

Μελέτη των Ασυμπτωτικών Κώνων Υποδοχής των Μετρητών Νετρονίων κατά τη διάρκεια ισχυρών Επίγειων Επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

Ανδριοπούλου Μαρία⁽¹⁾, Μαυρομιχαλάκη Ελένη⁽¹⁾, Πλαϊνάκη Χριστίνα^{(1), (2)}, Belov Anatoly⁽²⁾, Eroshenko Eugenia⁽²⁾, Yanke Viktor⁽²⁾

(1) Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας, Τμήμα Φυσικής, Ε.Κ.Π.Α., 15771 Αθήνα, Ελλάδα, (mariand@phys.uoa.gr, emavromi@phys.uoa.gr)

(2) IFSI-Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, Roma, Italy

(3) Inst. Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Moscow Region, Russia

Περίληψη

Η άφιξη σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας δεδομένων ενεργειών σε έναν γεωγραφικό τόπο επηρεάζεται σημαντικά από το γήινο μαγνητικό πεδίο και τις μεταβολές που αυτό υφίσταται. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής προσδιορίζονται οι επιτρεπτές τροχιές σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας και οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής των μετρητών νετρονίων του παγκόσμιου δικτύου για τα σημαντικότερα πρωτονικά γεγονότα ($E > 500 \text{ MeV}$) του τελευταίου ηλιακού κύκλου που καταγράφονται ως επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (ground level enhancements-GLEs). Θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα υψηλής ανάλυσης από 30 τουλάχιστον σταθμούς και θα αναλυθούν μέσω της αριθμητικής τεχνικής back-tracking. Για την αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου της Γης έχει ληφθεί υπόψη το μαγνητοσφαιρικό μοντέλο Tsyganenko89. Τέλος, συζητείται ο καθοριστικός ρόλος των ασυμπτωτικών διευθύνσεων άφιξης των ηλιακών κοσμικών σωματιδίων ως προς την ερμηνεία των γεγονότων των επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και του ανισοτροπικού χαρακτήρα τους.

Εισαγωγή

Οι επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Enhancements-GLEs) είναι απότομες και σύντομης διάρκειας επαυξήσεις στην επίγεια καταγραφή της κοσμικής ακτινοβολίας, οι οποίες προκαλούνται από την άφιξη σχετικιστικών σωματιδίων ηλιακής προέλευσης, των ηλιακών κοσμικών ακτίνων, που επιταχύνονται σε υψηλές ενέργειες και διαδίδονται στο ηλιομαγνητικό πεδίο (Borje and Al-Thoy, 2001). Έχοντας την κατάλληλη ενέργεια ($E > 500 \text{ MeV}$) τα ηλιακά σωματίδια μπορούν να διεισδύσουν μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και τελικά να καταγραφούν από επίγειους ανιχνευτές νετρονίων.

Η μελέτη των επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι μεγάλης σημασίας καθώς σχετίζονται με πλήθος επιστημονικών εφαρμογών, όπως η πρόβλεψη επικινδύνων για τους δορυφόρους και τις τηλεπικοινωνίες ροών σωματιδίων (Dorman et al., 2003; Mavromichalaki et al., 2007), η ανάλυση των διαπλανητικών συνθηκών (Flückiger et al., 2006) καθώς και η πρόβλεψη ισχυρών γεωμαγνητικών καταιγίδων (Wang and Wang, 2006). Για το λόγο αυτό, έχουν παρουσιαστεί από πολλούς επιστήμονες διάφορες τεχνικές που αναλύουν ή μοντελοποιούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους ξεκινώντας από τους Smart et al. (1971).

Τα GLEs είναι ιδιαίτερα ανισοτροπικά γεγονότα, για αυτό και παρατηρούνται συχνά σημαντικές διαφορές μεταξύ των χρονικών προφίλ των εντάσεων κοσμικής ακτινοβολίας των σταθμών νετρονίων που παρατήρησαν το γεγονός και που έχουν παρόμοιο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας και βρίσκονται σε παρόμοιο υψόμετρο. Για το λόγο αυτό, για μια πλήρη μελέτη του κάθε γεγονότος επίγειας επαυξήσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ασυμπτωτικού κώνου υποδοχής κάθε μετρητή νετρονίων κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Ως ασυμπτωτικό κώνο υποδοχής ενός σταθμού νετρονίων με κατακόρυφο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας R_c θεωρούμε το σύνολο των επιτρεπτών τροχιών σωματιδίων στο δεδομένο γεωγραφικό τόπο που βρίσκεται ο σταθμός νετρονίων προερχομένων από διάφορες διευθύνσεις, με την προϋπόθεση ότι η δυσκαμψία των σωματιδίων αυτών R , η οποία δίνεται από τη σχέση $R = (cp)/(Ze)$ όπου c η ταχύτητα του φωτός, p η ορμή σωματιδίου και Ze το φορτίο του σωματιδίου (Μαυρομιχαλάκη, 2004), είναι μεγαλύτερη του χαμηλότερου κατωφλίου γεωμαγνητικής δυσκαμψίας του σταθμού (Smart et al., 2000; Moraal et al., 2000). Οι πρώτες σημαντικές και συστηματικές προσπάθειες για τον προσδιορισμό των τροχιών των σωματιδίων, των ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής των

σταθμών, καθώς και των κατακόρυφων κατωφλίων γεωμαγνητικής δυσκαμψίας έγινε από τους McCracken et al. (1962; 1968) και από τους Shea et al. (1965), ενώ μία σύνοψη μπορεί να βρεθεί στους Smart et al. (2000). Μελετώντας τους ασυμπτωτικούς κώνους των σταθμών κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος επίγειας επαύξησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούμε σε αρκετές περιπτώσεις να ερμηνεύσουμε τις παρατηρούμενες διαφορές στην ποσοστιαία μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας που κατέγραψε ο κάθε σταθμός.

