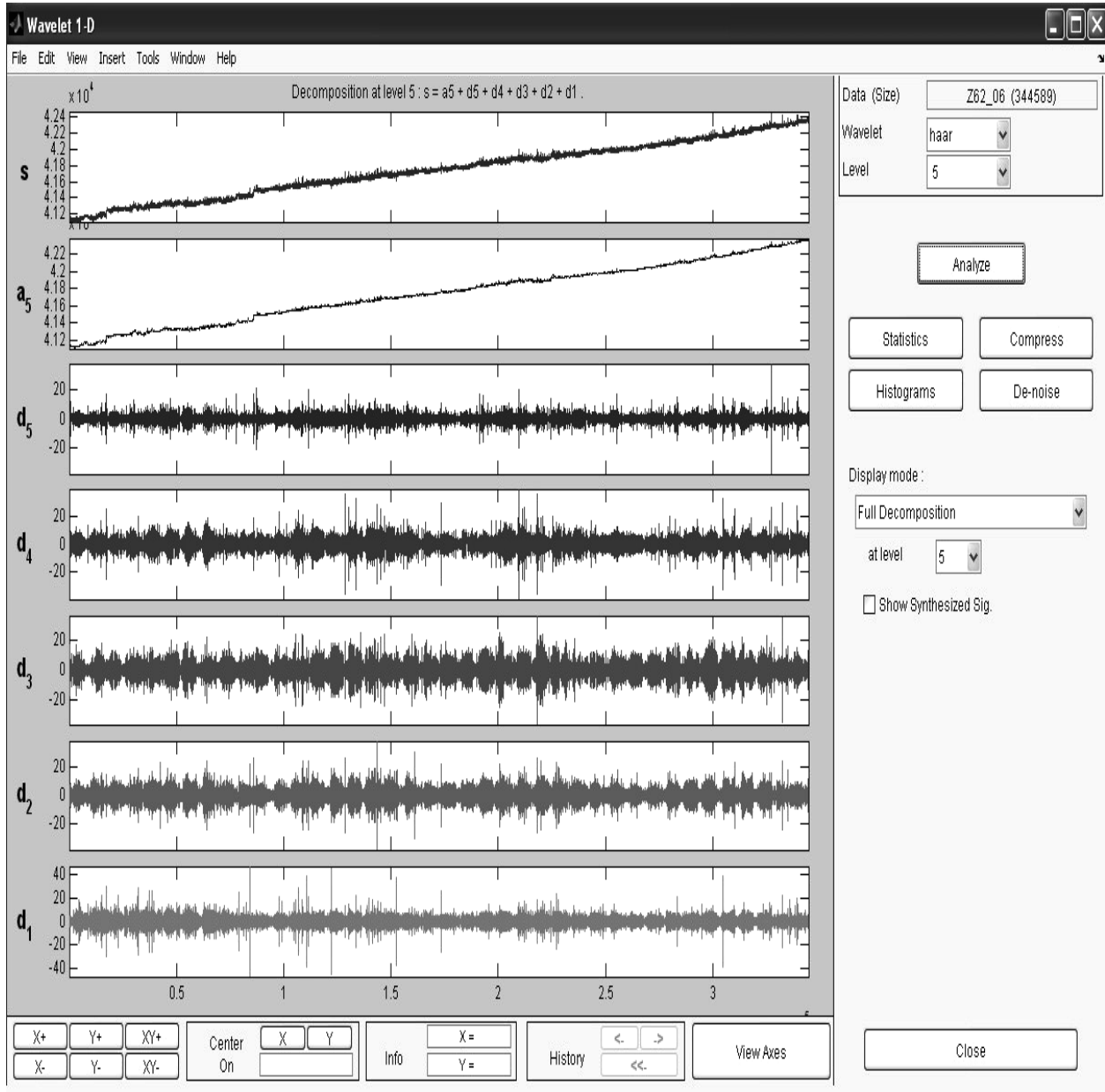


B) cazul general în care sunt tratate arborescent atât aproximările, cât și detaliile.

**Fig.15** Analiza și sinteza semnalelor în aproximări și detalii într-o structură arborescentă

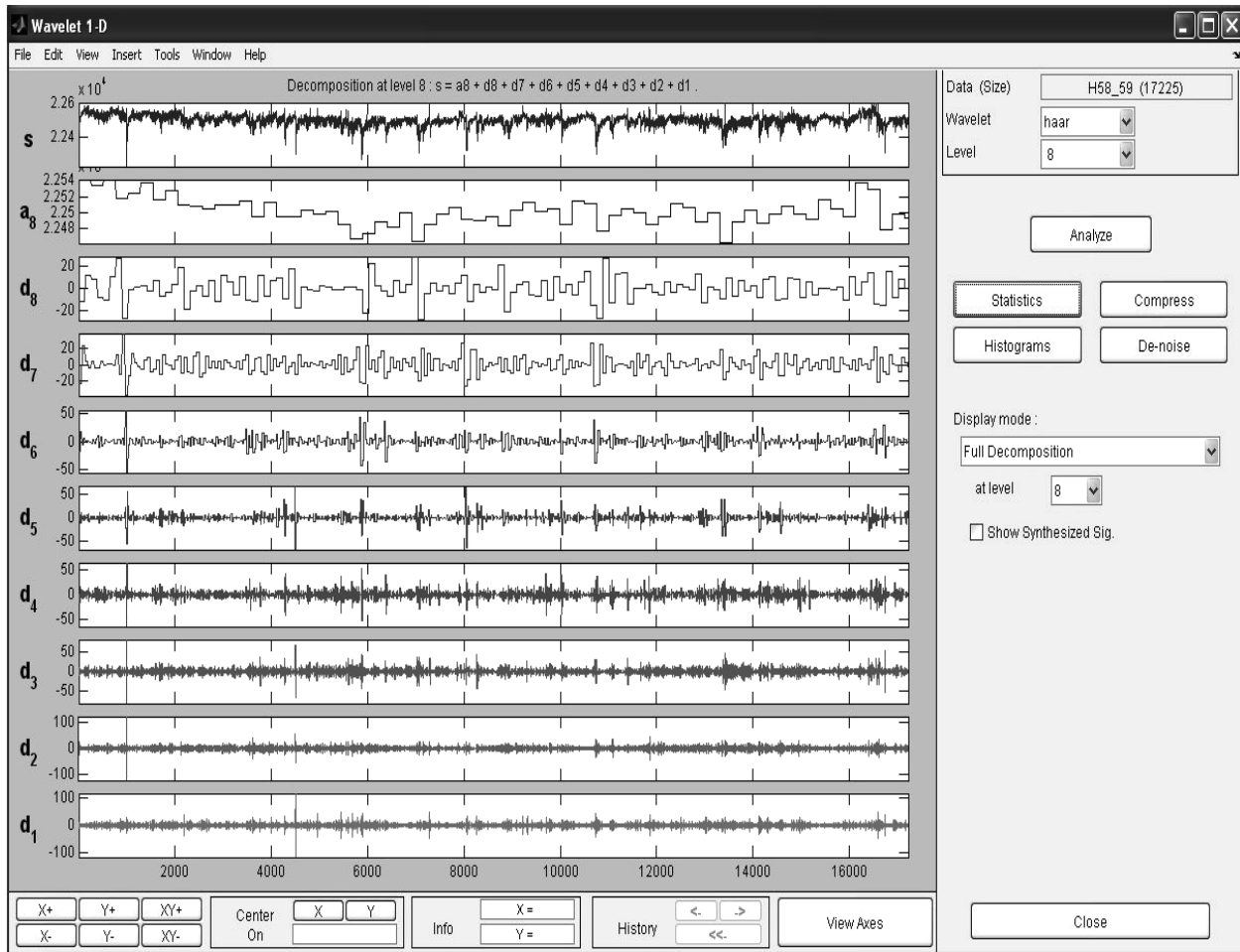
(Misiti et.al. 2011 – MathWorks)





