



INSTITUTUL DE
ȘTIINȚE SPAȚIALE
Filială INFLPR

Program STAR

Contract Nr. 20 / 2012

Electrodinamică aurorală cu Swarm

ALEOS

II. RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

ETAPA 3

Evenimente Swarm în zona aurorală

Octav Marghitu, Costel Bunescu, Dragoș Constantinescu,

Adrian Blăgău, Vlad Constantinescu, Horia Comișel

GRUPUL DE PLASMĂ SPAȚIALĂ ȘI MAGNETOMETRIE

Decembrie 2014

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

1. Titlu proiect

Electrodinamică aurorală cu Swarm

(în Propunerea de Proiect: Auroral electroynamics with Swarm – ALEOS)

2. Obiective generale/specifice proiect

Conform Secțiunii 1.1, *Concept and Objectives*, a Propunerii de Proiect:

Proiectul ALEOS se va concentra pe electrodinamica ionosferei, cu accent pe regiunea aurorală – unde liniile de câmp magnetic asigură o legătură directă între ionosfera–termosfera colisională și magnetosfera necolisională. Măsurătorile Swarm în trei puncte, conjugate în anumite momente cu date la sol, vor face posibilă o examinare sistematică a închiderii ionosferice a curenților asociate cu aurora. Datele de câmp magnetic, câmp electric și vânt neutru furnizate de Swarm, împreună cu valorile conductanței Pedersen și Hall obținute direct, din observații radar conjugate (e.g. EISCAT), sau indirect din datele Swarm, vor permite explorare fără precedent a curenților ionosferici și conexiunii acestora cu curenți aliniați, atât pe scala arcului cât și pe scala ovalului auroral – pentru diverse zone de timp local, niveluri de activitate magnetică și faze în ciclul subfurtunilor. (...)

Obiectivele specifice ale proiectului ALEOS sunt:

- (a) Observarea gradientilor în lungul arcului auroral (în câmp electric, curenți aliniați, etc) și ajustarea modelelor prezente de arc, predominant 1D.
- (b) Examinarea electrodinamicii 2D a aurorei, cu ajutorul datelor de la toți cei trei sateliți Swarm.
- (c) Considerarea influenței vântului neutru asupra electrodinamicii aurorale.
- (d) Investigarea rolului ionosferei–termosferei în sistemul cuplat magnetosferă–ionosferă–termosferă, folosind atât date Swarm cât și observații de la altitudini mai înalte, în particular de la misiunile Cluster și THEMIS.

3. Nr. etapa / Denumire etapa

Etapa III. Evenimente Swarm în zona aurorală (conform *Plan de Realizare*)

4. Obiective Etapa

Conform *Work Package 2 și 3* (obiective și activități relevante pentru a treia Etapă):

Analiză evenimente Swarm de tip arc auroral și 2D aurora.

Selecție intervale Swarm promițătoare, 2 și 3 sateliți.

5. Rezultate planificate Etapa

Dezvoltarea tehnicii de analiză a curenților aliniați

Caracterizarea structurilor de curent aliniați observate de Swarm.

6. RST - raport stiintific si tehnic in extenso – maxim 20 pagini pentru etapa intermediara

Raportul stiintific si tehnic trebuie sa cuprinda urmatoarele aspecte:

- Rezumatul etapei
- Descrierea stiintifica si tehnica, cu punerea in evidenta a rezultatelor etapei si a gradului de realizare a obiectivelor - se vor indica rezultatele si modul de diseminare a rezultatelor;

6.1. Rezumatul etapei

Misiunea multi-satelit Swarm are ca principal obiectiv investigarea câmpului magnetic terestru, prin cuantificarea atât a surselor interne ale câmpului cât și a contribuțiilor externe – datorate curenților electrici din ionosferă și magnetosferă. Proiectul ALEOS își propune aprofundarea investigațiilor referitoare la electrodinamica ionosferei aurorale și la cuplajul acesteia cu magnetosfera, în particular prin intermediul curenților aliniați cu câmpul magnetic (*field-aligned currents, FAC*).

În raportul de față ne vom concentra pe exploatarea datelor de câmp magnetic măsurate de Swarm, date ce permit caracterizarea structurilor de curent aliniat. Datele măsurate pot fi accesate pe site-ul ftp al misiunii, iar efortul depus în cadrul proiectului STAR *VALidation of Swarm L-1b data using multi-point gradient estimation techniques (VALS*, director de proiect Dr. Adrian Blăgău) permite determinarea perturbației câmpului magnetic măsurat față de câmpul de model, necesară pentru caracterizarea curenților aliniați. Alte două categorii de date necesare pentru examinarea electrodinamicii ionosferei, datele de câmp electric și cele referitoare la atmosfera neutră, sunt deocamdată în curs de calibrare / validare și nu pot fi utilizate în scopuri științifice.

ALEOS beneficiază de parteneriatele internaționale ale Grupului de Plasmă Spațială și Magnetometrie (GPSM) din ISS, în particular de interacția cu experți de la Jacobs University Bremen (JUB), German Research Centre for Geosciences (GFZ) Potsdam, University of Calgary (UC), Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Finnish Meteorological Institute (FMI) Helsinki, Institute for Space Physics (IRF) Kiruna – implicați în propunerea ALEOS, acceptată de ESA în Februarie 2012.

Proiectul ALEOS interacționează de asemenea cu proiectele PN2 *Magnetosphere–ionosphere coupling in the auroral region (M–ICAR*, program Idei, director de proiect Dr. Octav Marghitu) și *Excitation, propagation and dissipation of ULF waves in the magnetosphere (ERODIUM*, program Resurse Umane, director de proiect Dr. Dragoș Constantinescu). Complementaritatea proiectelor ALEOS și M–ICAR a permis depășirea dificultăților legate de reducerea finanțării proiectelor Idei în anul 2014 și obținerea de rezultate relevante pentru ambele proiecte.

În cele ce urmează vom aprofunda tehnica introdusă în Raportul științific precedent, în particular componenta dedicată examinării orientăției structurilor de curent aliniat planare, bazată pe analiza varianței câmpului magnetic (*minimum variance analysis, MVA*). În Secțiunea 6.2.1 vom prezenta o dezvoltare a tehnicii descrise în Raportul precedent, susținută analitic și testată cu date sintetice. Discuțiile desfășurate în cadrul colaborării dintre ISS București și Institut für Weltraumforschung (IWF) Graz au contribuit semnificativ la dezvoltarea prezentată (proiect *Ultra-low frequency waves in the magnetosphere (ULF–MAG)*, directori de proiect Dr. Dragoș Constantinescu, ISS București, și Dr. Yasuhito Narita, IWF Graz). În Secțiunea 6.2.2 vom aplica această tehnică la explorarea preturbației ΔB a câmpului magnetic, observate de cei trei sateliți Swarm la o traversare a ovalului auroral. În Secțiunea 6.2.3 listăm rezultatele obținute în cadrul proiectului – articole publicate sau în curs de pregătire și comunicări la conferințe / seminarii.