Ένα πρόβλημα που υπεισέρχεται στον ακριβή προσδιορισμό των τροχιών σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ότι λόγω της πολυπλοκότητας της γήινης μαγνητόσφαιρας και των μεταβολών που αυτή υφίσταται, δεν υπάρχει μέχρι σήμερα ένα απόλυτα ικανοποιητικό μοντέλο που να περιγράφει λεπτομερώς τη δομή της μαγνητόσφαιρας και ιδιαίτερα το κομμάτι της μαγνητοουράς (Smart et al., 2000). Σημαντικές προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν γίνει από αρκετούς επιστήμονες στο παρελθόν, με πιο αξιοσημείωτη αυτή του Tsyganenko, ο οποίος κατασκεύασε ένα πλήθος μαγνητοσφαιρικών μοντέλων (1987; 1989; 1995; 2002) που χρησιμοποιούνται ευρύτατα μέχρι σήμερα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα προσδιοριστούν οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής για ένα σημαντικό αριθμό σταθμών νετρονίων του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων για τα τέσσερα ισχυρότερα γεγονότα επίγειας επαύξησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας του 23ου ηλιακού κύκλου. Τα γεγονότα αυτά, ξεκινώντας από το πιο ισχυρό είναι το γεγονός της 20ης Ιανουαρίου 2005, γνωστό και ως GLE69, το γεγονός της 15ης Απριλίου 2001 (GLE60), το γεγονός της 13ης Δεκεμβρίου 2006 (GLE70) και τέλος το γεγονός της 14ης Ιουλίου 2000 (GLE59). Για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιήθηκε η εκτεταμένη αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου με βάση το μαγνητοσφαιρικό μοντέλο Tsyganenko89.

Επεξεργασία δεδομένων

Κατά τη διάρκεια του 23ου ηλιακού κύκλου (Μάιος 1996-Δεκέμβριος 2008) το παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων κατέγραψε δεκαέξι γεγονότα επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπου είναι ο μεγαλύτερος αριθμός καταγραφής σε σχέση με τους τέσσερις αμέσως προηγούμενους ηλιακούς κύκλους, που ήταν 10, 13, 12 και 15 για τον 19ο, τον 20ο, τον 21ο και τον 22ο ηλιακό κύκλο αντίστοιχα (Belov et al., 2009). Αν και συνήθως τα GLEs εμφανίζονται κοντά στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας, ο 23ος ηλιακός κύκλος είχε μία ιδιαίτερα ασυνήθιστη συμπεριφορά. Τα πρώτα τέσσερα γεγονότα έλαβαν χώρα στην ανοδική φάση του κύκλου, μόνο πέντε γεγονότα συνέβησαν κοντά στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας, ενώ επτά ακόμη γεγονότα καταγράφηκαν κατά την παρατεταμένη καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου, με τα τρία από αυτά να συνδέονται με μία απρόβλεπτη έξαρση στην ηλιακή δραστηριότητα κατά την περίοδο από τον Οκτώβριο μέχρι το Νοέμβριο του 2003 (Eroshenko et al., 2004; Plainaki et al., 2005; Uddin et al., 2006). Η εμφάνιση των γεγονότων είχε έκταση λίγο μεγαλύτερη από 9 χρόνια, με το πρώτο γεγονός να καταγράφεται στις 6 Νοεμβρίου 1997 (GLE55) και το τελευταίο γεγονός στις 13 Δεκεμβρίου 2006 (GLE70).

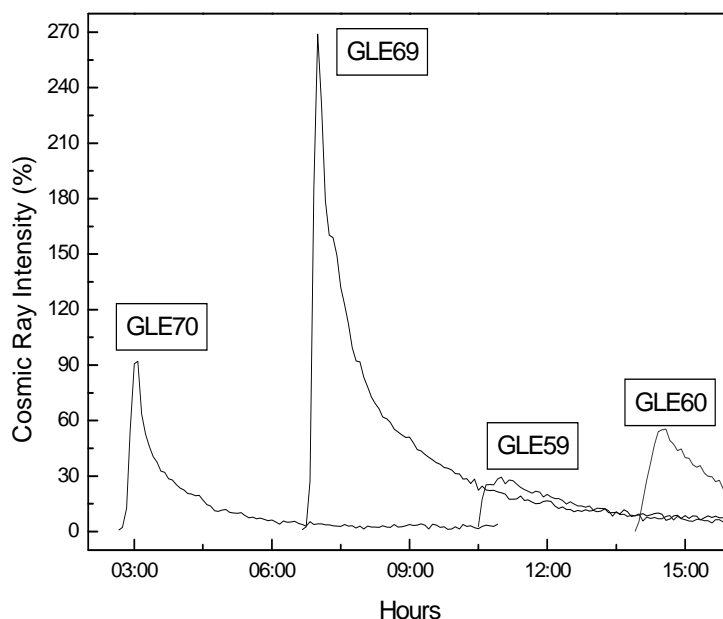
Από τα δεκαέξι GLEs που συνέβησαν στον 23ο ηλιακό κύκλο θα ασχοληθούμε με τα τέσσερα σημαντικότερα γεγονότα ως προς τη μέγιστη επί τις εκατό επίγεια καταγραφή στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας από τους σταθμούς μετρητών νετρονίων. Χρησιμοποιώντας δεδομένα με την υψηλότερη δυνατή ανάλυση από 37 συνολικά σταθμούς του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων που συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν από την ομάδα του IZMIRAN και μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY!/FTP_GLE/, καθώς και από την πρόσφατα διαμορφωμένη υψηλής ανάλυσης βάση δεδομένων μετρητών νετρονίων με λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, NMDB (<http://www.nmdb.eu>) (Mavromichalaki et al., 2009), κάποια βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων σημαντικότερων GLEs του 23ου ηλιακού κύκλου και συγκεκριμένα ο χρόνος έναρξης του γεγονότος, η μέγιστη ποσοστιαία επαύξηση της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφηκε, ο σταθμός νετρονίων που την κατέγραψε και τέλος ο δείκτης μαγνητικής δραστηριότητας K_p κατά την περίοδο της εξέλιξης του γεγονότος παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Ακόμη, μία απεικόνιση των χρονικών προφίλ των τεσσάρων γεγονότων, όπως αυτά καταγράφηκαν από το σταθμό της Oulu, φαίνεται στην εικόνα 1. Λόγω του ανισοτροπικού χαρακτήρα των γεγονότων, ο σταθμός της Oulu μάλιστα καταγράφει το γεγονός της 13ης Δεκεμβρίου 2006 ως ισχυρότερο γεγονός σε σχέση με το γεγονός της 15ης Απριλίου 2001.