**Fig.16** Decompoziția spectrală pentru componenta verticală, Hz, a câmpului geomagnetic, înregistrată la Observatorul Surlari pentru perioada 1.01.1962 - 31.12. 2006. Analiza wavelet cu funcții Haar, la nivelul 5, pentru 344589 eșantioane reprezentând medii orare din datele definitive.

Detaliile  $d_1 - d_5$  au amplitudini crescătoare și frecvențe progresiv descrescătoare. Aproximația  $a_5$  are același trend general ca și semnalul inițial ( $s$ ), filtrat de zgomot.



*Fig. 17* Decompoziția spectrală pentru componenta orizontală H a câmpului geomagnetic înregistrat la Observatorul Surlari, pentru perioada 01.01.1958-31.12.1959. Analiza wavelet cu funcții Haar, nivelul 8, pentru 17225 eșantioane reprezentând mediile orare din datele definitive.

În aceasta reprezentare sunt foarte vizibile caracteristicile detaliilor.

Înregistrările digitale efectuate în perioada 1999 - februarie 2009 au o rată de eșantionare de 0,2 Hz, iar din martie 2009 și până în prezent, rata a fost de 2 Hz pentru componentele D, H și Z și de 0,2 Hz pentru valoarea scalară a câmpului total F. Aceste rate de eșantionare permit calcularea valorilor medii la minut.

Pentru toate cele trei componente înregistrate există o tendință ascendentă, observabilă, pentru întreaga perioadă, reprezentând variația seculară a componentelor analizate.

La latitudinea observatorului Surlari componenta orizontală  $H_x$  prezintă cel mai înalt grad de perturbare, variațiile acesteia ajungând la amplitudini de circa 400 nT.

O primă etapă de prelucrare a acestor date îl reprezintă procesul de linearizare. În urma aplicării unei ecuații de linearizare, caracteristice pentru fiecare componentă, se obține extragerea efectului variației seculare a componentei respective a câmpului geomagnetic și se conservă efectul produs de câmpul geomagnetic extern.

Din studiul graficelor linearizate ale componentelor  $H_x$ ,  $H_y$  și  $H_z$  am pus în evidență câteva perioade de activitate geomagnetică mai intensă, marcate prin creșterea amplitudinii variațiilor mediilor zilnice, de la valori de 20-30 nT până la valori de 100 nT.

Spectrele de frecvență în ciclul zi ale câmpului total  $F$  și ale componentei geomagnetice verticale  $H_z$ , evidențiază variațiile sezoniere ale componentelor înregistrate.

Perioadele de agitație geomagnetică sunt puse în evidență prin studierea variațiilor indicilor triorari de activitate magnetică (fig. 18) și a sumei zilnice a acestora (fig. 19). Am studiat și zilele în care indicii triorari depășesc valoarea 5 pentru perioade mai mari de 3 ore. În acest caz se consideră că are loc o furtună magnetică și nu un fenomen magnetic izolat.

Pentru o verificare suplimentară am analizat și înregistrările, din aceeași perioadă, provenite de la alte observatoare planetare, indiferent de poziția lor geografică.

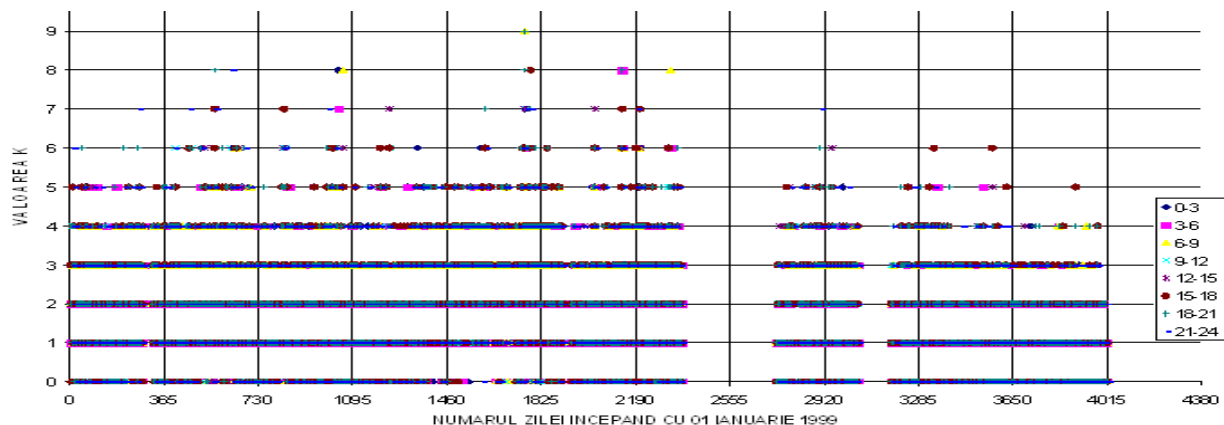
Am pus în evidență principalele furtuni magnetice produse în perioada 01.01.1999-31.12.2009 ale căror extinderi și localizări în timp se pot individualiza în figurile următoare.

În figura 18 sunt prezentați indicii triorari de activitate geomagnetică, în culori distinctiv pentru toate cele 8 intervale triorare ale zilei (0-3, 3-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24, în TU), calculați prin metoda ASM.

