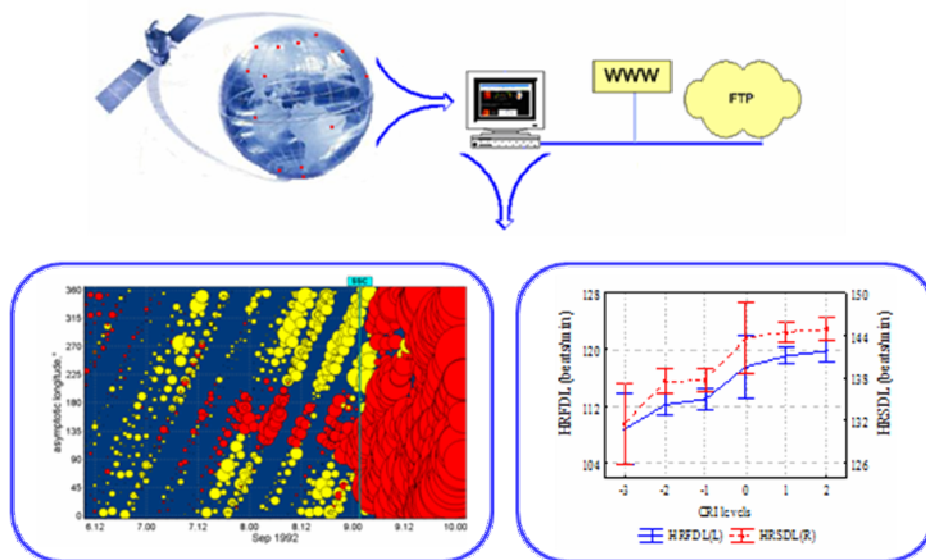




ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ & ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

## Προειδοποιήσεις γεωμαγνητικών διαταραχών και ανθρώπινες φυσιολογικές παράμετροι



Διδακτορική Διατριβή

Παπαηλιού Μαρία – Χριστίνα  
Α.Μ. 2008504

Επιβλέπ.: καθ. Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη  
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων

ΑΘΗΝΑ 2013

**ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ & ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**Προειδοποιήσεις γεωμαγνητικών διαταραχών  
και ανθρώπινες φυσιολογικές παράμετροι**

**Διδακτορική Διατριβή**

**Παπαηλιού Μαρία – Χριστίνα  
Α.Μ. 2008504**

**Επιβλέπ.: καθ. Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη  
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων**

ΑΘΗΝΑ 2013

*Στο εξώφυλλο προσαρμοσμένη  
εικόνα από Μαυρομιχαλάκη (2005)*

*Στους γονείς μου  
και στην αδελφή μου*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια Διδακτορικού Διπλώματος Φυσικών Επιστημών (Δ.Δ.Φ.Ε) του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και έχει ως σκοπό τον εντοπισμό των προειδοποιητικών σημάτων μειώσεων Forbush, ως επίσης και τον προσδιορισμό της πιθανής επίδρασης των μεταβολών του Διαστημικού Καιρού στην ανθρώπινη φυσιολογία.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συμμετείχαν και συνέβαλαν στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Αρχικά, ευχαριστώ θερμά την κύρια επιβλέπουσα αυτής της εργασίας Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κ. Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη όχι μόνο για την πολύτιμη βοήθειά της, αλλά κυρίως, για την εποικοδομητική συνεργασία αρκετών ετών, όπως επίσης και για την αμέριστη υποστήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας είχα τη δυνατότητα, ως μέλος της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών της οποίας είναι Επιστημονική Υπεύθυνη, να συνεργαστώ με αξιόλογα μέλη της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, να συμμετάσχω σε Ευρωπαϊκά Ερευνητικά Προγράμματα και να παρακολουθήσω ενεργά διεθνή συνέδρια και συναντήσεις εργασίας που οργανώθηκαν είτε στην Ελλάδα είτε στο εξωτερικό. Η συμμετοχή μου στο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα FP7/High resolution Neutron Monitor database/NMDB με τη συμμετοχή 12 Ευρωπαϊκών χωρών, ως επίσης και η οργάνωση των Διεθνών Συνεδρίων RADECS 2007 και Solar Extreme Events 2009 που έλαβα μέρος, αναφέρονται ιδιαίτερα.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και προς τα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, Καθηγητή κ. Ξενοφώντα Μουσά και την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Παναγιώτα Πρέκα – Παπαδήμα του Τμήματος Φυσικής, οι οποίοι υπήρξαν καθηγητές μου ήδη από το προπτυχιακό επίπεδο σπουδών μου, για την πολύτιμη συνδρομή τους στην υπόψιν εργασία αλλά και για την απλόχερη παροχή γνώσεων όλα αυτά τα χρόνια.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής της διδακτορικής διατριβής, τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Δαγκλή του Τμήματος Φυσικής, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Πολυξένη Νικολοπούλου – Σταμάτη της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών, την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Ευγενία Αντωνοπούλου – Χαραλαμποπούλου του Τμήματος Φυσικής και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Θεόδωρο Μερτζιμέκη του Τμήματος Φυσικής.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής σημαντική ήταν και η συμβολή διακεκριμένων συνεργατών της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Dr. Anatoly Belov, Dr. Eugenia Eroshenko, Dr. Victor Yanke και Mrs Maria Abunina της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN) της Russian Academy of Sciences, αλλά και τους Dr. Svetla Dimitrova του Space and Solar – Terrestrial Research Institute (SSRI) της Bulgarian Academy of Sciences, Dr. Elchin Babayev του Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi and Laboratory of Heliobiology και της National Academy of Sciences και τους Prof. Karel Kudela και Dr. Jana Stetiarova του Institute of Experimental Physics της Slovak Academy of Sciences.

Τους Επιστημονικούς Υπευθύνους και τις Ομάδες Κοσμικής Ακτινοβολίας των Σταθμών των Μετρητών Νετρονίων του Παγκοσμίου Δικτύου Μετρητών Νετρονίων που ευγενικά διέθεσαν τα δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας ευχαριστώ θερμά, γιατί χωρίς αυτά δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση αυτής της μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω για την πολυετή και αρμονική συνεργασία όλα τα μέλη της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, Δρς Χρήστο Σαρλάνη, Γεώργιο Σουβατζόγλου, Χριστίνα Πλαϊνάκη, ως και τους Γεώργιο Μαριάτο, Μαρία Ανδριοπούλου και Ευάγγελο Παούρη. Δεν θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φοιτητές του Τμήματος Φυσικής με τους οποίους συνεργάστηκα και καθοδήγησα Παναγιώτη Λουκά και Ελισάβετ Γιανναροπούλου, ως επίσης και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές της Ιατρικής Σχολής Αθανασία Κοκκινάρη και Σοφία Ιωαννίδου. Ευχαριστώ θερμά την Δρ. Μαρία Γεροντίδου γιατί με τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας και την υποστήριξή της συνέβαλε σημαντικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Αθανάσιο

Παπαϊωάννου για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε στα πλαίσια αυτής της διατριβής, αλλά και για την αμέριστη στήριξη και αγαστή συνεργασία όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ θερμά και τον Ακαδημαϊκόν και καθηγητή Γεώργιο Κοντόπουλο για την παρουσίαση εργασίας μου στην Ακαδημία Αθηνών.