Η μέθοδος που χρησιμοποιούμε για τον προσδιορισμό των επιτρεπτών τροχιών των σωματιδίων και κατά συνέπεια και των ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής των μετρητών νετρονίων βασίζεται στην αριθμητική τεχνική αντίστροφης τροχιάς (back-tracking technique) η οποία στηρίζεται στο γεγονός ότι η τροχιά ενός αρνητικά φορτισμένου σωματίου που ξεκινάει από ένα σημείο της επιφάνειας της Γης κινούμενο προς τα έξω είναι πανομοιότυπη με αυτή που διαγράφει ένα θετικά φορτισμένο σωματίο ίσης δυσκαμψίας το οποίο προσεγγίζει τη Γη με την ίδια κατεύθυνση (Πλαϊνάκη, 2007). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή θεωρούμε

αντίθετα φορτισμένα σωματίδια που ξεκινούν από ένα σημείο της Γης, όπου θεωρούμε ότι βρίσκεται ο μετρητής νετρονίων, κινούμενα αντίστροφα μέσα στη γήινη μαγνητόσφαιρα, έχοντας αλλάξει την κατεύθυνση της πραγματικής ταχύτητας του σωματιδίου. Ως επιτρεπτή θεωρείται η τροχιά που τέμνει το όριο της μαγνητόσφαιρας, ενώ ως απαγορευμένη θεωρείται η τροχιά που επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης ή παραμένει παγιδευμένη μέσα στη μαγνητόσφαιρα. Χρησιμοποιούμε έπειτα τη μέθοδο ολοκλήρωσης Runge-Kutta 3ης τάξης για να επιλύσουμε το σύστημα εξισώσεων κίνησης του φορτισμένου σωματιδίου, θεωρώντας δεδομένη τη θέση και την ταχύτητα του σωματιδίου σε ένα σημείο της τροχιάς του. Λόγω πολυπλοκότητας των υπολογισμών θεωρήσαμε μόνο κατακόρυφα κατευθυνόμενα σωματίδια ενώ για να αποφευχθεί η ύπαρξη απαγορευμένων τροχιών, αγνοήθηκε το εύρος της περιοχής της παρασκιάς (penumbra) και μελετήθηκαν τελικά οι τροχιές μόνο των σωματιδίων με δυσκαμψία μεγαλύτερη η ίση του κατακόρυφου κατωφλίου γεωμαγνητικής δυσκαμψίας του σταθμού, εφόσον θεωρείται μία αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση (Smart et al., 2000). Τέλος, για κάθε διαφορετικό σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας συγκεντρώσαμε τα σημεία της τροχιάς των φορτισμένων σωματιδίων διαφορετικής ενέργειας στο ύψος των 20 km με σκοπό να είναι δυνατόν να ερμηνεύονται οι παρατηρούμενες διαφορές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μεταξύ σταθμών που έχουν το ίδιο κατώφλι κατακόρυφης δυσκαμψίας αλλά βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία πάνω στη Γη (Πλαϊνάκη, 2007).

Γεγονός GLE	Σταθμός που σημείωσε τη μέγιστη καταγραφή (%)	Χρόνος έναρξης (UT)	Μέγιστη καταγραφή της κοσμικής ακτινοβολίας (%)	K_p
14/07/2000 GLE59	South Pole	10:34	59.40	4
15/04/2001 GLE60	South Pole	13:58	236.70	4
20/01/2005 GLE69	South Pole	06:30	5444.00	2
13/12/2006 GLE70	Oulu	02:42	92.10	3

Πίνακας 1. Βασικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων σημαντικότερων GLEs



Εικόνα 1. Τα χρονικά προφίλ των ισχυρότερων γεγονότων επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας του 23ου ηλιακού κύκλου, όπως καταγράφηκαν από το σταθμό της Oulu.

Τα μαγνητοσφαιρικά μοντέλα Tsyganenko αποτελούν ποσοτικές αναπαραστάσεις του μαγνητικού πεδίου στη γεωμαγνητόσφαιρα (Tsyganenko, 1989) τα οποία βασίζονται σε μία πληθώρα δορυφορικών παρατηρήσεων. Το μοντέλο Tsyganenko89 χρησιμοποιείται ευρύτατα μέχρι και σήμερα λόγω της απλότητάς του καθώς δέχεται ως παραμέτρους εισόδου μόνο την ημερομηνία και ώρα καθώς και την τιμή του δείκτη γεωμαγνητικής δραστηριότητας K_p . Είναι πιο βελτιωμένο από το αμέσως προηγούμενο μοντέλο, καθώς λαμβάνει υπόψη δύο επιπλέον φαινόμενα, τη στρέβλωση του μαγνητοφλοιού σε δύο διαστάσεις (warping of the tail current sheet) λόγω της κλίσης του γεωμαγνητικού διπόλου και τις χωρικές μεταβολές του πάχους του μαγνητοφλοιού κατά μήκος της γραμμής Γης-Ηλίου και κατά μεταξύ της φωτεινής-σκοτεινής πλευράς (dawn-dusk). Το σημαντικό του μειονέκτημα είναι ότι θεωρεί μία δεδομένη και στατική μαγνητόπαυση, γεγονός που απέχει πολύ από μία ρεαλιστική απεικόνιση. Σημαντική βελτίωση έχουμε στο μοντέλο Tsyganenko96 σύμφωνα με το οποίο (Tsyganenko, 1995) μέσω μίας παραμετροποίησης από τη δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου (Solar Wind Dynamical Pressure) καταλήγει σε μία μαγνητόπαυση ρεαλιστικού σχήματος και δομής, σε βελτιωμένες αναπαραστάσεις του δακτυλιοειδούς ρεύματος και του ρεύματος μαγνητοουράς και ελεγχόμενη προστασία του μαγνητικού πεδίου από όλα τα μαγνητοσφαιρικά συστήματα ρεύματος. Βέβαια, αυξάνεται η πολυπλοκότητά του, καθώς το μοντέλο δέχεται ως παραμέτρους εισόδου την ημερομηνία και ώρα, τις τιμές των δεικτών γεωμαγνητικής δραστηριότητας K_p και Dst, τη δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου $P = \rho u^2$, όπου ρ η πυκνότητα και u η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και τις τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (IMF). Ακόμη πιο πολύπλοκο είναι το μοντέλο Tsyganenko2001, καθώς απαιτεί περισσότερες παραμέτρους εισόδου.