6.2. Descrierea științifică și tehnică

6.2.1. Dezvoltarea și testarea tehnicii de analiză a curentului aliniat

Analiza de varianță se bazează pe continuitatea componentei normale a câmpului magnetic, B , la traversarea unei discontinuități, consecință a legii fundamentale $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$. În aplicațiile de fizica plasmei spațiale, tehnica MVA pornește de la această lege pentru a identifica direcția normală la o discontinuitate drept acea direcție după care varianța câmpului magnetic – măsurat experimental – este minimă (Sonnerup și Cahill, 1967; Sonnerup și Scheible, 1998). De regulă, discontinuitățile în plasmă magnetizată sunt asociate cu structuri de curent, iar aplicarea MVA permite atât determinarea locală a normalei la discontinuitate cât și evaluarea geometriei structurii de curent – pe baza valorilor și vectorilor proprii ai matricii de varianță (Sonnerup și Scheible, 1998). Un exemplu standard de utilizare a MVA este legat de caracterizarea magnetopauzei – care, de altfel, a și generat dezvoltarea metodei (Sonnerup și Cahill, 1967). Misiunile multi-satelit, cum sunt Swarm sau, înaintea

ei, Cluster (Escoubet et al., 2001), permit combinarea MVA cu tehnici de timing și investigarea atât a geometriei cât și a dinamicii structurii de curent. Un exemplu de investigare, în acest fel, a magnetopauzei este furnizat de Blăgău et al. (2010).

Spre deosebire de câmpul magnetic observat de Cluster la altitudine de câteva raze terestre (până la cca. 20 de raze terestre sau cca. 120.000 km), unde influența sistemelor de curenți din magnetosferă poate prevala, câmpul magnetic observat de Swarm la cca. 500 km altitudine este dominat de componenta internă a câmpului geomagnetic. În particular, structurile de curent aliniat observate deasupra ovalului auroral produc perturbații ale câmpului magnetic perpendiculare pe câmpul geomagnetic de origine internă, cu magnitudini ce nu depășesc, de regulă, 1% din valoarea câmpului intern. În acest caz, câmpul magnetic asociat curenților aliniați poate fi analizat în planul perpendicular pe câmpul magnetic (plan, în același timp, aproximativ paralel cu planul ionosferei), ceea ce reduce dimensionalitatea problemei de la 3D (e.g. în studiul magnetopauzei) la 2D.

Așa cum am arătat în Raportul precedent, structurile FAC deasupra ovalului auroral reprezintă superpoziții de curenți aliniați cu diferite scale spațiale și temporale, a căror caracterizare necesită o explorare continuă și multi-scală a intervalelor de timp de interes. În Raportul precedent ne-am concentrat pe examinarea structurilor FAC planare, folosind atât informație MVA, referitoare la orientarea structurii, cât și informație de timing, care împreună cu orientarea permite determinarea vitezei structurii – cu condiția ca această structură să fie într-adevăr planară. În raportul de față vom aprofunda analiza MVA, atât în ce privește determinarea locației și evaluarea scalei structurilor FAC, cât și în ce privește evaluarea planarității. Descrierea acestei tehnici și aplicarea ei unui eveniment observat de Cluster, conjugat cu date optice la sol, fac obiectul unui articol în pregătire (v. 6.2.3.1).

În cele ce urmează vom numi ‘plană’ o structură FAC de tip foaie, a cărei amprentă în planul perpendicular pe câmpul magnetic intern este o linie dreaptă. Atunci când curentul aliniat este suficient de intens, această amprentă (aproximativ) 1D corespunde arcului auroral (în mod ideal, infinit lung, în realitate cu lungimea mult mai mare decât lățimea). În acest caz, câmpul magnetic asociat variază semnificativ doar în direcția normală pe arc, în timp ce în direcție tangențială profilul câmpului magnetic este (relativ) uniform. Curenții aliniați asociați cu forme aurorale mai complexe pot avea geometrii mai complicate, 2D, înțelegând prin aceasta că variația câmpului magnetic este semnificativă indiferent de direcția aleasă. În acest caz nu poate fi identificată o direcție privilegiată, în lungul căreia structura de curent să fie relativ uniformă. Exemplul ‘ideal’ pentru o astfel de structură îl oferă un curent aliniat filamentar, pentru care variația câmpului magnetic nu depinde de direcție.

Foaia și filamentul de curent reprezintă configurații ideale de curenți aliniați: în cazul foii, varianța câmpului magnetic este nulă în direcție paralelă cu arcul asociat, în timp ce pentru filament varianța este aceeași în orice direcție. În termeni matematici, caracterul mai degrabă planar sau mai degrabă filamentar al unei structuri de curent aliniat poate fi exprimat cu ajutorul valorilor proprii ale matricii de varianță a câmpului magnetic. Astfel, dacă vectorii câmp magnetic asociați traversării unei structuri de curent aliniat, $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n$, se descompun după două axe rectangulare, x, y , în planul perpendicular pe câmpul geomagnetic de origine internă, matricea de varianță se definește:

$$M = \begin{pmatrix} \langle B_x^2 \rangle - \langle B_x \rangle^2 & \langle B_x B_y \rangle - \langle B_x \rangle \langle B_y \rangle \\ \langle B_x B_y \rangle - \langle B_x \rangle \langle B_y \rangle & \langle B_y^2 \rangle - \langle B_y \rangle^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

unde paranteza unghiulară $\langle \rangle$ indică valoarea medie. Matricea M este simetrică iar cele două valori proprii reale ale lui M , λ_1 și λ_2 , cu $\lambda_1 \geq \lambda_2$, reprezintă varianța maximă, respectiv minimă, a câmpului magnetic, înregistrată în lungul direcției definite de vectorul propriu corespunzător. În cazul particular al foii de curent, $\lambda_2 = 0$ (varianța componentei normale a câmpului magnetic este nulă), raportul valorilor proprii este la rândul lui nul, $\lambda_2/\lambda_1=0$, iar unghiul normalei la foaie, θ , cu axa x este:

$$\tan \theta = -v_{1x}/v_{1y} \quad (2)$$

unde v_{1x} și v_{1y} sunt componentele vectorului propriu asociat λ_1 . În cazul filamentului, cele două valori proprii sunt comparabile, $\lambda_1 \cong \lambda_2$ (valoarea exactă depinde de distanța traiectoriei satelitului față de centrul filamentului și de durata intervalului supus MVA, v. mai jos), iar raportul $\lambda_2/\lambda_1 \cong 1$. Se observă că raportul valorilor proprii, λ_2/λ_1 , cu valori între 0 și 1, oferă un criteriu cantitativ de estimare a planarității unei structuri de curent aliniat, cu $\lambda_2/\lambda_1 = 0$ corespunzând structurilor riguros planare iar $\lambda_2/\lambda_1 \cong 1$ structurilor filamentare (cilindrice). Remarcăm faptul că o astfel de parametrizare simplă a planarității unei structuri de curent este posibilă, în particular, pentru curentul aliniat, deoarece în acest caz analiza poate fi făcută în planul perpendicular pe câmpul magnetic principal. În cazul general, al structurilor de curent în spațiul tri-dimensional, matricea de varianță are trei valori proprii, două rapoarte de valori proprii sunt independente, iar discuția geometriei diverselor structuri de curent necesită, corespunzător, o tratare mai elaborată.