Ακόμη, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, στους γονείς μου και στην αδελφή μου, για την συμπαράστασή τους και την ηθική και ψυχολογική στήριξή τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος οφείλω να μνημονεύσω τον Διευθυντή Ερευνών του ΚΕΑΕΜ της Ακαδημίας Αθηνών Δρ. Βασίλειο Πετρόπουλο, ο οποίος υπήρξε η αφορμή για τη γνωριμία μου και την ενασχόλησή μου με το θέμα της επίδρασης του Διαστημικού Καιρού στην ανθρώπινη υγεία.

Μ – Χ. Η. Παπαηλιού

## ABSTRACT

This particular thesis consists of two parts. In the first part space weather effects and more specifically Forbush decreases are studied based on space and ground measurements. Very often precursors in cosmic rays' behavior (pre-increases and/or pre-decreases) precede Forbush decreases and geomagnetic storms. These cosmic ray intensity variations do not coincide with the shock arrival, but begin well before (up to 24 hours) the onset of the main event.

In total 185 events examined for precursors were chosen from the Forbush decrease database of the IZMIRAN research group and were classified into groups according to three criteria. The first group includes 93 Forbush decreases which are characterized by an enhanced first harmonic of cosmic ray anisotropy  $A_{xy} (\geq 1.2\%)$  prior to the interplanetary disturbance arrival. In the second group 25 Forbush decreases related to western solar sources ( $50^\circ - 70^\circ\text{W}$ ) and accompanied with geomagnetic storms ( $Kp_{\max} \geq 5$ ) are selected. The third group consists of 67 events with amplitude  $> 3.99\%$ , which evolved on a quiet background (no other events were registered for 48 hours before and 18 hours after each Forbush decrease under examination). According to the heliolongitude of the solar source, the events of this category were separated into three subcategories: western ( $20^\circ < \text{heliolongitude} < 60^\circ$ ), eastern ( $-60^\circ < \text{heliolongitude} < -20^\circ$ ) and central ( $-21^\circ < \text{heliolongitude} < 21^\circ$ ). The selected events cover the time period 1967 – 2006. 'Global Survey Method' and 'Ring of Stations' method were used for analyzing the aforementioned events and plotting the asymptotic longitudinal cosmic ray distribution diagrams. Data on solar flares, solar wind speed, geomagnetic indices ( $Kp$  and  $Dst$ ), and interplanetary magnetic field were also used for the analysis of the examined cosmic ray intensity decreases. Results reveal clear signs of precursors in a satisfactory number of events.

Moreover in the second part of this thesis and in addition to the investigation concerning precursors of Forbush decreases, geomagnetic activity and cosmic ray intensity variations were statistically analyzed in relation to variations of human physiological parameters. Recent studies have shown that space weather effects can influence the cardiovascular state of the human organism. Human physiological state



can be affected by environmental changes, which require from the organism and its nervous system a series of adaptation reactions. Solar activity and other related geophysical changes influence basic biological functions and human health and mainly cardiovascular circulation, nervous and other systems.

Specifically the results from two heliobiological experiments are being presented. The samples include 1341 medical measurements concerning a group of 4018 aviators from Košice (Slovakia) for the time period from 1<sup>st</sup> January 1994 until 31<sup>st</sup> December 2002 and 1673 medical measurements concerning healthy volunteers from Baku (Azerbaijan) for the time period from 15<sup>th</sup> July 2006 until 31<sup>st</sup> March 2008. The statistical method, the ANalysis Of VAriance (ANOVA) was applied to establish the statistical significance levels ( $p$ ) of the effect of geomagnetic activity levels (geomagnetic indices  $A_p$  and  $D_{st}$ ) and cosmic ray intensity variations on the human physiological parameters (heart rate, RR intervals, arterial diastolic and systolic blood pressure). The effect of geomagnetic activity levels and cosmic ray intensity variations up to three days before and after the respective events (geomagnetic storms development and cosmic ray intensity decreases/increases) on the examined parameters was also investigated by the help of ANOVA and the method of superimposed epochs. Results reveal a potential influence of geomagnetic activity and cosmic ray intensity variations on the functionality of the human organism.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή .....	1
----------------	---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

#### 1. Ήλιος & γήινη μαγνητόσφαιρα

1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Εκρηκτικά φαινόμενα στον Ήλιο .....	7
1.2.1 Ηλιακές εκλάμψεις.....	7
1.2.2 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας.....	9
1.2.3 Σχέση ηλιακών εκλάμψεων και στεμματικών εκτινάξεων μάζας .....	12
1.3 Ηλιακός άνεμος.....	13
1.3.1 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο .....	14
1.4 Κρουστικά κύματα .....	17
1.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά κρουστικού κύματος.....	19
1.4.2 Μηχανισμοί επιτάχυνσης στα κρουστικά κύματα .....	22
1.4.3 Κρουστικό κύμα της Γης .....	26
1.4.4 Κρουστικά κύματα και στεμματικές εκτινάξεις μάζας.....	28
1.4.5 Κρουστικά κύματα και ρεύματα ηλιακού ανέμου .....	29
1.5 Γεωμαγνητικό πεδίο.....	30
1.5.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη του γεωμαγνητικού πεδίου.....	32
1.5.2 Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου μέσα στο γεωμαγνητικό πεδίο .....	33
1.5.3 Δομή του γεωμαγνητικού πεδίου .....	35
1.5.4 Ρεύματα στη μαγνητόσφαιρα.....	38
1.6 Γεωμαγνητικές καταιγίδες .....	41
1.6.1 Φάσεις γεωμαγνητικής καταιγίδας .....	43
1.6.2 Φυσική ερμηνεία γεωμαγνητικής καταιγίδας .....	45
1.6.3 Γεωμαγνητικές καταιγίδες και ηλιακή δραστηριότητα .....	46
1.7 Γεωμαγνητικοί δείκτες.....	48
1.7.1 Γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Ap.....	48
1.7.2 Γεωμαγνητικός δείκτης Dst .....	51

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

### 2. Μειώσεις Forbush

2.1 Εισαγωγή.....	55
2.2 Κοσμικές Ακτίνες .....	55
2.3 Μεταβολές κοσμικών ακτίνων .....	58
2.4 Μειώσεις Forbush .....	65
2.5 Τύποι των μειώσεων Forbush .....	68
2.6 Ιδιότητες των μειώσεων Forbush.....	71
2.7 Μηχανισμός των μειώσεων Forbush .....	73
2.7.1 Πρότυπο μαγνητικής φιάλης (Μοντέλο Alfven – Dorman) .....	74
2.7.2 Πρότυπο ωστικού κύματος (Μοντέλο Parker) .....	76
2.8 Προειδοποιητικά σήματα μειώσεων Forbush.....	78
2.8.1 Σχετικά παραδείγματα .....	85
2.8.2 Θεωρητική προσέγγιση.....	90

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

### 3. Μετρητές νετρονίων

3.1 Εισαγωγή.....	99
3.2 Συστήματα καταγραφής σωματιδίων.....	99
3.3 Μετρητές Νετρονίων .....	104
3.3.1 Αρχή λειτουργίας μετρητών νετρονίων .....	107
3.3.2 Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών .....	115
3.4 Δίκτυα μετρητών νετρονίων .....	118
3.4.1 Ιστορική αναδρομή .....	119
3.4.2 Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων.....	120
3.4.2.1 Παραδείγματα παγκοσμίων δικτύων μετρητών νετρονίων .....	121
3.4.2.1.1 Spaceship Earth.....	121
3.4.2.1.2 Athens Neutron Monitor Data Processing (ANMODAP) Center .....	123
3.4.2.1.3 Βάση δεδομένων NMDB .....	124
3.4.3 Δίκτυα μετρητών νετρονίων και έρευνα.....	128
3.4.4 Δίκτυα μετρητών νετρονίων και εφαρμογές.....	130