Αποτελέσματα και συζήτηση

Οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής 37 συνολικά μετρητών νετρονίων για τα γεγονότα επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που έλαβαν χώρα στις 14 Ιουλίου 2000, στις 15 Απριλίου 2001, στις 20 Ιανουαρίου 2005 και στις 13 Δεκεμβρίου 2006 απεικονίζονται στις εικόνες 2, 3, 4 και 5 αντίστοιχα χρησιμοποιώντας το μοντέλο Tsyganenko89. Εφόσον, η γεωμαγνητική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των γεγονότων ήταν από χαμηλή έως μέτρια, πίνακας 1, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο αυτό καταλήγοντας σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κάθε σημείο του ασυμπτωτικού κώνου υποδοχής ενός σταθμού αναφέρεται με μία δεδομένη τιμή δυσκαμψίας, άρα και σε μία δεδομένη τιμή ενέργειας του σωματίου. Τα διαγράμματα έχουν περιοριστεί για την περίπτωση ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας, επομένως οι ασυμπτωτικοί κώνοι αφορούν δυσκαμψίες σωματιδίων μικρότερες των 10 GV. Τα χαρακτηριστικά των μετρητών νετρονίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη αυτή παρατίθενται στον πίνακα 2.

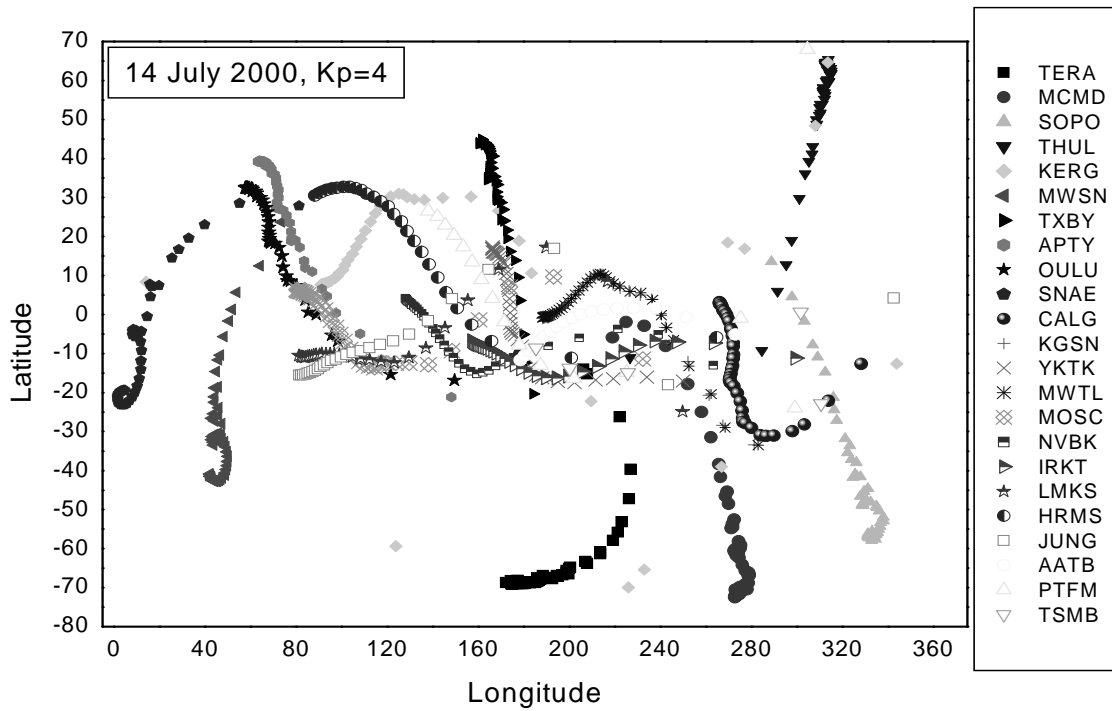
Παρατηρώντας τα διαγράμματα αυτά επισημαίνεται για άλλη μία φορά η μεγάλη χρησιμότητα του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων ως ένα "πολυκατευθυντικό εργαλείο" που δίνει πληροφορίες για τις διευθύνσεις άφιξης των σωματιδίων ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας και των ενεργειακών και χωρικών κατανομών τους κατά τη διάρκεια των σημαντικών πρωτονικών γεγονότων (Plainaki et al., 2007). Έτσι, συνδυάζοντας τα παρατηρησιακά δεδομένα πολλών σταθμών ταυτόχρονα έχουμε τη δυνατότητα να μελετήσουμε τις ροές των πρωταρχικών σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας που προέρχονται από πολλά διαφορετικά σημεία του ουρανού (Plainaki et al., 2009).

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε ότι, οι σταθμοί που βρίσκονται κοντά στους πόλους έχουν τους πιο στενούς ασυμπτωτικούς κώνους, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ως σχεδόν κατακόρυφοι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο ασυμπτωτικός κώνος του σταθμού του Barentsburg (BRBG) κατά τη διάρκεια του γεγονότος της 20ης Ιανουαρίου 2005, ο οποίος καλύπτει λιγότερο από 7 μοίρες γεωγραφικού μήκους, ενώ έχει ένα εύρος της τάξης των 60 μοιρών στο γεωγραφικό πλάτος. Όσο πιο στενός είναι ο ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής ενός σταθμού τόσο καλύτερα μπορεί να ανιχνευτεί η ανισοτροπία (Moraal et al., 2000).