În ciuda formei simplificate a matricei de varianță, de dimensiune 2×2 față de 3×3 în cazul general, evaluarea datelor de câmp magnetic asociate curenților aliniați, observate experimental deasupra ovalului auroral, prezintă o serie de dificultăți. Structurile de curent aliniat traversate de un satelit pot avea locații, scale, geometrii și orientări diverse, necunoscute a priori, în timp ce analiza MVA standard descrisă mai sus oferă doar informație despre geometria structurii FAC și, eventual, orientarea acesteia (pentru structurile aproximativ planare). Chiar și această informație poate fi eronată, dacă durata intervalului supus MVA nu este compatibilă cu scala temporală și / sau spațială a structurii investigate:

- În ce privește scala temporală, rezultatele obținute au sens doar pentru structuri rezonabil de stabile, al căror timp de viață este cel puțin comparabil cu durata intervalului MVA. În lipsa informației optice conjugate (e. g. de la observatoare terestre), evaluarea stabilității unei structuri necesită cel puțin două puncte de măsură succesive – așa cum furnizează deasupra ovalului auroral misiunea Cluster și, mai nou, misiunea Swarm. Dacă profilul datelor măsurate succesiv nu se schimbă semnificativ, timpul de viață al structurilor observate este cel puțin comparabil cu decalajul între sateliții respectivi.
- Odată condiția de stabilitate îndeplinită, acuratețea rezultatelor MVA depinde de relația dintre dimensiunea spațială asociată intervalului de timp analizat (prin multiplicare cu viteza satelitului) și scala structurii observate (sau, echivalent, între durata intervalului și timpul necesar satelitului să traverseze structura). Dacă, de exemplu, o structură filamentară de rază R este analizată pe intervale cu dimensiuni asociate mult mai mici, $d \ll 2R$, analiza MVA va indica, în mod eronat, o structură planară. Dacă $d \gg 2R$ efectul structurii filamentare poate deveni neglijabil. Pentru aplicarea cu succes a MVA, d trebuie să fie comparabil cu scala structurii, e. g. în cazul filamentului $d \cong 2R$.

În practică, analiza MVA se realizează folosind o fereastră alunecătoare, de durată fixă, compatibilă (în sensul descris mai sus) cu o scală spațială dată – stabilită, de regulă, prin examinarea datelor. Această abordare are două neajunsuri:

- În primul rând, nu ține cont de caracterul multi-scală al curenților aliniați și, în acest sens, o analiză bazată pe o scală pre-definită nu poate fi decât incompletă. Un inconvenien derivat este legat de necesitatea examinării datelor pentru alegerea scalei, ceea ce exclude posibilitatea unei procesări automate.
- În al doilea rând, pre-definirea unei scale, prin alegerea duratei ferestrei alunecătoare, exclude o determinare self-consistentă a acestei scale în procesul de analiză a datelor.

Dezvoltarea tehnicii MVA propusă și ilustrată în continuare elimină aceste neajunsuri. Caracterul multi-scală al structurilor de curent este explorat cu ajutorul unui set de ferestre alunecătoare de largime (width) $w_{min} \leq w \leq w_{max}$ și rezoluție δw , unde parametrii w_{min} , w_{max} și δw depind de structurile FAC avute în vedere și de rezoluția datelor satelitare (vom reveni la alegerea practică a

acestor parametri în Secțiunea 6.2.2, pentru condițiile specifice măsurătorilor de câmp magnetic Swarm). Întrucât precizarea unui interval de timp necesită două mărimi, centrul intervalului, t , și durata, w , prezentarea rezultatelor MVA utilizează în mod natural un format de tip spectrogramă, cu t în abscisă, w în ordonată și rezultatul specific (e. g. raportul λ_2/λ_1 sau unghiul θ) codat în culoare.

Evaluarea self-consistentă a scalei unei structuri FAC ridică o problemă mai dificilă și se bazează pe evaluarea derivatei valorii proprii maxime în raport cu lărgimea ferestrei, $\partial\lambda_1/\partial w$. Printr-un calcul analitic relativ laborios (dar, în principiu, elementar) se poate demonstra că în cazul particular al unei foi uniforme de curent de lărgime d , această mărime își atinge maximul absolut în punctul (t_0, w_0) , cu t_0 centrul foi și $w_0 = d$. La momente anterioare sau ulterioare lui t_0 , maximul este atins în lungul liniilor $w = d + 2|t-t_0|$ dacă $|t-t_0| > 0.14 d$, respectiv $w = d - 2|t-t_0|$ dacă $|t-t_0| < 0.14 d$. Segmentele $|t-t_0| > 0.14 d$ sunt mult mai lungi decât segmentele $|t-t_0| < 0.14 d$, astfel că spectrograma $\partial\lambda_1/\partial w$ asociată unei foi uniforme de curent, în planul (t, w) , este dominată de o 'semnătură' în forma literei 'V', cu vârful în punctul (t_0, w_0) . Valoarea maximă atinsă de $\partial\lambda_1/\partial w$ în acest punct este:

$$(\partial\lambda_1/\partial w)_{\max} = \delta B^2/6d \quad (3)$$

cu δB variația de câmp magnetic asociată traversării foi de curent. Maximul local de pe laturile 'V'-ului, pentru care se poate obține de asemenea o expresie analitică, scade relativ lent cu distanța față de vârf.

Așa cum arătăm mai jos, spectrograma $\partial\lambda_1/\partial w$ oferă informație în ce privește locația și scala structurii traversate, nu și în ce privește caracterul mai degrabă planar sau mai degrabă filamentar al acestei structuri. O foaie de curent de lărgime d și un filament de curent de diametru d produc spectrograme $\partial\lambda_1/\partial w$ asemănătoare (dacă densitățile de curent sunt comparabile) iar pentru evaluarea planarității structurii FAC este necesară examinarea simultană a spectrogramei raportului valorilor proprii, λ_2/λ_1 . În plus, pentru estimarea orientăției, θ , în cazul structurilor planare, este necesară spectrograma $\theta(t, w)$, unde unghiul θ , între normala la structura FAC și axa x a sistemului de coordonate ales, poate fi calculat folosind Ec. (2).