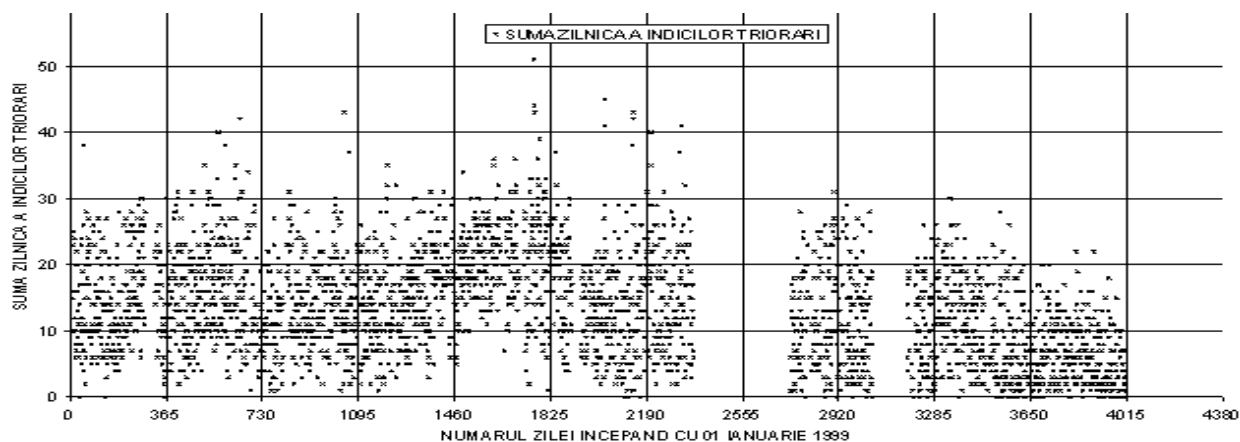
În abscisă fiind marcat numărul de ordine al zilei din această perioadă, se pot calcula cu ușurință datele și perioadele triorare din zi, în care indicii de activitate geomagnetică au atins un anumit prag. Pe baza acestui prag furtunile geomagnetice se pot încadra în una din categoriile prezentate în capitolul 1.

Pentru o clarificare suplimentară, am reprezentat și suma zilnică a indicilor triorari de activitate geomagnetică (fig. 19), abscisa fiind identică cu cea din figura 18.

Suma zilnică a indicilor triorari este relevantă pentru aprecierea unei anumite zile, din perioada studiată, ca fiind calmă sau perturbată.



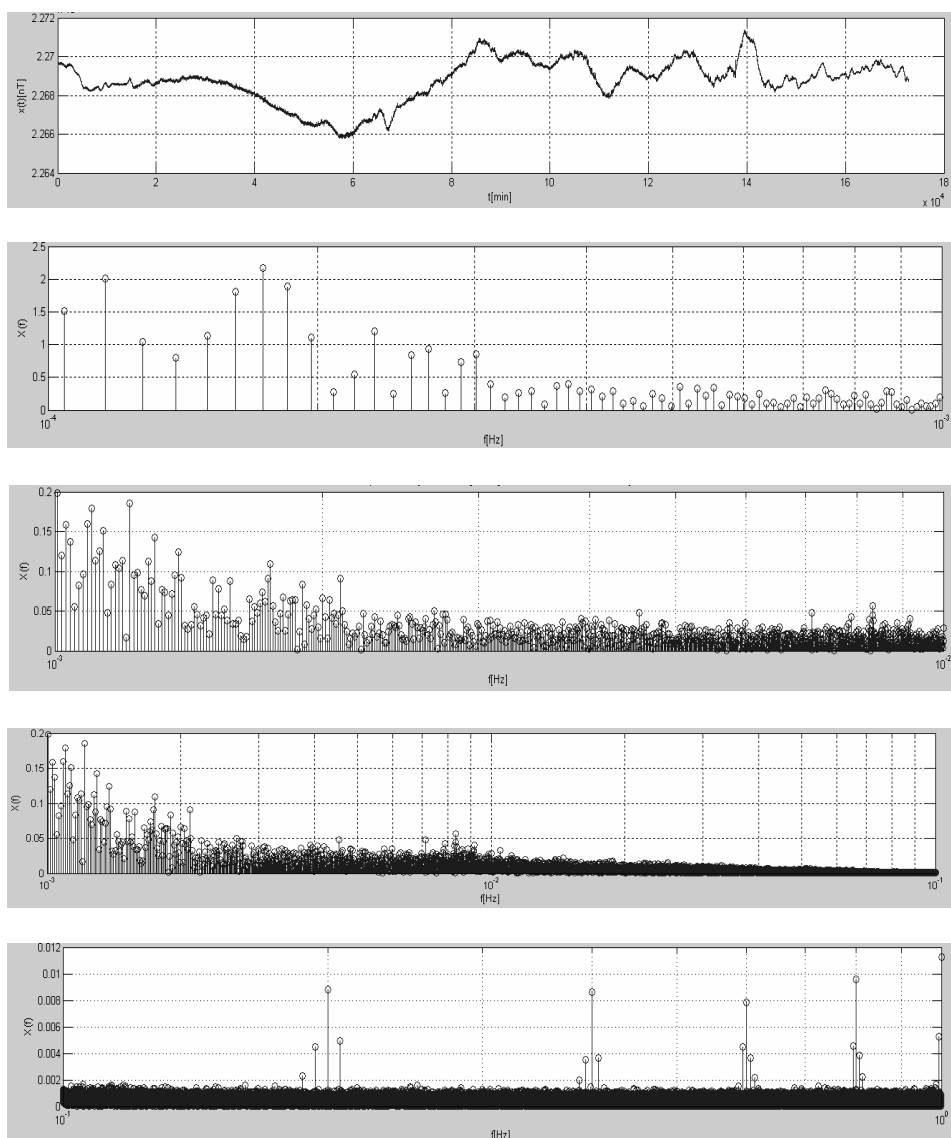
**Fig.18** Indicii triorari de activitate geomagnetică, în culori distinctiv pentru toate cele 8 intervale triorare ale zilei (0-3, 3-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-24, în TU), calculați prin metoda ASM, perioada 01.01.1999-31.12.2009



**Fig.19** Suma zilnică a indicilor triorari pentru perioada 01.01.1999-31.12.2009

Pentru a studia morfologia câmpului geomagnetic într-o perioadă agitată am ales o zi cu perturbații geomagnetice (23.08.2011) și am efectuat analiza de frecvență pentru componenta cea mai perturbată Hx, pe benzi de frecvență.

În figura 20 a este prezentată curba componentei geomagnetice Hx, înregistrată în timpul unei furtuni magnetice la Observatorul Surlari, în data de 23.08.2011, cu rata de achiziție de 2 Hz. În fig.21 b,c,d,e sunt prezentate rezultatele analizei spectrale pentru patru benzi de frecvență.



**Fig. 20** Analiza spectrală pe benzi de frecvență pentru o componentă a câmpului geomagnetic, pentru o zi cu perturbații geomagnetice (23.08.2011) .

- a) Componenta  $H_x$  înregistrată, în timpul unei furtuni magnetice, la Observatorul Surlari, în data de 23.08.2001 (rata de achiziție 2 Hz)
- b) Spectrul de frecvență al semnalului între  $10^{-4}$  și  $10^{-3}$  Hz.
- c) Spectrul de frecvență al semnalului între  $10^{-3}$  și  $10^{-2}$  Hz.
- d) Spectrul de frecvență al semnalului între  $10^{-2}$  și  $10^{-1}$  Hz.
- e) Spectrul de frecvență al semnalului între  $10^{-1}$  și 1 Hz.

Din aceste figuri reies frecvențele pulsațiilor ce se încadrează în clasificarea prezentată în capitolul 1.