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

### 4. Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων

4.1 Εισαγωγή.....	135
4.2 Μαγνητική δυσκαμψία R.....	135
4.3 Δυναμική φορτισμένων σωματιδίων σε διπολικό μαγνητικό πεδίο .....	137
4.4 Ασυμπτωτικές διευθύνσεις .....	143
4.5 Μέθοδος ‘Ring of Stations’ .....	147
4.6 Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης .....	151
4.7 Βάση μειώσεων Forbush.....	156
4.7.1 Χαρακτηριστικά μειώσεων Forbush.....	163
4.7.2 Αποτελέσματα από τη βάση των μειώσεων Forbush .....	166

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

### 5. Στατιστική ανάλυση γεγονότων

5.1 Εισαγωγή.....	173
5.2 Κριτήρια επιλογής.....	173
5.3 Κατανομές των υπό εξέταση γεγονότων .....	180

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

### 6. Προειδοποιήσεις μειώσεων Forbush

6.1 Εισαγωγή.....	191
6.2 Κριτήριο Ανισοτροπίας.....	191
6.2.1 Προ-μειώσεις μακράς διάρκειας και σε ορισμένο ασυμπτωτικό μήκος.....	192
6.2.1.1 Ανάλυση γεγονότων 1 <sup>ης</sup> ομάδας .....	193
6.2.1.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων 1 <sup>ης</sup> ομάδας.....	195
6.2.2 Προ-αυξήσεις σε ασυμπτωτικό μήκος άνω των 180° .....	198
6.2.2.1 Ανάλυση γεγονότων 2 <sup>ης</sup> ομάδας .....	199
6.2.2.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων 2 <sup>ης</sup> ομάδας.....	206
6.2.3 Προ-μειώσεις τυχαίας διάρκειας και ασυμπτωτικού μήκους .....	212
6.2.3.1 Ανάλυση γεγονότων 3 <sup>ης</sup> ομάδας .....	212
6.2.3.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων 3 <sup>ης</sup> ομάδας.....	214
6.3 Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων .....	218
6.3.1 Ανάλυση γεγονότων.....	219
6.3.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων .....	224

6.4 Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush.....	229
6.4.1 Δυτικές πηγές.....	230
6.4.1.1 Ανάλυση γεγονότων ομάδας δυτικών πηγών .....	231
6.4.1.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων ομάδας δυτικών πηγών.....	234
6.4.2 Ανατολικές πηγές.....	238
6.4.2.1 Ανάλυση γεγονότων ομάδας ανατολικών πηγών .....	238
6.4.2.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων ομάδας ανατολικών πηγών.....	242
6.4.3 Κεντρικές πηγές .....	247
6.4.3.1 Ανάλυση γεγονότων ομάδας κεντρικών πηγών.....	248
6.4.3.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων ομάδας κεντρικών πηγών.....	253
6.5 Άλλες περιπτώσεις .....	261
6.6 Συμπεράσματα .....	268

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

### 7. Μεταβολές του διαστημικού καιρού & ανθρώπινες φυσιολογικές παράμετροι

7.1 Εισαγωγή.....	283
7.2 Βασικές πληροφορίες.....	283
7.3 Λειτουργία της καρδιάς και ηλεκτροκαρδιογράφημα .....	292
7.3.1 Καρδιακός ρυθμός και διάστημα RR .....	293
7.3.2 Αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση .....	297
7.4 Μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης .....	298
7.4.1 Στατιστικές υποθέσεις και επίπεδο σημαντικότητας .....	298
7.4.2 Συσχετισμοί: ισχύς και αξιοπιστία .....	299
7.4.3 Επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας p-level .....	301
7.4.4 Μέθοδος ANalysis Of VAriance .....	302
7.4.5 Μέθοδος της υπερεπίθεσης εποχών .....	305
7.4.6 Στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων .....	306
7.5 Πείραμα Košice (Σλοβακίας) .....	309
7.5.1 Πειραματικά δεδομένα.....	309
7.5.1.1 Ιατρικά δεδομένα .....	309
7.5.1.2 Δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου .....	310
7.5.1.3 Δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας .....	311
7.5.2 Αποτελέσματα.....	314
7.5.2.1 Ως προς τη γεωμαγνητική δραστηριότητα.....	314

7.5.2.2 Ως προς την κοσμική ακτινοβολία.....	326
7.6 Πείραμα Baku (Αζερμπαϊτζάν).....	333
7.6.1 Πειραματικά δεδομένα.....	333
7.6.1.1 Ιατρικά δεδομένα .....	333
7.6.1.2 Δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου .....	334
7.6.1.3 Δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας .....	335
7.6.2 Αποτελέσματα.....	337
7.6.2.1 Ως προς τη γεωμαγνητική δραστηριότητα.....	337
7.6.2.2 Ως προς την κοσμική ακτινοβολία.....	344
7.7 Συμπεράσματα .....	348
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII</b>	
<b>8. Συμπεράσματα – Προοπτικές</b>	
8.1 Εισαγωγή.....	355
8.2 Επιπτώσεις διαστημικού καιρού .....	355
8.3 Συμπεράσματα .....	363
8.4 Προοπτικές.....	368
 <b>Βιβλιογραφία</b> .....	 371
 <b>Παράρτημα Α</b> .....	 397
 <b>Παράρτημα Β</b> .....	 405
 <b>Παράρτημα Γ</b> .....	 413

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΩΝ

<b>CRI</b>	Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας
<b>FD</b>	Μείωση Forbush
<b>SSC</b>	Αιφνίδια έναρξη καταιγίδας
<b>GMA</b>	Γεωμαγνητική δραστηριότητα
<b>CME</b>	Στεμματική εκτίναξη μάζας
<b>HR</b>	Καρδιακός ρυθμός
<b>HRR</b>	Καρδιακός ρυθμός σε ηρεμία
<b>HRMAX</b>	Καρδιακός ρυθμός σε μέγιστο βαθμό φόρτου
<b>HRFDL</b>	Καρδιακός ρυθμός σε 1 <sup>ο</sup> βαθμό φόρτου
<b>HRSDL</b>	Καρδιακός ρυθμός σε 2 <sup>ο</sup> βαθμό φόρτου
<b>SP</b>	Συστολική πίεση
<b>SPR</b>	Συστολική πίεση σε ηρεμία
<b>SPMAX</b>	Συστολική πίεση σε μέγιστο βαθμό φόρτου
<b>SPFDL</b>	Συστολική πίεση σε 1 <sup>ο</sup> βαθμό φόρτου
<b>SPSDL</b>	Συστολική πίεση σε 2 <sup>ο</sup> βαθμό φόρτου
<b>DP</b>	Διαστολική πίεση
<b>DPR</b>	Διαστολική πίεση σε ηρεμία
<b>DPMAX</b>	Διαστολική πίεση σε μέγιστο βαθμό φόρτου
<b>DPFDL</b>	Διαστολική πίεση σε 1 <sup>ο</sup> βαθμό φόρτου
<b>DPSDL</b>	Διαστολική πίεση σε 2 <sup>ο</sup> βαθμό φόρτου

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συνθήκες που επικρατούν στον Ήλιο, τον ηλιακό άνεμο, τη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα και οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και την αξιοπιστία διαστημικών ή επίγειων τεχνολογικών συστημάτων ή/και να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία ή ζωή ορίζονται ως Διαστημικός Καιρός (U.S. National Space Weather Programme, 1995; Schwenn, 2006; Babayev et al., 2007; Dimitrova, 2008b; Dimitrova et al., 2009a).