În cele ce urmează, formatul standard de prezentare a rezultatelor, utilizat atât pentru testele pe date sintetice cât și pentru datele observate de sateliții Swarm, va include seriile temporale ale componentelor câmpului magnetic, $(B_x(t), B_y(t), B_z(t))$, și cele trei spectrograme: $\partial\lambda_1/\partial w$, λ_2/λ_1 , θ , în coordonate (t, w) , care oferă informație referitoare la: locația și scala, planaritatea, respectiv orientarea structurilor FAC.

Figura 1 prezintă rezultate obținute pentru date sintetice corespunzătoare unei foi de curent paralelă cu axa y , lată de 100 km (Fig. 1a, 1d), respectiv pentru un filament de curent centrat în originea sistemului de coordonate, cu diametrul de 100 km (Fig. 1b, 1c, 1e, 1f). Satelitul virtual traversează structurile de curent cu o viteză de 1 km/s iar rezoluția măsurătorilor este de 1 Hz, i.e. coordonatele t și w pot fi convertite direct în kilometri. Foaia de curent este traversată perpendicular, de-a lungul axei x (Fig. 1a, 1d), iar filamentul paralel cu axa x , la două distanțe de centru, $y_1=d/4$ (Fig. 1b, 1e) și $y_2=d$ (Fig. 1c, 1f). Momentul de trecere prin centrul structurii este ales, arbitrar, ora 12:00, iar variația totală $\delta B_y = 400$ nT (în cazul filamentului, pentru traversarea de-a lungul axei x ; acest caz nu este prezentat în figură). Pentru fiecare traversare sunt simulate două cazuri, corespunzând la două nivele de zgomot normal (distribuție gaussiană): în primul caz (Fig. 1a, 1b, 1c) lărgimea σ a distribuției de intensitate a zgomotului este 1% din variația totală δB_y , în timp ce în al doilea caz (Fig. 1d, 1e, 1f) σ este 10% (4 nT respectiv 40 nT). Spectrogramele sunt realizate pentru valori w între $w_{\min}=10$ și $w_{\max}=400$, cu un pas $\delta w=5$.

Atât în cazul foi cât și în cazul filamentului, spectrogramele $\partial\lambda_1/\partial w$ indică în mod corect locația și scala structurii de curent: abscisa 'punctului' roșu din paneelele corespunzătoare ale Fig. 1a, 1b coincide cu centrul foi / filamentului iar ordonata este $y \cong 100$ km. Chiar dacă creșterea nivelului de zgomot de la 1% la 10% (Fig. 1d, 1e) micșorează acuratețea rezultatului, informația rămâne, în esență, corectă (în condiții de zgomot intens, peste nivelul întâlnit, de regulă, în practică). Valoarea

maximă $\partial\lambda_1/\partial w$ și semnătura în formă de 'V' sunt în acord cu calculele analitice descrise succint mai sus. În figură, $\partial\lambda_1/\partial w$ nu este scalat cu $1/\delta w=1/5$, astfel că valoarea maximă, cca. $1300 \text{ nT}^2/\text{km}$, este de 5 ori mai mare decât cea indicată în Ec. (2), i.e. $400^2/600=267 \text{ nT}^2/\text{km}$. În cazul traversării la distanță d față de centrul filamentului (Fig. 1c, 1f), precizia determinării locației și scalei este deteriorată, deoarece nivelul relativ al zgomotului față de semnalul util este mai mare.

Raportul valorilor proprii pentru foaie este net diferit față de cel obținut pentru filament. Așa cum era de așteptat, acest raport este foarte mic în interiorul și vecinătatea foii (funcție de lățimea ferestrei), în timp ce în exterior este practic egal cu 1 (în acord cu faptul că zgomotul este presupus