Comparând spectrele pentru zilele geomagnetice calme cu spectrele zilelor cu perturbații, se poate remarca prezența mai multor frecvențe ale pulsațiilor în perioadele de furtună geomagnetică, decât în zilele calme. Totodată, se remarcă și creșterea amplitudinii acestor pulsații.

## 6. STUDII COMPARATIVE ALE DATELOR GEOMAGNETICE

Am prezentat studii comparative ale datelor geomagnetice de la diferite observatoare planetare situate la latitudini și longitudini diferite în care am evidențiat corelația datelor dintre acestea din perioadele cu furtuni geomagnetice precum și analizele spectrale și wavelet comparative dintre acestea.

Un alt mod de analiză a semnalului este dat de corelarea mai multor seturi de date folosind factorul de corelație pentru o serie bidimensională:

$$r_{y/x} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

unde:  $x_i, y_i$  sunt două serii de date;  $i = \{1, \dots, n\}$ ,  $n$  = numărul de date din aceste două serii.

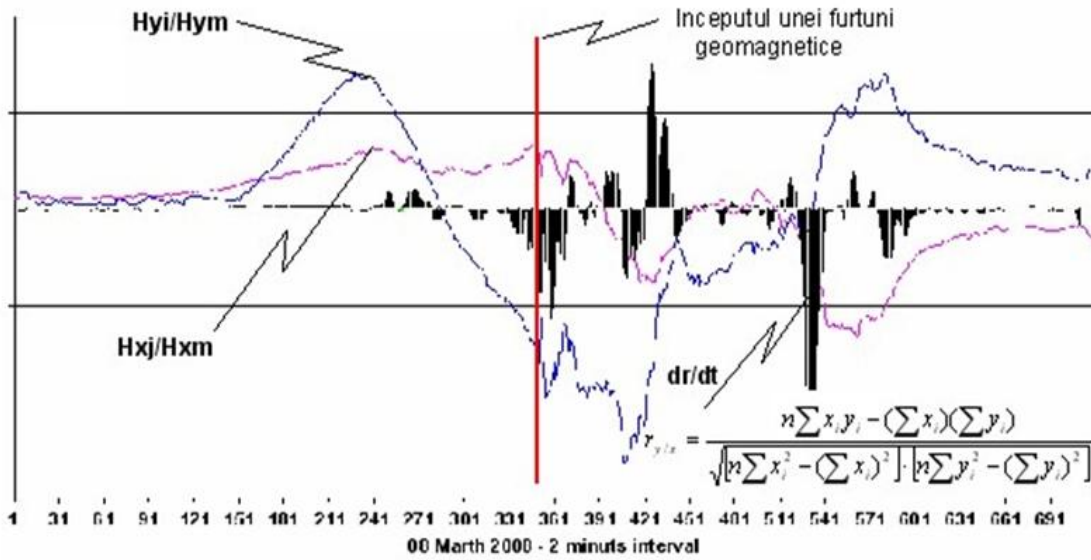
Factorul de corelație l-am calculat pentru o fereastră mobilă ce conține 10 perechi de valori ( $x_i, y_i$ ). Această fereastră mobilă se deplasează, cu pasul de un eșantion, pe întregul semnal. Astfel, factorul de corelație poate fi calculat pentru fiecare moment  $t_i$  situat la jumătatea ferestrei.

Factorul de corelație prezintă creșteri importante atunci când, între două serii de timp, există relații de cauzalitate.

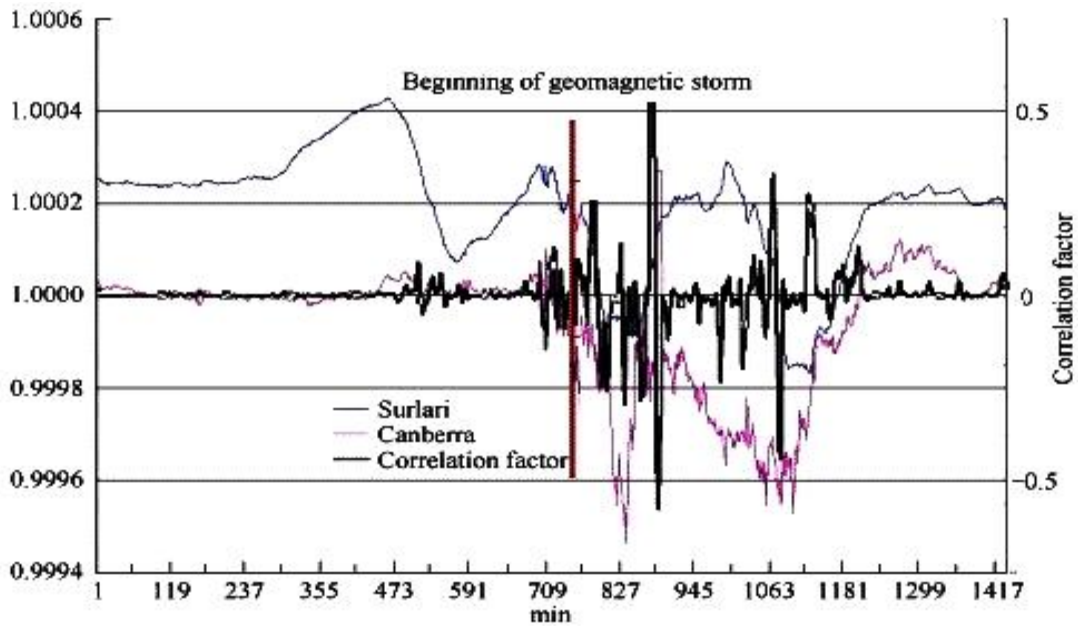
Dacă există  $n$  parametrii geofizici înregistrați, se pot calcula indicii de corelație pentru  $n * (n-1) / 2$  perechi bidimensionale.

O furtună geomagnetică se înregistrează simultan în observatoarele răspândite pe tot Globul Terestru, dar cu amplitudini diferite.

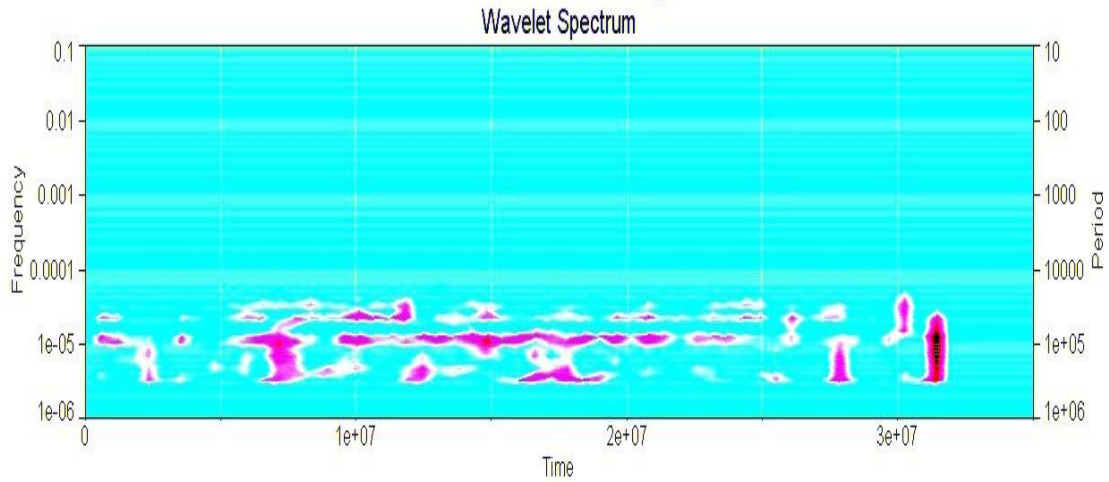
Aceași creștere a factorului de corelație se observă între parametrii similari (componentele câmpului geomagnetic), înregistrați în diferite observatoare, de pe glob, în timpul unei furtuni geomagnetice (fig.21 – 22).