Ο διαστημικός καιρός εξαρτάται και οφείλεται κυρίως στα έκτακτα εκρηκτικά γεγονότα που συμβαίνουν στον Ήλιο, όπως είναι οι εκλάμψεις και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Τα γεγονότα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την ηλιακή σωματιδιακή εκπομπή υπό τη μορφή ηλιακού ανέμου. Επομένως, εφόσον ο Ήλιος, ο ηλιακός άνεμος και η Γη είναι οι κύριοι παράγοντες που σχετίζονται με την προέλευση και την ανάπτυξη του διαστημικού καιρού, ο τρόπος με τον οποίον αλληλεπιδρούν και σχετίζονται μεταξύ τους αποτελεί αντικείμενο εντατικής μελέτης.

Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες αλληλεπιδρούν με παροδικές διαταραχές που κινούνται από τον Ήλιο προς τη Γη και με αυτό τον τρόπο μεταφέρουν πληροφορίες για την επικείμενη διαταραχή πριν αυτή φθάσει στη Γη. Η διαταραχή αυτή δημιουργεί με τη σειρά της διαταραχές στη μαγνητόσφαιρα, που μπορούν να προκαλέσουν καταιγίδα στο γεωμαγνητικό πεδίο. Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες συχνά συνοδεύονται από μειώσεις της έντασης των κοσμικών ακτίνων, γνωστές ως μειώσεις Forbush, που οφείλονται σε αυτή τη διαταραχή στην ηλιόσφαιρα (Forbush, 1958; Lockwood, 1971).

Σε αντίθεση με τις ήρεμες περιόδους, πριν από τη μείωση Forbush παρατηρούνται κάποιες ανωμαλίες στην κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως προ-μειώσεις ή προ-αυξήσεις, καθώς επίσης και αλλαγές στην ανισοτροπία. Αυτές οι ανωμαλίες στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι γνωστές ήδη από παλαιότερα (Blokh et al., 1959), αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αποτελούν αντικείμενο συστηματικής μελέτης (Nagashima et al., 1993;



Belov et al., 1995; Belov et al., 2001; Leerungnavarat et al., 2003; Munakata et al., 2005; Asipenka et al., 2009a). Πρόκειται για μεταβολές στη συμπεριφορά των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων που παρατηρούνται από 1 έως και 20 ώρες πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος (Belov et al., 1995; Belov et al., 2001) και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση της επικείμενης διαταραχής και της γεωμαγνητικής καταιγίδας.

Ο διαστημικός καιρός, όμως, μπορεί να επιδράσει και στη φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών αρκετοί επιστήμονες ασχολούνται με την πιθανή επίδραση των μεταβολών του διαστημικού καιρού στα ζωντανά όντα. Από τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα διάφορες έρευνες που διεξάγονται είτε από μεμονωμένα άτομα είτε από ομάδες σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο εξετάζουν πώς ο Ήλιος, οι διαδικασίες στη γήινη μαγνητόσφαιρα, η γεωμαγνητική δραστηριότητα και οι μεταβολές στην κοσμική ακτινοβολία μπορούν να επηρεάσουν την ανθρώπινη φυσιολογική και καρδιαγγειακή κατάσταση (Kleimenova & Troitskaia, 1992; Oraevskii et al., 1998; Dorman et al., 2001; Zhadin, 2001; Cornelissen et al., 2002; Palmer et al., 2006; Mendoza & Sánchez de la Peña, 2010; Diaz-Sandoval et al., 2011; Singh et al., 2011).

Οι παραπάνω έρευνες δημιούργησαν τρεις νέους επιστημονικούς κλάδους, τον βιογεωμαγνητισμό (biogeomagnetism), την κλινική κοσμοβιολογία (clinical cosmobiology) και την ηλιοβιολογία (heliobiology). Ως βιογεωμαγνητισμός (Dorman et al., 2001) ορίζεται η επίδραση των παραμέτρων του διαστημικού καιρού, μέσω του γεωμαγνητικού πεδίου, στην παθολογική κατάσταση διάφορων ασθενειών (Dorman et al., 2001; Stoupe, 2002). Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα αφορούν ασθένειες του καρδιαγγειακού και νευρικού συστήματος, ενώ εργαστηριακά αποτελέσματα σχετικά με την ευαισθησία του αίματος στην ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα στηρίζουν αυτό το νέο πεδίο (Dorman et al., 2001). Αντίστοιχα, κλινική κοσμοβιολογία είναι ο κλάδος που εξετάζει τη σχέση μεταξύ της συχνότητας των θανάτων λόγω καρδιακών αρρυθμιών, εμφραγμάτων του μυοκαρδίου, άλλων καρδιαγγειακών ασθενειών, εγκεφαλικών επεισοδίων, ανθρωποκτονιών και αυτοκτονιών με το επίπεδο φυσικής δραστηριότητας που παρατηρείται στο περιβάλλον (Stoupe, 2006). Τέλος, η ηλιοβιολογία ή όπως αναφέρεται στον Babayev (2008) κοσμοβιολογία (cosmobiology) ή αστροβιολογία (astrobiology) εξετάζει την

επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στους ζωντανούς οργανισμούς και ιδίως στον άνθρωπο (Palmer et al., 2006; Babayev & Allahverdiyeva, 2007).

Η παρούσα ερευνητική διατριβή αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μελετώνται διαφορετικά παραδείγματα μειώσεων Forbush για τη χρονική περίοδο 1967 – 2006 τα οποία παρουσιάζουν προειδοποιητικά σήματα. Οι υπό εξέταση περιπτώσεις έχουν επιλεγεί από μια λίστα γεγονότων με βάση τρία κριτήρια:

α) το κριτήριο της ανισοτροπίας, δηλαδή η τιμή της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  να είναι μεγαλύτερη από 1.2%,

β) το κριτήριο δυτικών ηλιακών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων, δηλαδή οι τιμές για το ηλιογραφικό μήκος των ηλιακών εκλάμψεων και τον γεωμαγνητικό δείκτη  $Kp_{max}$  κυμαίνονται από  $50^\circ$  έως  $70^\circ$  W και 5.0 έως 9.0 αντίστοιχα και

γ) το κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush, δηλαδή το πλάτος της μείωσης να είναι  $> 3.99\%$  και το γεγονός να έχει εξελιχτεί σε ένα ήρεμο υπόβαθρο.

Το ~27% των γεγονότων που επιλέχθηκαν με βάση το πρώτο κριτήριο, το 60% των γεγονότων που επιλέχθηκαν με βάση το δεύτερο κριτήριο και το ~69% των γεγονότων τα οποία επιλέχθηκαν με βάση το τρίτο κριτήριο παρουσίασαν προειδοποιητικά σήματα στα διαγράμματα χρονικής κατανομής ασυμπτωτικού μήκους της κοσμικής ακτινοβολίας.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο πειραμάτων ηλιοβιολογίας που έλαβαν χώρα:

α) στο Košice (Σλοβακία) για τη χρονική περίοδο 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1994 έως 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2002 και

β) στο Baku (Αζερμπαϊτζάν) για τη χρονική περίοδο 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2006 έως 31<sup>η</sup> Μαρτίου 2008.

Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι μεταβολές ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων, όπως καρδιακός ρυθμός, αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση και διαστήματα RR, σε σχέση με μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα η γεωμαγνητική δραστηριότητα και οι μεταβολές στην ένταση της κοσμικής

ακτινοβολίας πιθανώς να επιδρούν στη φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, τη βιβλιογραφία και τρία παραρτήματα Α, Β και Γ.

Στο Κεφάλαιο I γίνεται μια αναλυτική αναφορά στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον Ήλιο (εκλάμψεις και στεμματικές εκπομπές μάζας) όπως και στον ηλιακό άνεμο. Επίσης, περιγράφεται η δομή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και η διαδικασία δημιουργίας των κρουστικών κυμάτων στον διαπλανητικό χώρο. Έπειτα, παρουσιάζεται το γεωμαγνητικό πεδίο ως προς τη δομή του αλλά και την κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε αυτό. Επιπλέον, ορίζονται οι γεωμαγνητικές καταιγίδες και οι κυριότεροι γεωμαγνητικοί δείκτες.

Στο Κεφάλαιο II γίνεται μια σύντομη αναφορά στην έννοια των κοσμικών ακτίνων και των κυριότερων μεταβολών τους. Ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, οι οποίες ορίζονται ως μειώσεις Forbush. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι ιδιότητες και οι μηχανισμοί αυτού του φαινομένου, ενώ παρουσιάζεται και μία πιο αναλυτική περιγραφή των προειδοποιητικών σημάτων, δηλαδή προ-αυξήσεων ή προ-μειώσεων στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, που λαμβάνουν χώρα πριν το κύριο γεγονός της μείωσης.

Στο Κεφάλαιο III παρουσιάζονται εν συντομία τα καταγραφικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταμέτρηση των διαφόρων συνιστωσών της κοσμικής ακτινοβολίας. Περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας ενός μετρητή νετρονίων και γίνεται αναφορά τόσο στο Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων όσο και στην Υψηλής Ανάλυσης Βάση Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων σε πραγματικό χρόνο (High Resolution Real Time Neutron Monitor Database – NMDB).

Στο Κεφάλαιο IV ορίζονται οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις και αφού περιγραφεί η κοινή βάση των μειώσεων Forbush της ερευνητικής ομάδας του IZMIRAN και της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, παρουσιάζονται αναλυτικά η ‘Global Survey Method’ και η μέθοδος ‘Ring of Stations’, η οποία έχει

χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των διαγραμμάτων χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας.

Στο Κεφάλαιο V παρουσιάζονται αναλυτικά τα τρία κριτήρια επιλογής των υπό εξέταση μειώσεων Forbush. Παρέχονται στατιστικά στοιχεία και για τις τρεις κατηγορίες, όπως επίσης και ετήσιες και μηνιαίες κατανομές όλων των γεγονότων.

Στο Κεφάλαιο VI δίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται όλα τα παραδείγματα των μειώσεων Forbush που μελετήθηκαν και έδωσαν προειδοποιητικά σήματα στα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτά έχουν ταξινομηθεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο επιλογής τους αλλά και σε τρεις επιπλέον κατηγορίες ανάλογα με τη φύση και τη διάρκεια των προειδοποιητικών σημάτων.

Στο Κεφάλαιο VII αναφέρονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της λειτουργίας της καρδιάς και ορίζονται σύντομα ο καρδιακός ρυθμός, η αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση και τα διαστήματα RR , αφού οι μεταβολές αυτών των μεγεθών θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια ως ενδείξεις της σχέσης μεταξύ των γεωμαγνητικών μεταβολών και των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και της λειτουργίας του ανθρώπινου οργανισμού. Περιγράφονται οι στατιστικές μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων αλλά και οι κυριότερες αρχές στατιστικής ανάλυσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ο τρόπος διεξαγωγής και τα πειραματικά δεδομένα για καθένα από τα δύο πειράματα ηλιοβιολογίας. Αναλύονται τα αποτελέσματα, τα οποία έχουν ταξινομηθεί και παρουσιάζονται ξεχωριστά για τη γεωμαγνητική δραστηριότητα και τις μεταβολές στην ένταση των κοσμικών ακτίνων.

Στο Κεφάλαιο VIII εξετάζονται και παρουσιάζονται σύντομα μερικές από τις πιο σημαντικές επιπτώσεις του διαστημικού καιρού τόσο στις ανθρώπινες δραστηριότητες όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Έπειτα, συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, αναφέρονται συνοπτικά τα πιο σημαντικά αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από αυτή τη μελέτη και παρουσιάζονται οι μελλοντικές προοπτικές σχετικά με το υπό εξέταση θέμα.

Ακόμη παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφία επί του θέματος και τέλος στα Παραρτήματα Α, Β και Γ δίνονται πίνακες με τον συνολικό αριθμό των υπό εξέταση γεγονότων (Παράρτημα Α), τον συνολικό αριθμό των γεγονότων που έδωσαν προειδοποιητικά σήματα (Παράρτημα Β) και τον κατάλογο των δημοσιεύσεων (Παράρτημα Γ).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

## ΗΛΙΟΣ & ΓΗΙΝΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΦΑΙΡΑ

### 1.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται μερικές βασικές έννοιες σχετικά με τις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας. Εξετάζεται η θεωρία των κρουστικών κυμάτων και περιγράφονται τόσο τα χαρακτηριστικά και η δομή του γεωμαγνητικού πεδίου όσο και η κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε αυτό. Τέλος και αφού έχουν παρουσιαστεί τα ρεύματα που αναπτύσσονται στη μαγνητόσφαιρα ορίζονται οι γεωμαγνητικές καταιγίδες αλλά και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή τους.

### 1.2 Εκρηκτικά φαινόμενα στον Ήλιο

Ο Ήλιος συνταράσσεται περιοδικά από ένα πλήθος βίαιων, αλλά περιορισμένων τοπικά, γεγονότων τα οποία αποτελούν την ηλιακή δραστηριότητα. Τα σημεία εκδήλωσης αυτής της δραστηριότητας ονομάζονται κέντρα δράσης και παρουσιάζονται αποκλειστικά σε δύο ζώνες ηλιογραφικών πλατών  $5^\circ$  έως  $40^\circ$  βόρεια και νότια του ηλιακού ισημερινού αντίστοιχα. Τα φαινόμενα αυτά είναι περιοδικά και τα περισσότερα συμπληρώνουν έναν πλήρη κύκλο ζωής περίπου κάθε έντεκα χρόνια, περίοδος η οποία καλείται ηλιακός κύκλος.