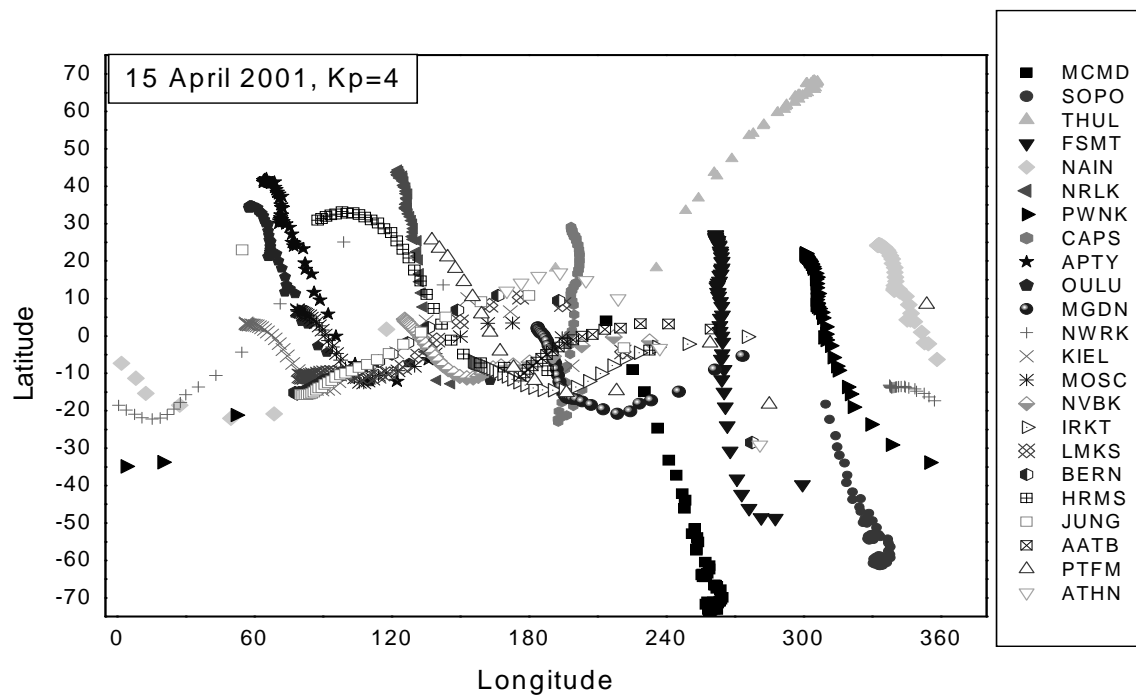
Στη συνέχεια παρατηρώντας τους κώνους των σταθμών μεσαίου πλάτους παρατηρούμε ότι είναι λιγότεροι στενοί σε σχέση με τους πολικούς σταθμούς, καλύπτοντας μεγαλύτερο εύρος γεωγραφικού μήκους, αλλά μικρότερο εύρος γεωγραφικού πλάτους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι ο σταθμός του Irkutsk (IRKT), οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής του οποίου έχουν προσδιοριστεί και για τα τέσσερα γεγονότα.

Οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής των σταθμών χαμηλού πλάτους είναι οι πιο περίπλοκοι και σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να καλύψουν ένα πολύ μεγάλο τμήμα γεωγραφικών μηκών και πλατών. Ο σταθμός της Αθήνας ανήκει στην κατηγορία αυτή, παρουσιάζοντας έναν αρκετά ευρύ ασυμπτωτικό κώνο,

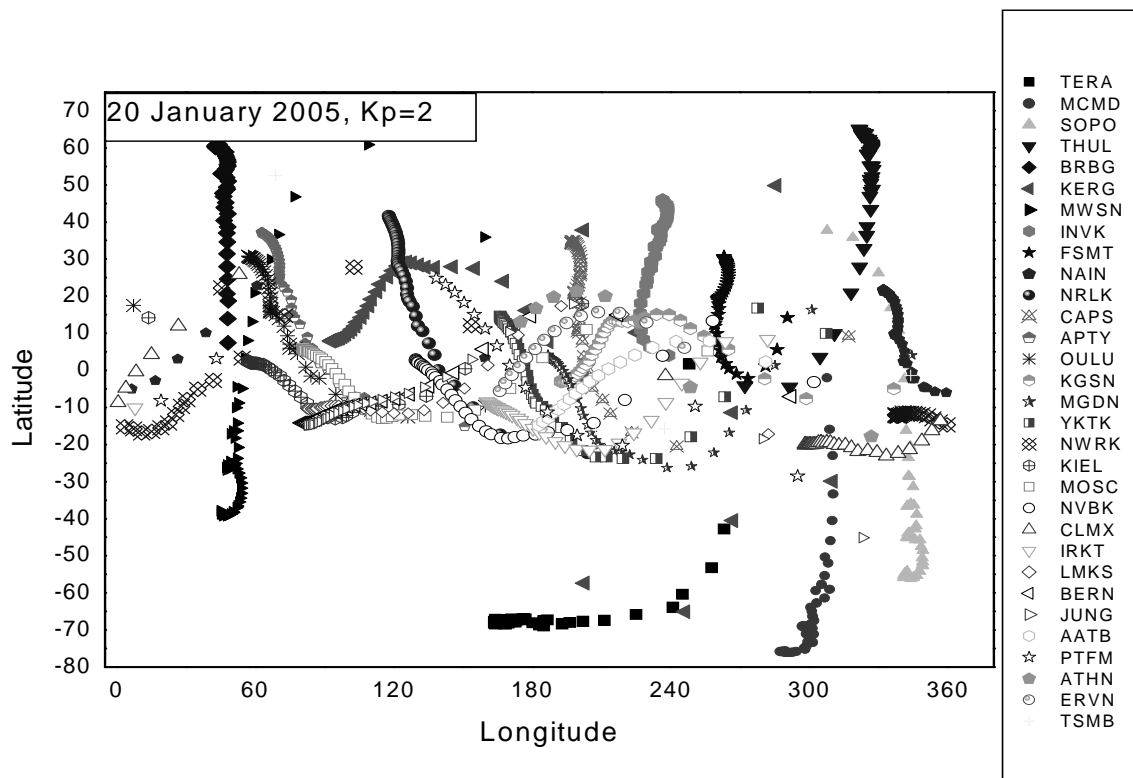
καταγράφοντας μόνο το ανώτερο κομμάτι των ηλιακών κοσμικών ακτίνων, αφού έχει κατακόρυφο κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας ίσο με 8.53 GV.