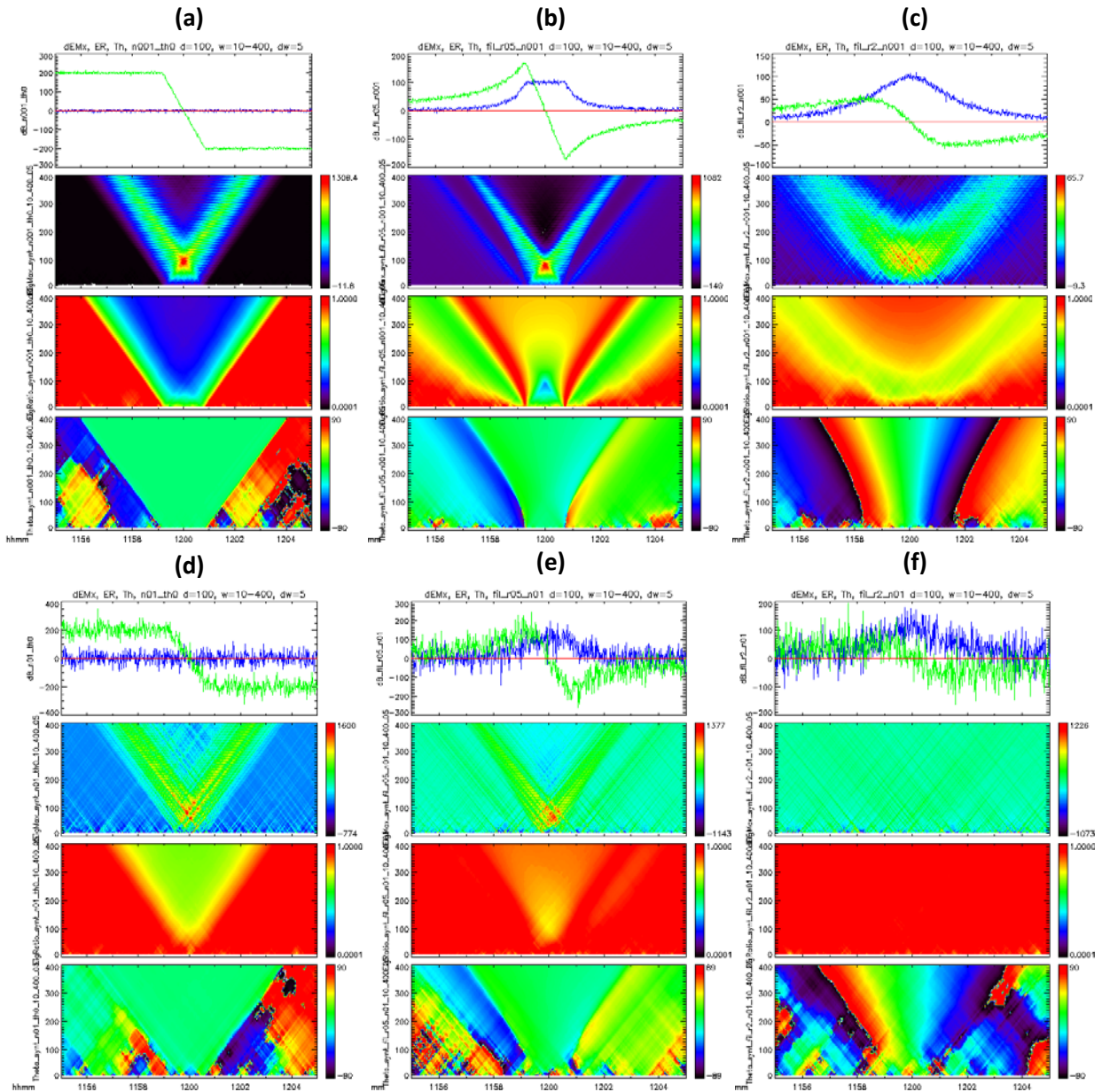


Figura 1. Rezultate MVA, date sintetice, la traversarea normală a unei foi de curent paralele cu axa y (a, d), respectiv la traversarea paralelă cu axa x a unui filament de curent centrat în origine (b, c, e, f). Lățimea foii, respectiv diametru filamentului, este $d = 100 \text{ km}$, iar variație $\delta B_y = 400 \text{ nT}$ (în cazul filamentului, pentru traversarea după axa x). Rezultatele sunt prezentate pentru două nivele diferite de zgomot gaussian, 1% din δB_y în paneele de sus (a, b, c), respectiv 10% din δB_y în paneele de jos (d, e, f). Pentru filament sunt arătate rezultate corespunzătoare unei traversări paralele cu axa x la distanța $0.25 d$ față de centru (b, e), respectiv la distanța d față de centru (c, f). În fiecare panel sunt reprezentate componentele B_x (albastru), B_y (verde), $B_z = 0$ (roșu) ale câmpului magnetic, împreună cu spectrogramele $\partial\lambda_1/\partial w$, λ_2/λ_1 , θ , în coordonate (t, w) . Spectrogramele sunt realizate pentru valori w între $w_{min}=10$ și $w_{max}=400$, cu un pas $\delta w=5$.

izotrop). În cazul filamentului, raportul valorilor proprii este cu ordine de mărime mai mare în vecinătatea structurii de curent, ceea ce confirmă posibilitatea discriminării structurilor filamentare față de cele planare. Variația nivelului de zgomot afectează (previzibil) acuratețea rezultatelor, fără ca diferența calitativă între cazul planar și cel filamentar să se schimbe. În cazul planar, orientația aleasă, $\theta=0^\circ$, este determinată corect chiar și pentru nivelul de zgomot ridicat.

De notat prezența unui 'punct' cu raport λ_2/λ_1 mic în Fig. 1b, corespunzător intervalului de timp centrat pe axa y (ora 12:00 în figură), de durată corespunzătoare lărgimii filamentului. Chiar dacă profilul 'punctual' al câmpului magnetic nu diferă de cel asociat unei structuri planare, astfel că raportul 'punctual' al valorilor proprii este foarte mic, imaginea de ansamblu în planul (t, w) diferă substanțial de cea asociată unei structuri planare.

6.2.2. Caracterizarea structurilor de curent aliniat observate de Swarm

Aplicarea tehnicii descrise mai sus structurilor de curent aliniat observate experimental nu este trivială, datorită domeniilor largi de variație a scalei structurilor, d (de la ~ 100 m la ~ 100 km), și perturbației magnetice asociate, δB (de la ~ 1 nT la ~ 1000 nT). Corespunzător, variația $\partial\lambda_1/\partial w$ poate acoperi mai multe ordine de mărime, ceea ce impune o reprezentare logaritmică în culoare pentru mărimea respectivă (la fel pentru λ_2/λ_1). La rândul său, plaja de variație a lărgimii ferestrei alunecătoare, w , trebuie sincronizată cu domeniul scalelor d , ceea ce recomandă utilizarea unei scale logartimice și pentru axa y a spectrogramelor. În cele ce urmează vom folosi totuși o scală liniară în y , pentru a facilita comparația spectrogramelor $\partial\lambda_1/\partial w$ cu profilul 'V' din testele pe date sintetice (utilizarea scalei logaritmice în y transformă profilul 'V' în 'Y' iar vârful este mai greu de identificat).

Superpoziția diverselor structuri creează, în practică, un 'model' relativ complicat, în care asocierea unui 'vârf' (punct de maxim) cu o structură dată cere o examinare atentă și coroborată a întregii informații disponibile, inclusiv seriile temporale. Figura 2 ne ajută să detaliem o astfel de examinare, pentru o traversare Swarm a ovalului auroral sudic din 29 Iunie 2014, 10:50–11:15 UT, cu aproximație în planul meridian 1 noaptea / 1 ziua.

În panelurile (a)–(c) este prezentată întreaga traversare, pentru toți cei trei sateliți, folosind date de rezoluție joasă, 1 Hz. Lărgimea w a ferestrei alunecătoare este variată între 5 și 300 s, cu un pas de 5 s. Dată fiind viteza Swarm de cca. 7.5 km/s, rezoluția spațială asociată este 7.5 km iar setul de ferestre acoperă intervalul 37–2250 km cu un pas de 37 km. Acești parametri sunt rezonabili pentru examinarea structurii de scală largă a curenților aliniați, cu două sisteme de curenți ascendent / descendent în zona 1 noaptea, respectiv 1 ziua. Atât seriile temporale ΔB cât și spectrogramele $\partial\lambda_1/\partial w$ indică aceste sisteme de curenți. De notat că profilul 'V' se vede aici ca un profil 'W', datorită structurii de foaie dublă, cu un curent ascendent adiacent unui curent descendent. Raportul λ_2/λ_1 exprimă caracterul planar al foilor de curent, mai pronunțat în zona de noapte, unde ΔB_x este neglijabil iar foile sunt practic aliniat E–W ($\theta \cong 0$). În zona de zi, structura FAC observată de Swarm B are de asemenea un pronunțat caracter planar (albastru în spectrogramă, corespunzător $\lambda_2/\lambda_1 \leq 0.01$), similar cu cel observat în zona de noapte, în timp ce structurile observate de Swarm A și C (care zboară în 'pereche', la câteva zeci de kilometri distanță unul de altul) au planaritatea mai redusă (verde în spectrogramă, corespunzător $\lambda_2/\lambda_1 \cong 0.1$). O explicație posibilă pentru această diferență este oferită de timpul magnetic local: în timp ce Swarm B traversează ovalul auroral în jur de ora 2, Swarm A și C traversează ovalul în jur de ora 12, în apropiere de proiecția domeniului 'cusă' din magnetosferă – unde structura curenților aliniați este mai complicată.