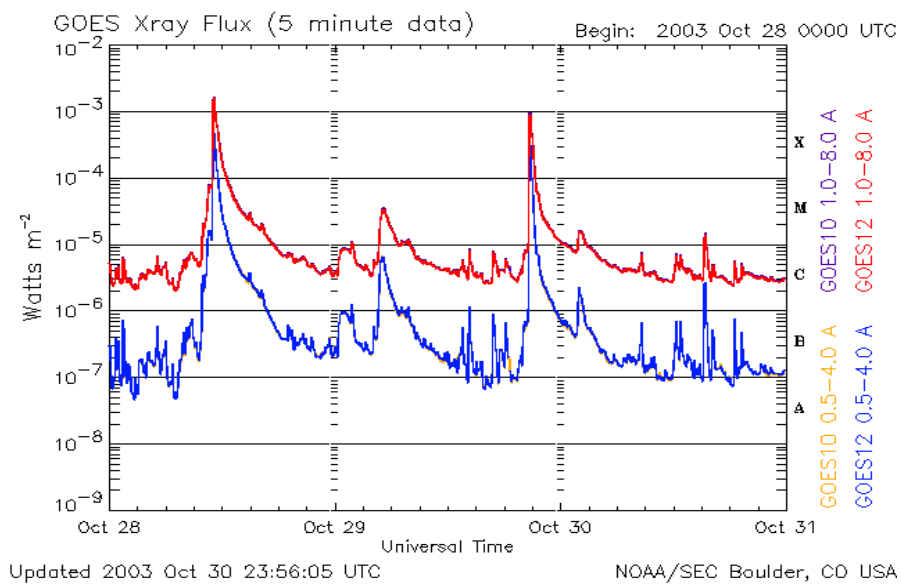
#### 1.2.1 Ηλιακές εκλάμψεις

Ένα φαινόμενο της ηλιακής δραστηριότητας είναι οι ηλιακές εκλάμψεις (solar flares). Εμφανίζονται ως ξαφνικές και απότομες εκρήξεις με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας (από  $10^{29}$  έως  $10^{32}$  erg) και παρατηρούνται συνήθως σε περιοχές όπου υπάρχουν κηλίδες (Usoskin & Mursula, 2001). Παρατηρούνται για πολύ περιορισμένο χρόνο, από μερικά λεπτά έως λίγες ώρες και εκτείνονται σε μία επιφάνεια περίπου  $10^{19}$  cm<sup>2</sup>. Ως αίτιο δημιουργίας των εκλάμψεων θεωρείται η

αστάθεια του μαγνητικού πεδίου στις περιοχές όπου εμφανίζονται (Πρέκα, κ.α., 2009).

Συνήθως οι εκλάμψεις εμφανίζονται σε περιοχές αυξημένης δραστηριότητας. Μόλις σχηματιστεί ένα ζευγάρι κηλίδων πάνω στην ηλιακή φωτόσφαιρα και για όσο χρόνο αυτό διατηρείται στη ζωή, παρατηρείται, κατά καιρούς, μία έκρηξη, δηλαδή απότομη απελευθέρωση υλικού και ενέργειας σε όλα τα μήκη κύματος από τις περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο κηλίδες, με άμεσο αποτέλεσμα την αιφνίδια αύξηση της λαμπρότητάς στην περιοχή αυτή.

Τις εκλάμψεις ακολουθεί ακτινοβολία σε όλα σχεδόν τα μήκη κύματος, από τα ραδιοκύματα μέχρι τις ακτίνες γ (Πρέκα, κ.α., 2009). Επιπλέον κατά τη διάρκεια της έκλαμψης, λόγω των τεράστιων ποσών ενέργειας που εκλύονται, σωματίδια (ηλεκτρόνια, πρωτόνια και ελαφρείς πυρήνες) αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια.



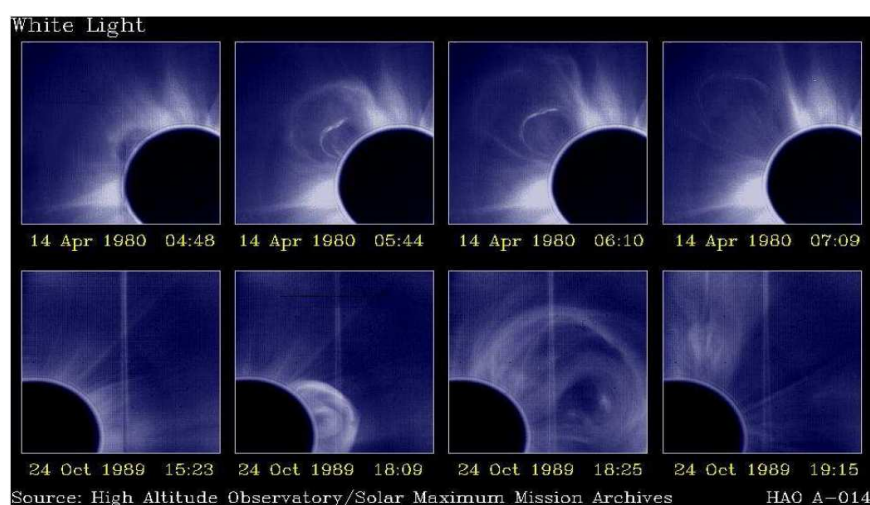
Σχ. 1.1 Ροή ακτίνων X για το χρονικό διάστημα 28–31 Οκτωβρίου 2003. Οι ακίδες δηλώνουν αύξηση στην εκπομπή ακτίνων X εξαιτίας της ύπαρξης μίας ηλιακής έκλαμψης.

Οι εκλάμψεις ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες A, B, C, M και X (Σχ. 1.1) ανάλογα με τη μέγιστη ροή (σε  $W/m^2$ ) από 100 έως 800 picometer ακτίνων X κοντά στη Γη, σύμφωνα με τους δορυφόρους GOES (Geostationary Operational

Environmental Satellites). Κάθε κατηγορία έχει μία μέγιστη ροή δέκα φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη, με τη τάξη X να παρουσιάζει μέγιστο στα  $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>. Κάθε κατηγορία χωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες με βάση μία γραμμική κλίμακα από το 1 έως το 9. Για παράδειγμα μία X2 έκλαμψη είναι δύο φορές ισχυρότερη από μία έκλαμψη X1 και πολύ ισχυρότερη από μία έκλαμψη M5. Οι ισχυρότερες εκλάμψεις, κατηγορίας M και X, συνδέονται συχνά με ποικίλα γεγονότα στο διαστημικό περιβάλλον κοντά στη Γη, όπως διαπλανητικές διαταραχές, μειώσεις Forbush, κτλ.

### 1.2.2 Στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Τέλος, ένα άλλο σημαντικό φαινόμενο της ηλιακής δραστηριότητας είναι οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας (coronal mass ejections, CMEs) (Σχ. 1.2). Όπως αναφέρεται στον Schwenn (2006) ως στεμματική εκτίναξη μάζας ορίζεται η παρατηρήσιμη μεταβολή στη δομή του στέμματος η οποία α) παρατηρείται σε χρονική κλίμακα από μερικά min έως κάποιες ώρες και β) περιλαμβάνει την εμφάνιση (και την κίνηση προς τα έξω) ενός νέου, διακριτού, φωτεινού σχηματισμού στο οπτικό πεδίο ενός στεμματογράφου. Σε αυτόν τον ορισμό μπορεί να προστεθεί το γεγονός ότι η CME περιλαμβάνει την αποβολή πλάσματος και μαγνητικού πεδίου από το ηλιακό στέμμα προς τον διαπλανητικό χώρο (Daglis, 2001; Πρέκα, κ.α., 2009).