**Fig.21** Factorul de corelație între două componente normalizate ale câmpului geomagnetic înregistrate la Observatorul Surlari la începutul furtunii geomagnetice, unde:  $H$  normalizat =  $H_i / H$  medie,  $i = 1, \dots, n$ .

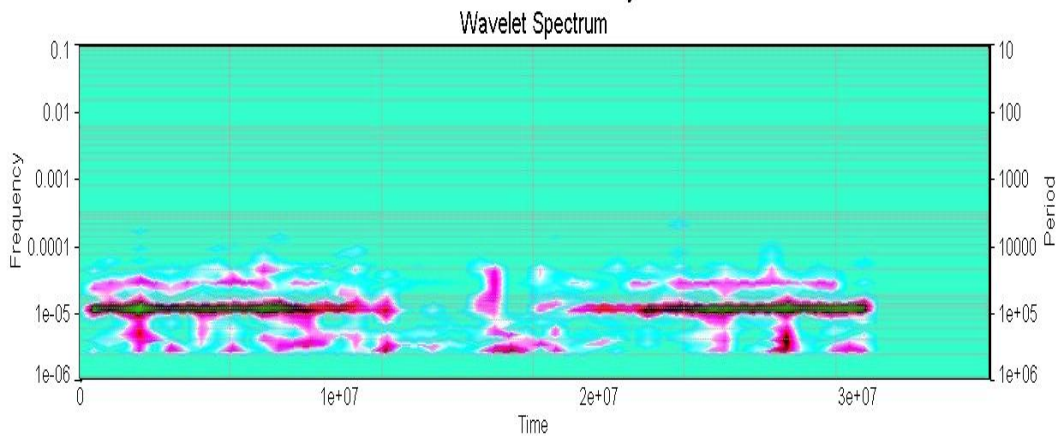


**Fig. 22** Factorul de corelație între valorile normalizate ale câmpului geomagnetic total înregistrat la Observatoarele Surlari și Canberra la începutul furtunii geomagnetice, unde:  $H$  normalizat =  $H_i / H$  medie,  $i = 1, \dots, n$ .



**Fig.23** Spectrul Wavelet pentru observatorul geomagnetic Kakioka, în cursul anului 2007, din datele definitive de pe site-ul INTERMAGNET (Asimopolos, Peștină, 2010)

Maximul de amplitudine este reprezentat prin culoarea roșie (de la roșu deschis la roșu intens).



**Fig.24** Spectrul Wavelet pentru observatorul geomagnetic Vernadsky în cursul anului 2007, din datele definitive de pe site-ul INTERMAGNET (Asimopolos, Peștină, 2010)

Maximul de amplitudine este reprezentat prin culoarea roșie (de la roșu deschis la roșu intens).

Se pot trage concluzii cu privire la tipul de activitate magnetică produsă la un moment dat. Astfel, zilele în care zonele de contrast sunt aliniate preferențial la periodicitățile cunoscute



(24 h, 12 h, 8 h), se poate spune că sunt zile calme. Zilele în care zonele contrastante nu se aliniaza preferențial, după periodicitățile cunoscute, pot fi interpretate ca zile perturbate.

Între două spectre wavelet ale datelor achiziționate simultan (Kakioka și Vernadsky), pot exista multe diferențe datorate unor factori locali:

- diferențe de latitudine și longitudine;
- diferențele de structură geologică locală ce implică diferențe de conductivitate a subsolului; aceste zone cu conductivitatea crescută pot fi generate și de perturbațiile intensității magnetice, din timpul subfurtunilor și furtunilor magnetice;
- fenomenele geomagnetice caracteristice (*si*, *ssc*, *sfe*, *b*) sunt dependente de condițiile locale.

## CONCLUZII

Contribuțiile personale din cadrul tezei de doctorat sunt reprezentate de realizarea unor analize statistice și spectrale a datelor geomagnetice de observator pentru o perioadă de aproape 60 de ani. Scopul acestor analize a fost acela de a obține informații privind morfologia câmpului geomagnetic prin alte metode decât cele standardizate. În cadrul tezei am prezentat atât metologia folosită în INTERMAGNET cât și prin metode statistice și spectrale. Pentru realizarea acestor analize am creat secvențe de program utilizând pachetul software Matlab, Autosignal, MGR (pachet software realizat de Institutul Regal Belgian, pentru analiza semnalelor și reprezentări grafice), Surfer și Microsoft Office Excel.

Am făcut conversia datelor într-un format unic, pentru o perioadă foarte lungă de timp (aproape 6 decenii) cu rate de eșantionare diferite, și realizarea unor secvențe de program în acest scop. Pentru decompimarea fișierelor de date în fișiere ASCII, ale celor două sondaje magnetotelurice foarte lungi (prezentate în finalul capitolului 5) am utilizat programul Cygwin. Aceste fișiere cu peste  $17 \cdot 10^6$  linii, cu o dimensiune de aproape 1 Gb, au necesitat programe performante (Matlab) și timpi mari de rulare.

În funcție de tipul de analiză și scopul urmărit (evidențierea diferitelor periodicități: cicluri solare, anuale, lunare, zilnice, pulsații continue și neregulate) am utilizat rate diferite de eșantionare, de la 0,5 secunde, 1 secundă, 1 minut, mergând până la medii orare, triorare sau zilnice.

După crearea și adaptarea fișierelor datelor de intrare pentru diferite programe am folosit

mai multe modalități și concepte în analizele efectuate.

Referitor la rutinele de calcul realizate, pot concluziona următoarele aspecte semnificative care au stat la baza realizării acestora: medierea mobilă, linearizarea, derivata numerică, analiza spectrală folosind transformata Fourier rapidă, analiza timp-frecvență, wavelet, sinteza și analiza semnalelor, factorul de corelație, calculul iterativ al factorilor de corelație într-o fereastră mobilă.

Medierea mobilă funcționează ca un filtru „trece jos” în frecvență sau „trece sus” în perioadă. Prin eliminarea componentelor cu frecvență mare (funcție de mărimea ferestrei mobile utilizate) pot fi studiate preferențial periodicitățile mai mari decât o valoare dată.