Panelurile (d) – (f) din Figura 2 prezintă în detaliu traversarea sistemului de curenți aliniați din zona de noapte, în intervalul 11:00–11:03 Swarm A și C, respectiv 10:59–11:02 Swarm B. Cele 3 minute de date corespund unei distanțe de 1350 km. Din spectrograme este decupată porțiunea $w \leq 100$ s, corespunzând unei lărgimi maxime a ferestrei alunecătoare de 750 km. Așa cum era de așteptat, profilul general 'W' din spectrograma $\partial\lambda_1/\partial w$ se păstrează, dar acum este vizibilă și structura 'fină', datorată foilor de curent de scală mai mică, suprapuse peste foile de scală mare. Notabil, 'vârful' asociat acestor foi pot fi mai proeminente (roșii) decât cele asociate foilor de scală largă, datorită

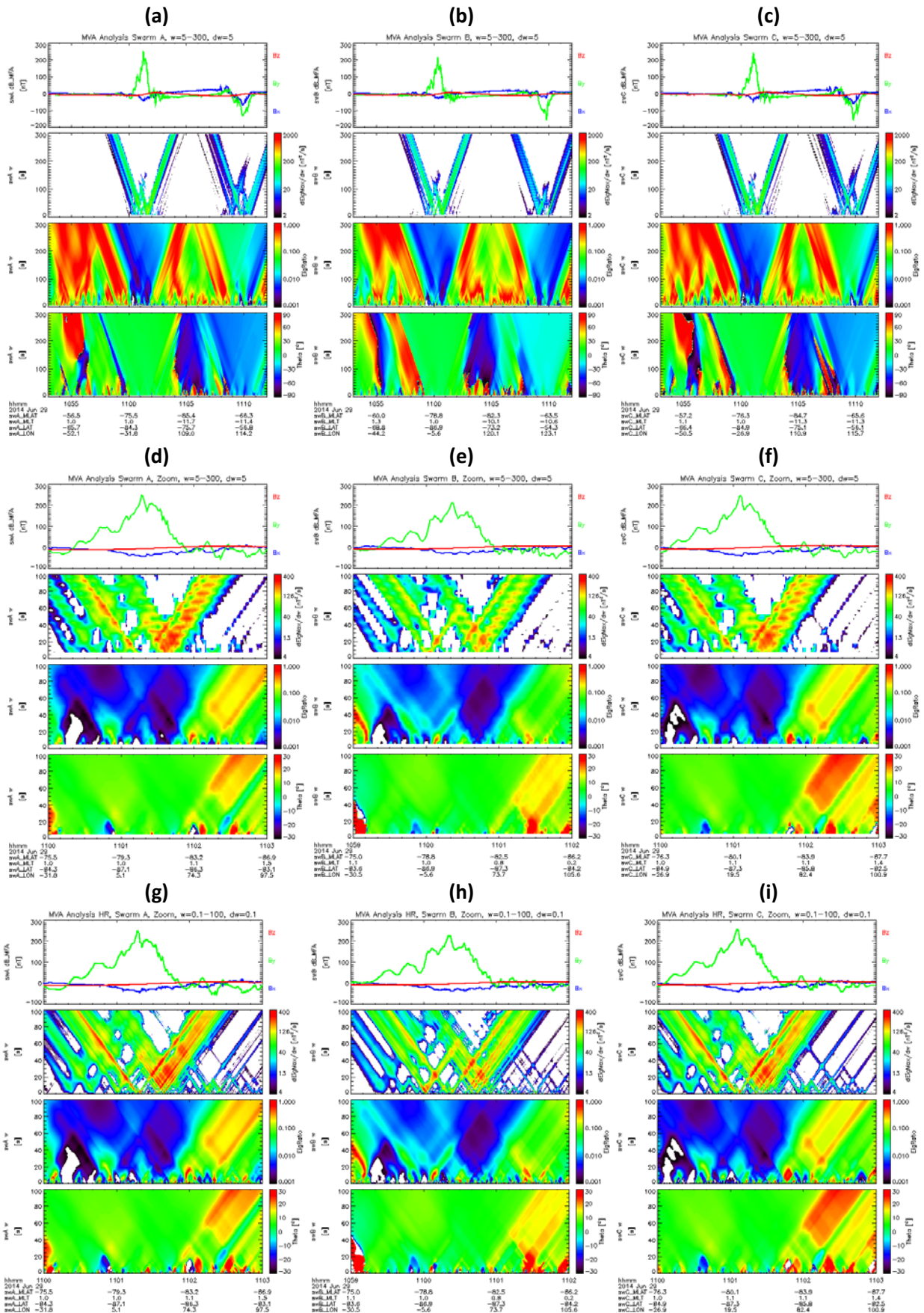


Figura 2. Rezultate MVA, date Swarm, 29 Iunie 2014, 10:50–11:15. (a–c) Date SwA, SwB, SwC de rezoluție joasă, 1 Hz. (d–f) Date SwA, SwB, SwC de rezoluție joasă, 1 Hz, zoom. (g–i) Date SwA, SwB, SwC de rezoluție înaltă, 50 Hz, zoom. Formatul fiecărui panel este identic cu cel din Fig. 1.

dependenței inverse de lărgimea foii (Ec. 3). Caracterul planar (și utilizarea termenului 'foaie') este justificat de raportul λ_2/λ_1 , aproximativ egal cu 0.01 (sau mai mic). Totuși, examinarea detaliată arată că în jur de 11:01 pentru Swarm A și C, 11:00 pentru Swarm B, planaritatea se deteriorează pentru scale $w \leq 40$ s, respectiv 300 km. Având în vedere că structurile FAC de scală mică și medie din zona aurală au scale de ordinul kilometrilor până la zeci / sute de kilometri, putem spune că, foarte probabil, Swarm traversează o zonă FAC ne-planară, asociată unei forme aurorale 2D. Datorită intensității locale reduse a curentului aliniat, este de presupus că această formă aurorală este sub pragul de vizibilitate – prin urmare datele optice conjugate nu i-ar putea confirma prezența.

Panelurile (g)–(i) din Figura 2 sunt similare cu panelurile (d)–(f), dar bazate pe date de rezoluție înaltă, de 50 Hz. În acest caz rezoluția spațială corespunzătoare este de 150 m, întru totul adecvată examinării structurii de scală medie și mică a FAC. Lărgimea w a ferestrei alunecătoare este variată între 0.1 și 100 s (0.75–750 km) cu un pas de 0.1 s (750 m). Chiar dacă structura de scală medie și mică nu este vizibilă cu ușurință în Fig. 2, datorită intervalului larg folosit pe axa y și scalei liniare, se poate observa totuși țesătura de linii fine a profilelor 'V', diferită de liniile groase și 'perlate' obținute cu date de rezoluție joasă. Pe de altă parte, utilizarea datelor de rezoluție înaltă este mult mai 'costisitoare' în resurse de calcul – timpul și memoria necesare sunt cu 3–4 ordine de mărime mai mari față de cazul datelor de rezoluție joasă (e. g. de la câteva secunde la câteva ore și de la sute de kB la sute de MB). Pentru procesarea eficientă a datelor de la cei trei sateliți Swarm, corespunzător mai multor intervale de timp, este recomandabilă utilizarea unei mașini puternice, de tip cluster. Rezultatele prezentate în raportul de față au fost obținute cu ajutorul unui cluster HPC Dell, 16 x 8 'miezi' (core) la 2.3 GHz, 4 GB RAM per 'miez', prin alocarea câte unui 'miez' pentru fiecare satelit și interval de timp.