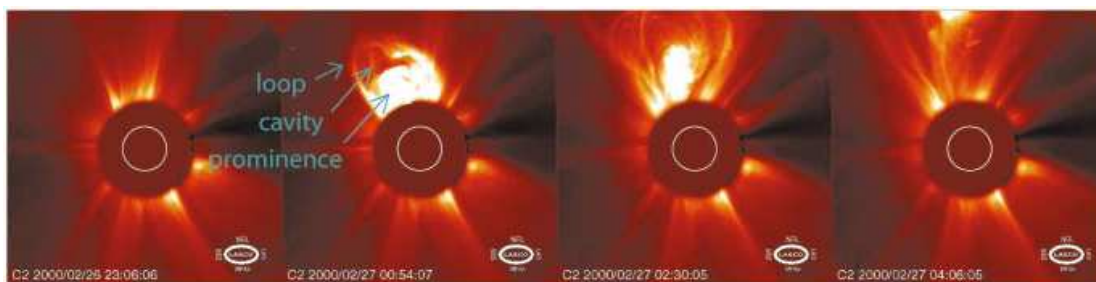


Σχ. 1.2 Παραδείγματα χρονικής εξέλιξης δύο στεμματικών εκτινάξεων μάζας, οι οποίες σημειώθηκαν στις 14 Απριλίου 1980 (άνω διαγράμματα) και στις 24 Οκτωβρίου 1989 (κάτω διαγράμματα) (<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/cme.htm>).



Το ανώτερο στρώμα της ηλιακής ατμόσφαιρας, το στέμμα, δομείται από ισχυρά μαγνητικά πεδία. Οι μαγνητικοί βρόχοι είναι συνήθως σταθεροί για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο κατά καιρούς γίνονται ασταθείς και εκρήγνυνται (Usoskin & Mursula, 2001). Το υλικό τους εκτοξεύεται βαθμιαία στο διάστημα με μεγάλη ταχύτητα ή ενσωματώνεται μέσα στον γρήγορο ηλιακό άνεμο, ο οποίος προέρχεται από τις στεμματικές οπές του Ήλιου κυρίως τις πολικές.

Η δομή μίας CME αποτελείται από τρία μέρη (Linker et al., 2003; Schwenn, 2006; Hanslmeier, 2007), έναν φωτεινό πυρήνα (bright kernel), ο οποίος σχετίζεται με υλικό προεξοχής (prominence), μία σκοτεινή κοιλότητα (dark cavity) και ένα φωτεινό εξωτερικό βρόχο (loop), όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.



Σχ. 1.3 Τα τρία βασικά μέρη της δομής της CME (Linker et al., 2003).

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των CMEs συνοψίζονται παρακάτω:

#### ❖ Εξάρτηση από τον ηλιακό κύκλο

Κατά το ηλιακό μέγιστο μπορούν να παρατηρηθούν περίπου 2 – 3 CMEs ημερησίως (Daglis, 2001), ενώ κατά τη διάρκεια του ηλιακού ελαχίστου σημειώνεται 0.25 CME ημερησίως (Cane, 2000). Αυτό συμβαίνει επειδή οι CMEs συνήθως σχετίζονται με ηλιακές εκλάμψεις και νήματα, η εμφάνιση των οποίων μεταβάλλεται με τον ηλιακό κύκλο (Kallenrode, 1998).

#### ❖ Κατανομή κατά πλάτος

Κατά το ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας οι CMEs συγκεντρώνονται σε μία ζώνη γύρω από τον ισημερινό, ενώ κατά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας

προέρχονται από ένα μεγάλο εύρος πλατών (Hanslmeier, 2007), το οποίο μπορεί να φτάσει και τις 60° βόρεια ή νότια (Daglis, 2001).

#### ❖ Γωνιακό εύρος

Το γωνιακό τους εύρος κυμαίνεται από μερικές μοίρες έως και 120°, με μία μέση τιμή περίπου 50° (Cane, 2000). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι CMEs με εύρος μεταξύ 120° και 360° καλούνται partial CMEs, ενώ οι CMEs με γωνιακό εύρος 360° λέγονται halo CMEs (Schwenn, 2006).

#### ❖ Ταχύτητα

Οι ταχύτητες των CMEs κυμαίνονται από μερικά  $\text{km s}^{-1}$  μέχρι και  $3000 \text{ km s}^{-1}$  (Schwenn, 2006), με μέση ταχύτητα γύρω στα  $400 \text{ km s}^{-1}$  (Cane, 2000). Οι πιο γρήγορες CMEs παρατηρούνται κατά το ηλιακό μέγιστο (Cane, 2000).

#### ❖ Μάζα και ενέργεια

Η συνολική μάζα, η οποία εκπέμπεται κατά τη διάρκεια της CME, κυμαίνεται από  $10^{13} \text{ g}$  έως  $10^{16} \text{ g}$ , ενώ η συνολική ενέργεια από  $10^{27} \text{ erg}$  έως  $10^{33} \text{ erg}$ , με μέσες τιμές  $1.4 \cdot 10^{15} \text{ g}$  και  $2.6 \cdot 10^{20} \text{ erg}$  αντίστοιχα (Schwenn, 2006).

#### ❖ Γεωμετρία

Οι CMEs εμφανίζονται σε διαφορετικές μορφές και έκταση (Daglis, 2001). Η πιο τυπική μορφή μίας CME είναι αυτή του βρόχου (loop – like structure). Παρ' όλα αυτά σημειώνονται και άλλες μορφολογίες, όπως, για παράδειγμα, ακίδα (spike), πολλαπλή ακίδα (multiple spike), ακτινωτή (fan), εκπνοή επισείων (streamer blowout), κτλ. Οι κυριότερες διαφορές είναι η μικρότερη έκταση και η δομή η οποία διαφέρει από αυτή του κλειστού βρόχου (Kallenrode, 1998).

Ο όρος CME αναφέρεται στο φαινόμενο το οποίο καταγράφεται από τους στεμματογράφους και όχι στο υλικό του ηλιακού ανέμου (Cane, 2000). Στο διαπλανητικό μέσο, οι CMEs ανιχνεύονται σε απόσταση 1 AU δύο με τρεις ημέρες αφού φύγουν από τον Ήλιο. Συνήθως προηγείται ένα διαπλανητικό κρουστικό κύμα και οι ταχύτητές τους γενικά κυμαίνονται σε ένα εύρος  $100 \text{ km s}^{-1}$  σε σχέση με τη ταχύτητα του περιβάλλοντος ηλιακού ανέμου, υποδεικνύοντας ότι μία σημαντική αλληλεπίδραση έχει συμβεί μεταξύ CME και ηλιακού ανέμου (Daglis, 2001). Έτσι, οι

CMEs οι οποίες διογκώνονται και διαδίδονται στον διαπλανητικό χώρο με κατεύθυνση προς τη Γη και είναι υπεύθυνες για τον σχηματισμό κρουστικών κυμάτων χωρίς συγκρούσεις (παρόμοιων με το κρουστικό κύμα μπροστά από τη γήινη μαγνητόσφαιρα) καλούνται διαπλανητικές στεμματικές εκτινάξεις μάζας (interplanetary coronal mass ejections - ICMEs) (Cane, 2000; Schwenn, 2006; Belov, 2008).

Η παρακολούθηση των CMEs στον διαπλανητικό χώρο κοντά στη Γη είναι απαραίτητη για την κατανόηση και πρόγνωση του διαστημικού καιρού. Ως προς τον διαστημικό καιρό, τα πιο σημαντικά φυσικά χαρακτηριστικά, τα οποία μετρώνται στην απόσταση 1 AU, είναι η τοπολογία του μαγνητικού πεδίου της CME (κυρίως η διάρκεια και η ένταση της νότιας συνιστώσας) και το μέγεθος της ταχύτητας και πυκνότητας του ηλιακού ανέμου (όπως και το κρουστικό κύμα που σχετίζεται με αυτή) (Daglis, 2001).