Linearizarea semnalelor (conform metodei celor mai mici pătrate) oferă informații asupra trendului liniar al întregii serii analizate. Astfel pentru seriile foarte lungi (de câteva decenii) am extras panta variației seculare pentru fiecare componentă geomagnetică în parte. Pentru evidențierea pulsațiilor pe serii scurte de timp și cu rată de eșantionare foarte mică, linearizarea s-a dovedit a fi un procedeu foarte util pentru începutul analizei, prin eliminarea trendului ascendent sau descendent al unei variații periodice (diurnă, semidiurnă, orare, mergând până la pulsațiile cu un grad mai mare decât pulsația studiată).

Derivarea numerică a semnalelor în funcție de timp s-a dovedit a fi un indicator foarte precis și rapid (în timp real) pentru evidențierea începutului perioadelor agitate geomagnetic. În comparație cu coeficienții triorari folosiți în cadrul procedurilor INTERMAGNET, derivata numerică a semnalului în timp oferă o informație instantanee. Astfel valoarea acestei derivate poate crește cu câteva ordine de mărime în perioadele de agitație față de perioadele calme.

Creșterea derivatei numerice instantanee poate reprezenta începutul unei perioade cu perturbații geomagnetice. Acest lucru poate fi folosit ca prim indiciu pentru sistemele de alertă privind perturbațiile geomagnetice majore pentru operatorii infrastructurilor din domeniile energiei, comunicațiilor, aviației, etc.

Analiza spectrală furnizează informații importante în obținerea periodicităților din seriile de date geomagnetice. Totuși, constrângerile impuse de calculul transformatei Fourier determină limitări severe în rezoluția frecvențială, limitări ce devin inacceptabile dacă este necesar să se analizeze semnale de scurtă durată. Metodele spectrale prezintă fenomenul numit *scurgere spectrală* (*spectral leakage*) ca efect al convoluției dintre spectrul unei ferestre și spectrul semnalului, fapt care poate conduce la mascarea unor componente spectrale de amplitudine mică.

Prin analize spectrale am pus în evidență, pentru serii lungi de înregistrări, pe durata mai multor cicluri solare (1962-2006), periodicitățile de 11 și 22 de ani. Urmând aceleași procedee pentru serii medii de înregistrări multianuale (1958-1959, 2001-2004, 1998-2009) am evidențiat periodicitățile anuale, sezoniere și lunare. Pentru seriile mai scurte de date, am evidențiat periodicitățile diurne, semidiurne, de 8 ore și chiar mai mici. Pentru seriile foarte scurte și cu o frecvență mare de eșantionare precum și pentru câteva înregistrări magnetotelurice, am evidențiat diferite tipuri de pulsații (Pc1 – Pc6 și Pi1-Pi3).

În urma acestor analizelor spectrale se poate afirma că semnalele geomagnetice reprezintă convoluția dintre semnalele staționare monofrecvențiale de diferite amplitudini, asociate fenomenelor cu un domeniu foarte larg de periodicități și semnalele nedeterminate, asociate perturbațiilor geomagnetice și fenomenelor neperiodice.

Analizele timp-frecvență permit identificarea caracteristicilor de frecvență ale semnalului la un moment dat. Pentru aceasta se alege o fereastră mobilă, ce se deplasează de-a lungul semnalului, pornind de la momentul  $t_0$  la orice poziție pe axa temporală  $t_i$ . După analiza conținutul de frecvențe al fiecărei ferestre, se obține în final un spectru de frecvență bine localizat în timp.

Posibilitatea de a descompune (analiza) și a reconstrui (sinteza) semnalele recomandă metodologia wavelet ca un instrument eficient de studiu al câmpului geomagnetic.

Pentru analiza datelor geomagnetice, am ales și folosit varianta Morlet, deoarece are o rezoluție foarte bună în frecvență și o localizare acceptabilă în timp. Această rezoluție foarte bună în frecvență este facilitată și de utilizarea numerelor de undă foarte mici.

Pentru o perioadă de 45 de ani (1962-2006) am realizat analiza wavelet pentru componentele geomagnetice H, D și Hz atât pe datele inițiale (medii orare citite din magnetograme) cât și pentru diferențele dintre acestea și trendurile liniare date de variația seculară.

Pentru componenta H cele două reprezentări sunt aproape identice, deoarece această componentă nu este afectată, decât în foarte mică măsură, de variația seculară.

Pentru componentele D și Hz reprezentările inițiale și reprezentările efectuate după extragerea trendului liniar al variației seculare sunt foarte diferite. Astfel, în reprezentările cu trendul liniar extras, sunt puse în evidență foarte bine periodicitățile diurne, semidiurne, 8 ore și

6 ore. Aceste periodicități sunt localizate în timp, astfel în zilele calme sunt foarte bine reliefate, în timp ce pentru zilele cu perturbații acestea sunt estompate.

Alături de aceste analize statistico-spectrale un rol important, la începutul unui studiu geomorfologic al câmpului electromagnetic, îl are și analiza vizuală a magnetogramelor, care pot evidenția foarte ușor evenimente magnetice aperiodice cu o morfologie foarte diferită. Câteva caracteristici de amplitudine permit individualizarea acestor evenimente în câteva tipuri caracteristice și standardizate (impulsurile bruște - *si*, începuturi bruște de furtuni - *ssc*, erupțiile cromosferice - *sfe*, golfurile - *b* și pulsațiile) ce reflectă cauze externe legate de zone diferite din magnetosferă.

Astfel *si*-urile, de câțiva nT, ale componentelor geomagnetice sunt produse de o schimbare a intensității vântului solar la limita magnetosferei (la o distanță de circa 10 raze terestre). Atunci când are loc o schimbare rapidă a câmpului magnetic, cu câțiva nT sau zecimi de nT, magnetosfera este deformată (comprimată) către Pământ, conducând la apariția *ssc*-urilor, ce preced o furtună geomagnetică. *Sfe*-urile sunt provocate de o creștere bruscă a radiațiilor UV și a razelor X ce ionizează atmosfera înaltă și intensifică curenții electrici. *B*-urile sunt o consecință a intensificării electrojeturilor polare în timpul nopții.

Factorul de corelație prezintă creșteri importante atunci când între două serii de timp există relații cauzale, iar dacă există *n* serii de parametri înregistrați se pot studia relațiile cauzale pentru  $n*(n-1)/2$  perechi bidimensionale. Variația factorului de corelație, calculat pentru o fereastră mobilă ce conține *k* perechi de valori ( $x_i, y_i$ ), ce se deplasează cu pasul *p* pe întregul semnal indică, cu mare acuratețe, momentele în care se poate aprecia o cauză comună pentru două serii de valori. Aceste momente  $t_i$  sunt situate la jumătatea ferestrelor mobile în care are loc o creștere marcantă a factorului de corelație.