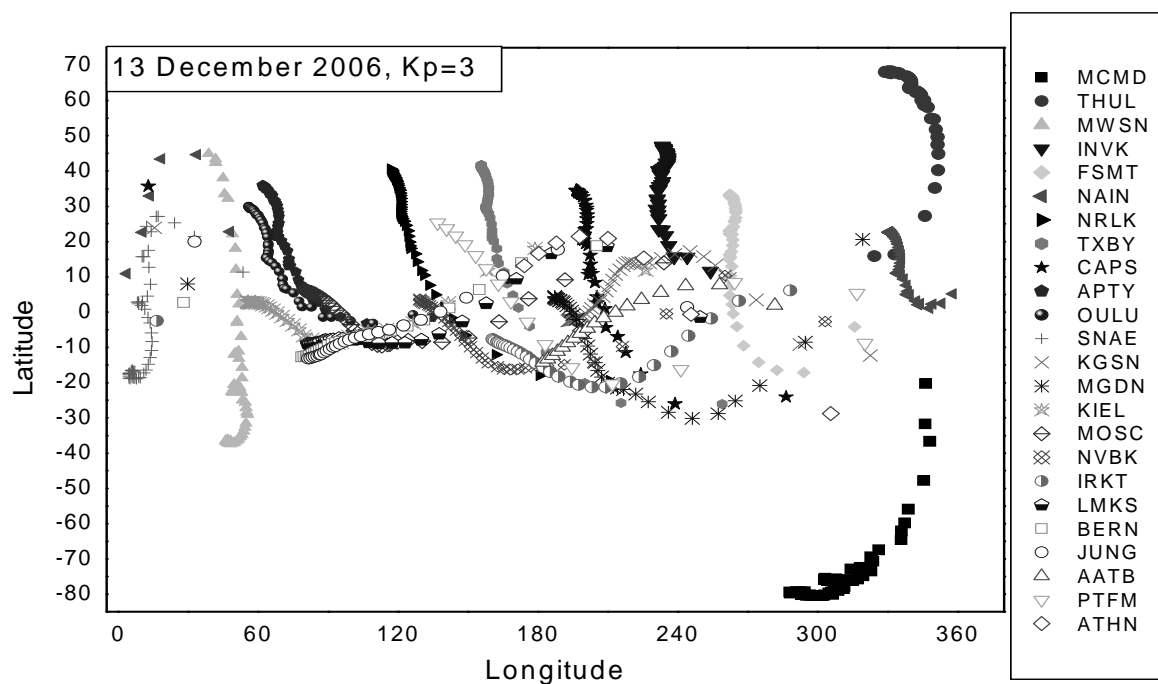
Εικόνα 2. Ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής με βάση το μοντέλο Tsyganenko89, για το γεγονός της 14ης Ιουλίου 2000.



Εικόνα 3. Ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής με βάση το μοντέλο Tsyganenko89, για το γεγονός της 15ης Απριλίου 2001.



Εικόνα 4. Ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής με βάση το μοντέλο Tsyganenko89, για το γεγονός της 20ης Ιουλίου 2005.



Εικόνα 5.

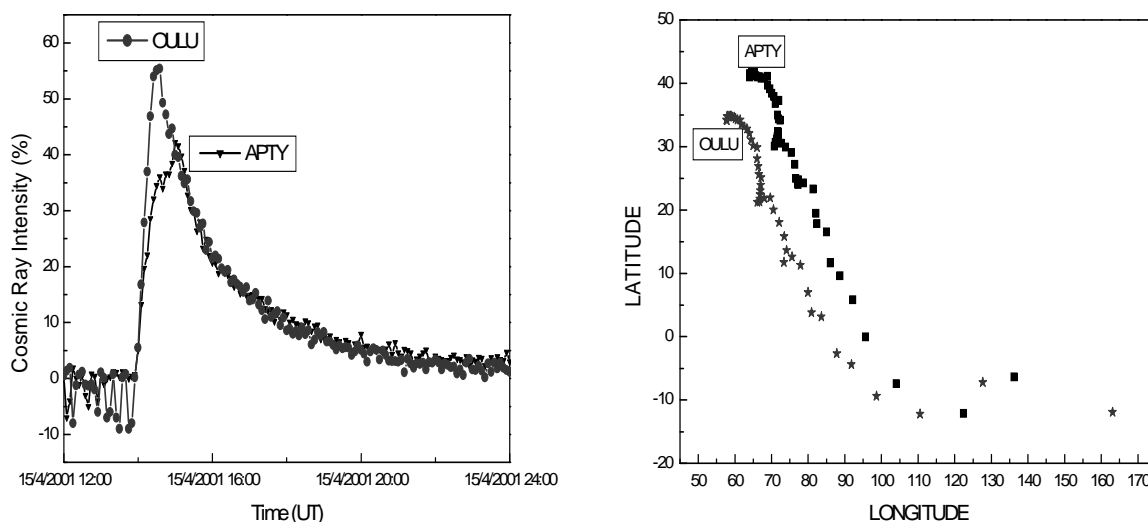
Συντομογραφία	Όνομα σταθμού	Γεωγρ. Πλάτος	Γεωγρ. Μήκος	Υψόμετρο (m)	Δυσκαμψία (GV)
TERA	Terre Adelie	-66.65	140.00	32	0.00
MCMD	McMurdo	-77.95	166.60	48	0.01
SOPO	South Pole	-90.00	0.00	2820	0.11
THUL	Thule	76.60	-68.80	260	0.10
KERG	Kerguelen	-43.35	70.25	33	0.05
MWSN	Mawson	-67.60	62.88	0	0.15
TXBY	Tixie Bay	71.60	128.90	0	0.53
APTY	Apatity	67.55	33.33	177	0.65
OULU	Oulu	65.05	25.47	15	0.77
SNAE	Sanae	-71.67	357.15	856	0.75

Ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής με βάση το μοντέλο Tsyganenko89, για το γεγονός της 13ης Δεκεμβρίου 2006.