Complexitatea structurilor FAC de scală medie este vizibilă mai bine în Figura 3, unde sunt prezentate intervale de 80 s (11:01:00–11:02:20, stânga), respectiv 30 s (11:01:20–11:01:50, dreapta), din datele Swarm A, la traversarea foii de curent de scală mare descendent. Spectrogramele sunt decupate pentru $w \leq 20$ s (150 km), ceea ce permite într-adevăr examinarea scalelor medii (pentru o exploare a scalelor mici ar fi necesară o reducere a intervalului w cu încă un ordin de mărime, $w \leq 2$ s). Se observă o succesiune de structuri cu scală de câteva secunde, respectiv câteva zeci de km, a căror planaritate este semnificativ mai redusă în comparație cu scalele mai mari (tranziția de la albastru la verde în spectrograma λ_2/λ_1 , în particular acolo unde este localizat setul de profile 'V' în spectrograma $\partial\lambda_1/\partial w$). La baza spectrogramei λ_2/λ_1 sunt vizibile mai multe 'puncte' de roșu, ceea ce sugerează că planaritatea se deteriorează și mai mult pentru structurile FAC de scală mică. Chiar dacă nu este foarte surprinzătoare, degradarea planarității structurilor FAC odată cu micșorarea scalei reprezintă un rezultat notabil, cu atât mai mult cu cât evenimentul Swarm este observat într-o perioadă liniștită geomagnetic. În perspectivă, examinarea unui set mai larg de evenimente Swarm va permite verificarea sistematică a acestui rezultat.

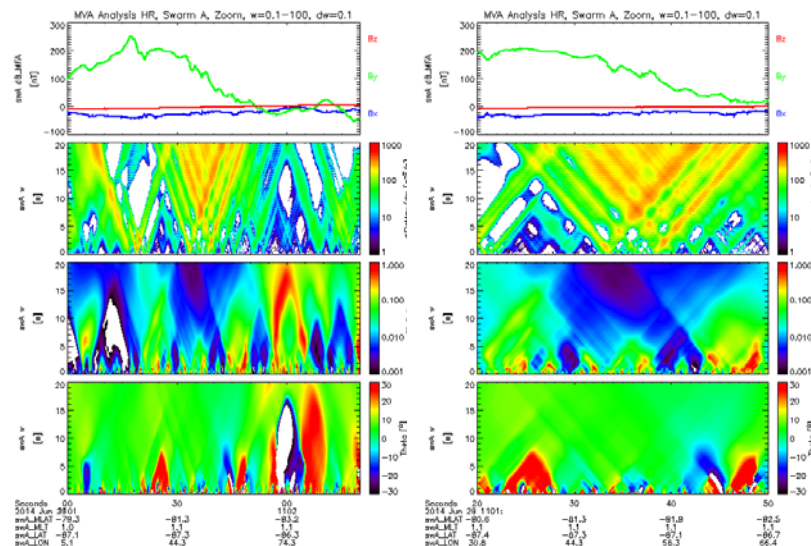


Figura 3. Detalierea rezultatelor MVA din Figura 2g (Swarm A, rezoluție înaltă) pentru două intervale de timp: 11:01:00–11:02:20 (stânga), respectiv 11:01:20–11:01:50 (dreapta). Spectrogramele sunt decupate la $w_{max} = 20$ s (150 km).

6.2.3. Rezultate

6.2.3.1. Articole

6.2.3.1.1. Articole publicate în reviste ISI

- R. Nakamura, T. Karlsson, M. Hamrin, H. Nilsson, O. Marghita, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, H. Frey, A. Keiling, J. Semeter, E. Sorbalo, J. Vogt, C. Forsyth, M. Kubyshkina, *Low-altitude electron acceleration due to multiple flow-bursts in the magnetotail*, Geophys. Res. Lett., 41, 777–784, doi:10.1002/2013GL058982, 2014.
- A. Keiling, O. Marghita, J. Vogt, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, H. Frey, M. Hamrin, T. Karlsson, R. Nakamura, H. Nilsson, J. Semeter, E. Sorbalo, *Magnetosphere-ionosphere coupling of global Pi2 pulsations*, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 2717–2739, doi:10.1002/2013JA019085, 2014.

6.2.3.1.2. Articole în pregătire

- C. Bunescu, O. Marghita, D. Constantinescu, Y. Narita, J. Vogt, A. Blăgău, *Field-aligned current analyzer for spacecraft observations*.
- C. Bunescu, O. Marghita, J. Vogt, *Omega-like auroral undulations observed during the late recovery phase of a substorm*.

6.2.3.2. Prezentări la conferințe și seminarii

6.2.3.2.1. Prezentări invitate

- O. Marghita, *Multi-scale features of the auroral magnetosphere–ionosphere coupling*, 11th AOGS Annual Meeting, Session ST15–08: Multi-scale physics of magnetospheric and solar wind plasmas, Sapporo, Japan, July 2014.

6.2.3.2.2. Prezentări orale

- O. Marghita, A. Blăgău, *Auroral electrodynamics with Swarm*, 3rd Swarm Science Meeting, Copenhagen, Denmark, June 2014.
- R. Nakamura, O. Marghita, T. Karlsson, M. Hamrin, H. Nilsson, O. Amm, C. Bunescu, V. Constantinescu, C. Forsyth, H. Frey, A. Keiling, M. Kubyshkina, J. Semeter, E. Sorbalo, J. Vogt, *Low altitude signatures of multiple flow bursts in the magnetotail*, 11th AOGS Annual Meeting, Session ST30: Spatiotemporal behavior of the magnetosphere–ionosphere system, Sapporo, Japan, July 2014.
- O. Marghita, J. Vogt, A. Keiling, R. Nakamura, T. Karlsson, M. Hamrin, O. Amm, H. Frey, C. Bunescu, E. Sorbalo, V. Constantinescu, H. Nilsson, J. Semeter, *Magnetosphere–ionosphere coupling on multiple scales associated with magnetotail flow bursts: Event study*, AGU Chapman Conference on Low frequency waves in space plasmas, Jeju, South Korea, September 2014.

6.2.3.2.3. Seminar invitat

- O. Marghita, *Spacecraft measurement of aurora*, University of Tokyo, Tokyo, Japan, August 2014.

6.2.4. Bibliografie

Blăgău, A., B. Klecker, G. Paschmann, S. Haaland, O. Marghitu, M. Scholer, *A new technique for determining orientation and motion of a 2-D, non-planar magnetopause*, *Annales Geophysicae*, 28, 753-778, 2010.

Escoubet, C. P., M. Fehringer, and M. Goldstein, *The Cluster mission*, *Ann. Geophys.*, 19, 1197-1200, 2001.