Am exemplificat corelațiile dintre două componente geomagnetice de la observatorul Surlari ( $H_x$  și  $H_y$ ) precum și corelațiile dintre două observatoare (Surlari și Camberra) pentru componenta  $H_x$ , din timpul unei furtuni geomagnetice. În ambele cazuri se constată o creștere semnificativă a factorului de corelație calculat pentru o fereastră mobilă de 10 eşantioane (10 minute) cu pasul de un eşantion (1 minut).

Înregistrările magnetotelurice, efectuate în diferite benzi de frecvențe înalte (cuprinse între 4 KHz și 2Hz) în domeniul timp, conduc la obținerea de informații despre pulsațiile de

frecvență mare ( $Pc1$  și  $Pi1$ ). Acest lucru nu poate fi obținut din datele de observator, a căror frecvență de achiziție este de maxim 2Hz.

Din analiza celor două sondaje magnetotelurice foarte lungi, rezultă că variațiile tuturor componentelor câmpului electromagnetic ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  și  $H_z$ ) au aceleași frecvențe, dar amplitudini diferite. În plus apar și defazaje între aceste variații.

Pe componentele electromagnetice înregistrate cu aparatura magnetotelurică pot fi puse foarte bine în evidență pulsațiile, deoarece există o deplasare a liniei de zero în timpul înregistrării. În acest fel oscilațiile de frecvență joasă sunt eliminate, fiind evidențiate doar oscilațiile de tipul pulsațiilor.

Pulsațiile continue de frecvență joasă sunt generate în special de instabilitățile de tip magneto-hidrodinamic, ale contactului dintre vântul solar și magnetopauză. Multe pulsații din banda de frecvență medie sunt cauzate de instabilitatea proton-ciclotron din vântul solar. Pulsațiile continue de frecvență înaltă se datorează în special instabilităților ion-ciclotron din magnetosferă unde energia instabilității provine de la perturbațiile anizotropice ale protonilor energetici.

Pulsațiile neregulate  $Pi$  sunt generate de fenomenele tranzitorii, precum impulsurile bruște din vântul solar.

Studiul pulsațiilor continue  $Pc$  aduce informații despre plasma din apropierea Pământului, iar investigarea variației pe termen lung a acestor pulsații, în cadrul observatoarelor, este importantă pentru studiul regiunilor de plasmă.

Un dezavantaj al înregistrărilor magnetotelurice îl reprezintă prezența zgomotelor antropice și naturale, în comparație cu măsurătorile din cadrul observatoarelor, unde zgomotele sunt foarte reduse.

Cele două tipuri de informații se completează reciproc și conduc la un studiu integrat al morfologiei câmpului electromagnetic.

Aceste analize au contribuit la evidențierea variabilităților câmpului geomagnetic și descifrarea morfologiei câmpului electromagnetic al Pământului pe baza datelor geomagnetice de observator (în mare parte) și a câtorva sondaje magnetotelurice.

## BIBLIOGRAFIE

Allan, W. and Poulter, E. M. – 1992 – *ULF waves-their relationship to the structure of the Earth's magnetosphere*. Rep. Prog. Phys. 55 533, doi:10.1088/0034-4885/55/5/001.

Anderson, P. W. and Kim, Y. B. – 1964 – *Hard Superconductivity: Theory of the motion of Abrikosov Flux Line*. Reviews of Modern Physics, pp. 39-43, Volume 36, Issue 1

Asimopolos, L., Peștină, A. M., Asimopolos, N. S. – 2010 – *Considerations on geomagnetic data analysis*, Chinese Journal of Geophysics – 53 (3), 765-772 pag., DOI:10.3969/j, issn: 0001.5733 , .2010.03-033.

AutoSignal - *User's Guide* - SeaSolve Software Inc., ISBN 81-88341-08-8

Bardeen, J.; Cooper, L. N., Schrieffer, J. R. – 1957 – *Theory of Superconductivity*, Physical Review 108 (5): 1175–1204.

Bartels, J., Heck, N. H., and Johnston, H. F. – 1939 – *The three-hour range index measuring geomagnetic activity*, Terr. Magn. Atmos. Electr., 44, 411–454.

Baumjohann, W. and Treumann, R. – 1996 – *Basic Space Plasma Physics*. Imperial College Press.

Cain, J. C., Hendricks, S. J., Langel, R. A. and Hudson, W. V. – 1967 – *A Proposed Model for the International Geomagnetic Reference Field 1965*, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, Vol 19, No 4.

Campbell, W. H. and Schiffmacher, E. R. – 1985 – *Quiet ionospheric currents of the northern hemisphere derived from geomagnetic field records*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 90, Issue A7, pages 6475–6486.

Campbell, W. H. and Schiffmacher, E. R. – 1988 – *Upper mantle electrical conductivity for seven subcontinental regions of the Earth*. Journal of Geomagnetism & Geoelectricity, 40: 1387 – 1406.

Campbell, W. H. – 1989 – *An Introduction to Quiet Daily Geomagnetic Fields*, Pageoph Topical Volumes, Vol. 131, pp 315-331.

Clarke, E., – 2001 – *Real Time Monitoring of Global Magnetic Activity: The Apest Index*. ESA Workshop on Space Weather. ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 14th – 16th December 2001.

Constable, C. – 2005 – *Geomagnetic Temporal Spectrum* (For the Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism Editors, David Gubbins and Emilio Herrera-Bervera)

Creangă, E., Munteanu, I., Bratcu, A. Și Culea, M. – 2001 – *Semnale, Circuite și Sisteme – Partea I: Analiza semnalelor* – Editura Academică.

Du, A., Huang, Q., Yang, S. – 2002 – *Epicenter location by abnormal ULF electromagnetic emissions*. Geophys. Res. Lett., 29(10):1455, DOI: 10.1029/2001GL013616.

Dungey, J. W. – 1967 – *Hydromagnetic waves in Physics of Geomagnetic Phenomena*. vol. 2 edited by S. Matsushita and W. H. Campbell, academic, New York

Gebbins, D., Herrero-Bervera, E. – 2007 – *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism* – Springer, ISBN 978-1-4020-4423-6.

Georgescu, P. – 1982 – *Prospecțiuni electrice*, Ed. Universității București.

Han, P., Huang, Q. H., Xiu, J. G. – 2009 – *Principal component analysis of geomagnetic diurnal variation associated with earthquakes: case study of the M6.1 Iwate-ken Nairiku Hokubu earthquake*. Chinese J. Geophy., 52(6), 1556~1563, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.017

Hattingh, M., Loubser, L. and Nagtegaal, D – 1989 – *Computer K-index estimation by a new linear-phase, robust, non-linear smoothing method*. Geophysical Journal International, Volume 99, Issue 3, pages 533–547.

Huang, Q., Ikeya, M. – 1998 – *Seismic electromagnetic signals (SEMS) explained by a simulation experiment using electromagnetic waves*. Phys. Earth Planet. Inter., 109(3-4): 107~114

Huang, Q. H., Liu, T. – 2006 – *Earthquakes and tide response of geoelectric potential field at the Niijima station*. Chinese J. Geophys., 49(6): 1745~1754.