CALG	Calgary	51.08	245.86	1128	1.09
KGSN	Kingston	-42.99	147.29	65	1.82
YTKK	Yakutsk	62.01	129.43	105	1.55
MWTL	Mt Wellington	-42.92	147.24	725	1.83
MOSC	Moscow	55.47	37.20	200	2.39
NVBK	Novosibirsk	54.80	83.00	163	2.69
IRKT	Irkutsk	52.28	104.02	435	3.49
LMKS	Lomnicky Stit	49.20	20.22	2634	3.88
HRMS	Hermanus	-34.42	19.22	26	4.45
JUNG	Jungfrauoch	46.55	7.98	3475	4.59
AATB	Alma Ata	43.25	76.92	3340	6.45
PTFM	Potchefstroom	-26.68	27.10	1351	6.85
TSMB	Tsumeb	-19.20	17.58	1240	9.06
FSMT	Fort Smith	60.00	-112.00	0	0.30
NAIN	Nain	56.60	-61.70	0	0.40
NRLK	Norilsk	69.26	88.05	0	0.63
PWNK	Peawanuck	55.00	-85.00	0	0.50
CAPS	Cape Schmidt	68.92	-179.47	0	0.45
MGDN	Magadan	60.12	151.02	220	1.99
NWRK	Newark	39.70	284.30	50	2.21
KIEL	Kiel	54.30	10.10	54	2.36
BERN	Bern	46.95	7.45	570	4.42
ATHN	Athens	37.98	23.78	260	8.53
BRBG	Barentsburg	77.80	15.40	0	0.20
INVK	Inuvik	68.35	-133.72	21	0.18
CLMX	Climax	39.37	-106.18	3400	2.93
ERVN	Erevan	40.50	44.17	3200	7.36

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των μετρητών νετρονίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη αυτή.

Συγκρίνοντας έπειτα τα διαγράμματα μεταξύ τους παρατηρούμε ότι οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής των διάφορων σταθμών μεταβάλλονται σε μικρό μόνο βαθμό, αφού και στις τέσσερις περιπτώσεις των GLEs που εξετάζουμε επικρατεί από χαμηλή έως μέτρια γεωμαγνητική δραστηριότητα. Συγκρίνοντας τους ασυμπτωτικούς κώνους των ίδιων σταθμών για την περίπτωση του γεγονότος της 15ης Απριλίου 2001 ($K_p=4$) με την περίπτωση του γεγονότος της 20ης Ιανουαρίου 2005 ($K_p=2$) παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυξημένης γεωμαγνητικής δραστηριότητας οι κώνοι των σταθμών είναι λιγότερο στενοί, ενώ φαίνεται να παρουσιάζουν μία κλίση τέτοια ώστε να καλύπτουν μεγαλύτερο γεωγραφικό μήκος, καλύπτοντας όμως ταυτόχρονα και σημαντικό γεωγραφικό πλάτος. Οι κώνοι τους είναι πιο πολύπλοκοι δηλαδή σε σχέση με την περίπτωση χαμηλής γεωμαγνητικής δραστηριότητας.



Εικόνα 6. Χρονικά προφίλ των σταθμών Oulu και Apatity (αριστερή εικόνα) και οι ασυμπτωτικοί κώνοι υποδοχής τους (δεξιά εικόνα) για το γεγονός της 15ης Απριλίου 2001.

Τέλος, ένα παράδειγμα που τονίζει τη χρησιμότητα του προσδιορισμού των ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής κατά τη μελέτη των γεγονότων επίγειων επαυξήσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας φαίνεται στην εικόνα 6. Στο αριστερό σκέλος της εικόνας αυτής βλέπουμε τα χρονικά προφίλ δύο σταθμών με παρόμοια χαρακτηριστικά (πίνακας 2) της Oulu και της Apatity για το γεγονός της 15ης Απριλίου 2001. Ενώ στη γενική περίπτωση, αναμένεται οι δύο αυτή σταθμοί να έχουν παρόμοια χρονικά προφίλ, στην περίπτωση του γεγονότος αυτού ο σταθμός της Oulu εμφανίζει μία αρκετά πιο αυξημένη ποσοστιαία μεταβολή στην κοσμική ακτινοβολία σε σχέση με την Apatity, ιδιαίτερα στην αρχική φάση του GLE και στη συνέχεια τα δύο αυτά προφίλ ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί με τη βοήθεια του δεξιού σκέλους της εικόνας 6. Παρατηρούμε ότι ο ασυμπτωτικός κώνος της Oulu είναι μετατοπισμένος σε πιο μικρά γεωγραφικά μήκη σε σχέση με το σταθμό της Apatity. Από τη διαφορά των χρονικών προφίλ είναι σαφές ότι υπάρχει σημαντική ανισοτροπία στην πρωταρχική φάση του γεγονότος και από τη διαφορά στους ασυμπτωτικούς κώνους υποδοχής φαίνεται ότι ο σταθμός της Oulu βρισκόταν σε ευνοϊκότερη θέση ώστε να καταγράψει καλύτερα την ανισοτροπική άφιξη των ηλιακών ενεργητικών σωματιών. Συνδυάζοντας μάλιστα τη μελέτη ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής ενός πλήθους σταθμών και του ανισοτροπικού μοντέλου NM-BANGLE (Plainaki et al., 2007) είναι δυνατός ο προσδιορισμός της πηγής ανισοτροπίας πάνω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η οποία μπορεί να μεταβληθεί ή όχι με το χρόνο (Plainaki et al., 2009).