Sonnerup, B., and L. Cahill, *Magnetopause structure and attitude from Explorer 12 observations*, *J. Geophys. Res.*, 72, 171–183, 1967.

Sonnerup, B., and M. Scheible, *Minimum and maximum variance analysis*, in: *Analysis methods for multi-spacescraft data*, eds. G. Paschmann and P. Daly, vol. 1 of ISSI Scientific Reports, chap. 8, ISSI/ESA, Bern, Switzerland, 1998.

7. Contextul și contribuția la programele ESA

Conform Secțiunii 1.3, *Aligning the project activities with ESA Programs*, din Propunerea de proiect:

Ulterior anunțului ESA referitor la *Swarm Science and Validation Opportunity (SSVO)*, August 2011, în cadrul Programului Earth Observation, un colectiv internațional coordonat de directorul proiectului ALEOS a transmis către ESA propunerea științifică *Auroral electrodynamics with Swarm (ALEOS). Implications for the magnetosphere–ionosphere–thermosphere system*. Propunerea a fost acceptată în Februarie 2012, ceea ce asigură proiectului ALEOS acces la datele Swarm relevante. În acord cu regulile ESA, resursele necesare pentru implementarea proiectului se asigură la nivel național.

Cu referire la obiectivele misiunii Swarm, ALEOS contribuie direct la *Investigation of electric currents flowing in the magnetosphere and ionosphere* și la *Quantification of the magnetic forcing of the upper atmosphere, including studies of thermosphere densities and winds*. Prin îmbunătățirea înțelegerii curenților ionosferici, ALEOS poate contribui de asemenea la separarea câmpului magnetic intern de cel extern și prin aceasta la acuratețea determinării câmpului intern, relevant pentru obiectivele Swarm *Studies of core dynamics, geodynamo processes, and core-mantle interaction* și *Mapping of the lithospheric magnetisation and its geological interpretation*. Examinarea conjugată a câmpului electric, câmpului magnetic și vântului neutru folosind date de la cei doi sateliți Swarm pe orbite paralele sau de la toți cei trei sateliți poate ajuta și efortul de validare a datelor.

Dintr-o perspectivă mai largă, problematica științifică ALEOS este relevantă pentru Programul ESA Cosmic Vision 2015–2025, în particular pentru *Tema 2* a acestui Program, *How does the solar system work?* În acest context, proiectul ALEOS beneficiază de rezultate obținute în cadrul proiectului PECS *Energy conversion and transfer in the solar wind – magnetosphere – ionosphere system (ECSTRA)*, <http://gpsm.space-science.ro/ecstra>. Directorul de proiect ALEOS a fost Investigator Principal ECSTRA iar echipa implicată în realizarea ALEOS a participat de asemenea la Programul PECS.

Directorul de proiect ALEOS împreună cu Dr. Adrian Blăgău participă și la activități de validare a datelor Swarm în cadrul proiectului *Validation of Swarm L-1b products in the topic areas of geomagnetic field, ionosphere/thermosphere, and geodesy*, propus către ESA în urma SSVO și coordonat de Prof. Hermann Lühr, GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, Co-PI al misiunii Swarm. Proiectul se bucură de sprijinul Agenției Spațiale Germane (DLR) și al ESA. Participarea la activitățile Swarm de validare a datelor permite accesul direct atât la date de calitate cât și la expertiză specifică. Contribuția la validarea datelor Swarm, coordonată de Dr. Adrian Blăgău, face obiectul proiectului VALS, finanțat în cadrul Programului STAR.

8. Concluzii

Activitățile desfășurate pe parcursul celei de-a treia Etape a proiectului ALEOS s-au concentrat pe utilizarea datelor Swarm observate în zona aurorală, în particular pentru caracterizarea structurilor de curent aliniat. Technica MVA elaborată în Etapa precedentă a fost dezvoltată în continuare și aplicată mai multor evenimente Swarm de traversare a ovalului auroral, dintre care unul a fost prezentat în raport. Analiza MVA aplicată câmpului magnetic asociat cu structurile de curent aliniat arată că la scală mare domină simetria 1D, în timp ce la scale medii și mici planaritatea se degradează progresiv, sugerând structuri 2D. Acest rezultat este cu atât mai interesant cu cât a fost obținut pentru un interval de timp liniștit din punct de vedere geomagnetic. În ultima etapă a proiectului anticipăm o verificare mai aprofundată a dependenței planarității structurilor FAC de scală, prin examinarea unui set mai larg de evenimente Swarm.

Rezultatele obținute permit derularea cu succes a ultimei etape a proiectului, în particular o participare activă la exploatarea științifică a datelor Swarm și interacția cu partenerii externi angajați la rândul lor în acest demers. Îndeplinirea obiectivelor proiectului în litera lor, așa cum au fost formulate în propunerea de proiect, depinde de finalizarea activităților de calibrare / validare a datelor relevante, respectiv datele de câmp electric și cele referitoare la atmosfera neutră.

Director de proiect

Dr. Octav Marghita



Indicatori de monitorizare/rezultat

Nr. crt.	Denumirea indicatorului	
1	sume atrase prin participarea la programele ESA (EURO)	
2	nr. de nișe CDI identificate	3
3	nr. de programe opționale ESA la care se participă ¹	2 (Earth Observation, SSA/Space Weather)
4	nr. de misiuni spațiale ESA la care participă entitățile implicate în realizarea proiectului ²	2 (Swarm, Cluster)
5	nr. de experimente și sarcini utile îmbarcabile la bordul misiunilor ESA	
6	nr. de centre de profil nou înființate	
7	nr. de institute naționale de CDI / entități de CDI / universități participante la realizarea proiectului	1
8	nr. entități din industrie participante la realizarea proiectului	
9	nr. de companii naționale aflate în lanțul de furnizori pentru marii integratori de produse spațiale ³	
10	ponderea participării diverselor entități în cadrul proiectului (industrie, institute naționale de CDI, entități de CDI, universități) (%) (se raportează bugetul total alocat entitatii pe etapa la bugetul total al proiectului)	INCD – 100 %
11	nr. de cursuri de instruire/perfecționare organizate	
12	nr. activități de diseminare organizate (workshopuri/seminarii/conferințe etc.)	5 prezentări la conferințe și seminarii (v. 6.2.3.2)
13	nr. cereri brevete depuse national/international	
14	nr. brevete înregistrate national/international	
15	nr. articole publicate sau acceptate spre publicare ⁴	2 articole publicate (v. 6.2.3.1)
16	nr. cărți publicate sau acceptate spre publicare ⁵	

¹) se vor preciza denumirile programelor optionale ale ESA la care se participă

²) se vor preciza denimirile misiunilor spațiale ESA la care se participă

³) se va preciza denumirea integratorului(lor) de produse spațiale

⁴) se anexează lista articole

⁵) se anexează lista cărți