Jankowski, J. and Marianiuk, J. – 1996 – *On the accuracy of data from magnetic observatories - yesterday and today*. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. Vol. M-18(273), 1996, s.75-86.

Kamide Y. – 2006 – *Geomagnetic storms* – Solar Terrestrial Environment Laboratory Nagoya University, Japan.

Kamide, Y., Chian, A. C. L. – 2007 – *Handbook of the Solar – Terrestrial Environment*, Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-540-46314-6.

Kivelson, M. G. and Russell, C. T. – 1995 – *Introduction to Space Physics*, Edited by Margaret G. Kivelson and Christopher T. Russell, pp. 586. ISBN 0521451043, Cambridge University Press

Langel, R. A., Phillips, J. D. And Horner, R. J. – 1982 – *Initial scalar magnetic anomaly map from MAGSAT*, Geophysical Research Letters 9, pp. 269-272

Langel, R. A. – 1987 – *The main field, in Geomagnetism*, edited by Jacobs, J. A., I ed., Academic Press, London, vol. 1, pp. 249-512.



Lanzerotti, L. J., MacLennan, C. G. and Fraser-Smith, A.C. – 1990 - *Background magnetic spectra:  $\approx 10^{-5}$  to  $\approx 10^5$  Hz*, Geophys. Res. Lett., 17,1593.

Lanzerotti, L. J., Surkan, A. J. – 1974 – *ULF geomagnetic power near L=4,4. Relationship to the Fredericksburg K index*, Journal of Geophysical Research 79, doi: 10.1029/JA079i016p02413, ISSN 0148-0227.

Loomer, E. I. – 1980 – *Variation of geomagnetic activity with latitude and time*, Geomagnetic Bulletin No. 1-80, Earth Physics Branch, Ottawa.

Maus, S. and Macmillan, S. – 2005 – *The 10th Generation International Geomagnetic Reference Field*, Physics of the Earth Planetary Interiors. 151: 320-322.

Maus, S. – 2006 – *Plane and Spherical Harmonic Representations of the Geomagnetic Field: Tutorial*, CIRES, University Colorado, Denver, CO

Mayaud, P.N. – 1980 – *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices*. Geophysical Monograph 22. Washington, DC: American Geophysical Union.

McPherron, R. L., – 2002 – *Magnetic pulsations: their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity*, Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Santa Fè.

Menviell, M. – 1979 – *A possible geophysical meaning of K indices*, Annales de Geophysique, vol. 35, Oct.-Dec. 1979, p. 189-196.

Menvielle, M., Papitashvili, N., Hakkinen, L. and Sucksdorff, C. – 1995 – *Computer production of K-indices: Review and comparison of methods*, Geophys. 1. International, 123, 866-886.

Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L. – 1998 – *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. International Geophysics Series, Volume 63, Academic Press, ISBN 978-0124912465.

Mertins, A. – 1999 – *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications* - John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 9780471986263

Misiti, M., Misiti Y., Oppenheim, G., Poggi J.-M. – 2011 – *Wavelet Toolbox, Getting Started Guide*, The MathWorks, Inc.

Nagao, T., Enomoto, Y., Fujinawa, Y., et al. – 2002 – *Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake*, J. Geodyn., 33(4-5), 401~411

Nowozynski, K., Ernst, T. and Jankowski, J.A. – 1991 – *Adaptive smoothing method for computer derivation of Kindices*. Geophysical Journal International, 104, 85-93.

Olsen, N., Lühr, H., Sabaka, T. J., Manda, M., Rother, M., Tøffner-Clausen, L. and Choi, S – 2006 – *CHAOS—a model of the Earth's magnetic field derived from CHAMP, Ørsted, and SAC-C magnetic satellite data*, Geophysical Journal International, Vol. 166, Issue1, pp 67-75.

Packard, M. and Varian, M. – 1954 – *Free nuclear induction in the Earth's magnetic field*, Phys. Rev. 93, 941-944.

Pan George W. – 2003 – *Wavelets in Electromagnetics and Device Modeling*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Panaiotu, C. G. – 2006 – *Geomagnetism* – Ed. Ars Docendi, ISBN 978-973-558-240-1

Reda, J. and Jankowski, J. – 2004 – *Three hour activity index based on power spectra estimation*, Geophys. J. Int. 157, 141-146.

Riddick, J. C. and Stuart, W.F. – 1985 – *The Generation of K Indices from Digitally Recorded Magnetic Data*. Geomagnetic and Observatory and Survey Practice, ISBN 978-94-010-8833-6.

Rokityansky, I.I. – 1982 – *Geoelectromagnetic investigation of the Earth's crust and mantle*. Springer-Verlag, New York.

Sabaka, T. J., Olsen, N. and Langel, R. A. – 2002 – *A comprehensive model of the quiet-time, near-Earth magnetic field: Phase 3*. *Geophys J Int* 151 32-68

Sabaka, T. J., Olsen, N., and Purucker, M. E. – 2004 – *Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Oersted and CHAMP data*. *Geophys J Int* 159 521-547

Saito, T. – 1978 – *Long period irregular magnetic pulsations*, *Space Sci. Rev.* 21,427

Samson, J. C. – 1991 – *Geomagnetic pulsations and plasma waves in the earth's magnetosphere, in Geomagnetism*, Vol. 4, ed. By J.A. Jacobs, Academic Press.

Shawhan, S. D. – 1979 – *Magnetospheric plasma wave researche 1975 – 1978* – *Rev. Geophys.*, *Space Phys.* 17, 705.

Sims, W. E., Bostick, F. X. and Smith, H. W. –1971 – *The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data*. *Geophysics.* 36. 938—942.

Southwood, D. J., Stuart, W. F. – 1979 – *Pulsations at the substorm onset, in Dynamics of the Magnetosphere*, ed. S.-I. Akasofu, p.341, Riedel, Dordrecht, Holland.

Sucksdorff, C., Pirjola, R. and Häkkinen, L. – 1991 – *Computer production of K –indices based on linear elimination*. *Geophys. Trans.*, 36, 333–345.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. – 2004 – *Applied Geophysics (Second Edition)* – Cambridge University Press.

Torrence, C., Compo, G. P. – 1998 – *A Practical Guide to Wavelet Analysis* – Bulletin of the American Meteorological Society – Vol. 79, No. 1, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado.

Vetterli, M. and Kovačević, J. – 1995 – *Wavelets and Subband Coding*. Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey.

Yang, W.Y., Cao, W., Chung, T-S. and Moris, J. – 2005 – *Applied Numerical Methods Using Matlab* – a John Wiley&Sons, Inc.Publication

Yagi, Y. and Fukahata, Y. – 2011 – *Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release* - Geophysical Research Letters, vol. 38, 119307, 5 pp., doi:10.1029/2011gl048701.

Site-uri Web:

<http://core2.gsfc.nasa.gov/CM>

<http://geomag.usgs.gov/>

<http://www.intermagnet.org>

<http://www.mathworks.com>

<http://www.noaa.gov>

<http://www.wdc.bgs.ac.uk>

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

<http://ro.wikipedia.org>