Συμπεράσματα

Τα κύρια σημεία που προκύπτουν από τη μελέτη των ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής των μετρητών νετρονίων για τις σημαντικότερες επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας του 23ου ηλιακού κύκλου συνοψίζονται παρακάτω:

- Ο προσδιορισμός των ασυμπτωτικών κώνων υποδοχής ενός μεγάλου αριθμού σταθμών κοσμικής ακτινοβολίας και ειδικά για τους πολικούς σταθμούς είναι απαραίτητος για τη μελέτη και σωστή ερμηνεία ανισοτροπικών γεγονότων, όπως είναι οι επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Όσο περισσότερους σταθμούς έχουμε, τόσο καλύτερα τα αποτελέσματα αφού λαμβάνουμε πληροφορίες για ροές πρωταρχικών σημείων της κοσμικής ακτινοβολίας προερχόμενων από διάφορα σημεία του ουρανού.
- Ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τη δυσκαμψία ενός σταθμού, διακρίνουμε στενούς κώνους (πολικοί σταθμοί), λιγότερο στενούς κώνους (μεσαίου πλάτους σταθμοί) και ευρείς κώνους (σταθμοί χαμηλού πλάτους).
- Με την αύξηση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας οι ασυμπτωτικοί κώνοι ενός σταθμού τείνουν να γίνουν πιο ευρείς, καλύπτοντας έτσι ένα μεγαλύτερο τμήμα γεωγραφικών μηκών. Δε θα μπορούσαμε να καταλήξουμε σε ακριβή συμπεράσματα για περιπτώσεις έντονης γεωμαγνητικής δραστηριότητας, καθώς θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε ένα διαφορετικό μοντέλο.

Η μελέτη αυτή θα συνεχιστεί με τη χρήση πιο πολύπλοκων μαγνητοσφαιρικών μοντέλων, έτσι ώστε να εξαχθούν πιο ακριβή συμπεράσματα στο μέλλον.

Ευχαριστίες: Οι συγγραφείς ευχαριστούν τους συνεργάτες από τους σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας του Παγκοσμίου Δικτύου που ευχαρίστως παρέχουν τα δεδομένα τους για την διεξαγωγή αυτής της έρευνας. Επίσης εκφράζονται ευχαριστίες στον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας για την υποστήριξη του σταθμού κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας.

Βιβλιογραφία

- Μαυρομιχαλάκη Ε., (2008), *Φυσική κοσμικής ακτινοβολίας*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
- Πλαϊνιάκη Χ., (2007), *Φυσική Ηλιακών Κοσμικών Σωματίων με Δεδομένα από Μετρητές Νετρονίων και Δορυφόρους*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα
- Belov A., Eroshenko E., Kryakunova O., Kurt V., Yanke V., (2009), *GLEs in the last three solar cycles*, Proc. 31st ICRC, ID0993, Lodz
- Borie M.A. and Al-Thoy, (2001), *An extended features of the ground level cosmic ray event of September 1989*, Proc. 27th ICRC 2001, p.3450
- Eroshenko E., Belov A., Mavromichalaki H., Mariatos G., Oleneva V., Plainaki C., Yanke V., (2004), *Cosmic-Ray Variations During the Two Greatest Bursts of Solar Activity in the 23rd Solar Cycle*, Solar Physics, 224, 1-2, 345- 358
- Flückiger E. O., Buetikofer R., Desorgher L., Moser M.R., (2006), *The Role of GLEs in Space Weather*, 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, 3042
- Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Papaioannou A., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., (2009), *Using the real-time Neutron Monitor Database to establish an Alert signal*. Proc. 31st ICRC (Lodz), icrc1381
- McCracken K. G., Rao U. R., Shea M. A., (1962), *The Trajectories of Cosmic Rays in a High Degree Simulation of the Geomagnetic Field*, Technical Report, 77, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA
- McCracken K. G., Rao U. R., Fowler B. C., Shea M. A., Smart D. F., (1968), *Cosmic ray tables (asymptotic directions, etc.)* Annals of the IQSY 1, vol. 14, pp. 198-214, MIT Press, Cambridge, MA, USA
- Moraal H., Belov A and Clem J. M., (2000), *Design and Co-ordination of Multi-station International Neutron Monitor Networks*, Space Sci. Rev., 93, 285-303
- Plainaki C., Belov A., Eroshenko E., Kurt V., Mavromichalaki H., Yanke V., (2005), *Unexpected burst of solar activity recorded by neutron monitors during October- November 2003*, Adv. Space Res. 35, 691-696
- Plainaki C., Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., (2007), *Modelling ground level enhancements: Event of 20 January 2005*, J. Geophys. Res., 112, A4
- Plainaki C., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., (2009), *Neutron monitor asymptotic directions of viewing during the event of 13 December 2006*, Adv. Space Res., 43, 4, 518-522
- Shea M. A., Smart D. F., McCracken K. G., (1965), *A study of vertical cut off rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field*. J. Geophys. Res. 70, 4117-4130
- Smart D. F., Shea M. A. and Taskanen P. J., (1971), *A Determination of the Spectra, Spatial Anisotropy and Propagation Characteristics of the Relativistic Solar Cosmic-Ray Flux on November 18, 1968*, Proc. 12th Int. Cosmic Ray Conf., Tasmania, Australia
- Smart D. F., Shea M. A., Flückiger E. O., (2000), *Magnetospheric models and trajectory computations*, Space Sci. Rev. 93, p. 305-333

- Tsyganenko N. A., (1987), *Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels*, Planet. Space Sci. 35, 1347-1358
- Tsyganenko N. A., (1989), *A magnetospheric magnetic field model with the warped tail current sheet*, Planet. Space Sci., 37, 5-20
- Tsyganenko N. A., (1995), *Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause*, J. Geophys. Res. 100, No. A4, 5599-5612
- Tsyganenko N. A., (2002), *A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry. 1. Mathematical structure*, J. Geophys. Res. 107, No. A8, doi: 10.1029/2001JA000219
- Uddin W., Chandra R. and Ali S.S., (2006), *Extremely Energetic 4B/X17.2 Flare and Associated Phenomena*, J. Astrophys. and Astron. 27, 2 & 3, 267-276
- Wang R. and Wang J., (2006), *Investigation of the cosmic ray ground level enhancements during solar cycle 23*, Adv. Space Res., 38, 3, 489-492