Οι Burlaga et al. (1981) και Klein & Burlaga (1982) σημείωσαν ότι ένα σημαντικό μέρος των ICMEs παρουσιάζει ομαλά προφίλ μαγνητικού πεδίου, τα οποία αλλάζουν σε χρονική κλίμακα ωρών και θερμοκρασίες πλάσματος χαμηλότερες από το συνηθισμένο. Οι ICMEs με αυτές τις ιδιότητες καλούνται μαγνητικά νέφη (magnetic clouds). Σχεδόν το 30 – 40% των ICMEs είναι μαγνητικά νέφη (Schwenn, 2006) και η σημασία τους ως προς τον διαστημικό καιρό είναι μεγάλη, αφού η ομαλή αλλαγή του μαγνητικού πεδίου συνήθως οδηγεί σε νότιο προσανατολισμό του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου για πολλές ώρες. Τα μαγνητικά νέφη είναι απέραντες δομές, με διάμετρο η οποία συχνά φτάνει τις 0.25 AU, οι οποίες χρειάζονται μία μέρα για να περάσουν από τη Γη (Daglis, 2001). Τα μαγνητικά νέφη είναι η κύρια αιτία των γεωμαγνητικών διαταραχών (Kallenrode, 1998).

### **1.2.3 Σχέση ηλιακών εκλάμψεων και στεμματικών εκτινάξεων μάζας**

Η σχέση μεταξύ ηλιακών εκλάμψεων και στεμματικών εκτινάξεων μάζας είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα. Οι CMEs θεωρούνταν παραδοσιακά ως ένα φαινόμενο το οποίο συνόδευε τις μεγάλες ηλιακές εκλάμψεις. Αργότερα προτάθηκε ότι η CME αποτελεί την πρωταρχική αιτία απελευθέρωσης ενέργειας, ενώ η έκλαμψη είναι απλώς μία δευτερεύουσα διαδικασία.

Η επικρατούσα άποψη, σήμερα, είναι ότι η έκλαμψη δεν είναι ούτε η αιτία ούτε το αποτέλεσμα μίας CME, αλλά και τα δύο φαινόμενα ενεργοποιούνται από έναν κοινό μηχανισμό (Kallenrode, 1998), δηλαδή από μία μεγάλης κλίμακας αποσταθεροποίηση του στεμματικού μαγνητικού πεδίου (Daglis, 2001). Το γεγονός ότι τα δύο φαινόμενα παρατηρούνται μαζί σε έντονα γεγονότα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι συνδέονται μεταξύ τους (Kahler, 1992; Kallenrode, 1998; Reames, 1999).

Εκλάμψεις και στεμματικές εκτινάξεις μάζας μπορούν να συμβούν μαζί, αλλά και ξεχωριστά. Μάλιστα, οι περισσότερες εκλάμψεις (~90%) δεν συνοδεύονται από CMEs, ενώ περίπου το 60% των παρατηρούμενων CMEs δεν σχετίζονται με εκλάμψεις. Τα γεγονότα στα οποία εμφανίζονται έκλαμψη και CME είναι τα πιο ενεργητικά. Σε αυτά τα γεγονότα η έκλαμψη, η οποία είναι μικρή σε σχέση με το γωνιακό εύρος της CME, δεν βρίσκεται στο κέντρο κάτω από τη CME αλλά μάλλον έχει μετατοπιστεί προς ένα από τα πόδια της (Kallenrode, 1998; Reames, 1999). Επίσης στο ~65% αυτών των γεγονότων η CME προηγείται της έκλαμψης, ενώ στο 35% η έκλαμψη ξεκινά πριν τη CME (Kallenrode, 1998).

### 1.3 Ηλιακός άνεμος

Ο Parker το 1958 έδειξε ότι η ηλιακή ατμόσφαιρα και το στέμμα δεν μπορούν να είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία αλλά ούτε στατικά. Αντιθέτως, το στέμμα εκτονώνεται συνεχώς ακτινικά με τεράστια ταχύτητα (Μουσάς & Πρέκα, 2003). Αυτή η ύλη που εκτοξεύεται από τον Ήλιο και κινείται μακριά από αυτόν σε μία συνεχή ροή ονομάζεται ηλιακός άνεμος (solar wind) (Toptygin, 1985; Schwenn, 2006; Hanslmeier, 2007).

Ο ηλιακός άνεμος, που έχει χαρακτηριστεί και ως σαν ηλιακή σωματιδιακή ακτινοβολία, αποτελείται από ίσο αριθμό θετικών ιόντων, κυρίως πρωτόνια και λίγα σωματίδια α και ηλεκτρονίων (Kivelson & Russell, 1995; Μαυρομιχαλάκη, 2005) τα οποία με υπερηχητικές ταχύτητες εκπέμπονται σχεδόν ακτινικά από το στέμμα του Ήλιου. Η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ξεκινάει από 350 – 400 km s<sup>-1</sup> και εκτινάσσεται στα 700 – 1000 km s<sup>-1</sup> όταν συμβαίνουν έκτακτα γεγονότα στον Ήλιο. Η πυκνότητα του μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της ηλιοκεντρικής απόστασης (Hanslmeier, 2007) ως αποτέλεσμα της σφαιρικής

εκτόνωσης και η θερμοκρασία του είναι μερικές δεκάδες χιλιάδες βαθμοί K έως δύο εκατομμύρια βαθμοί K (Μουσάς & Πρέκα, 2003). Ο ηλιακός άνεμος εκτοξεύεται από διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του Ήλιου και τα χαρακτηριστικά του (σύνθεση, ταχύτητα, πυκνότητα, ισχύς μαγνητικού πεδίου) ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες δημιουργίας τους στον Ήλιο. Λόγω της περιστροφής του Ήλιου φτάνει στη Γη κατά ριπές ή αλλιώς ως ρεύματα ηλιακού ανέμου.

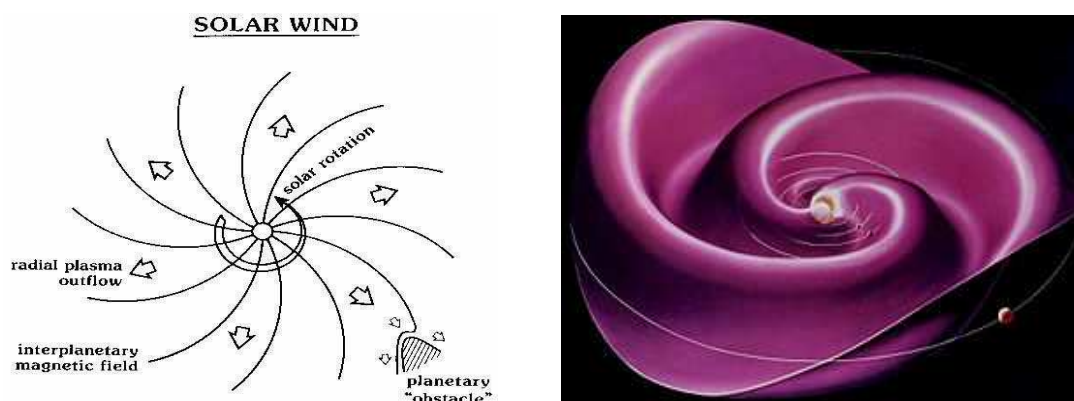
Κύριες πηγές και σημεία επιταχύνσεως του ηλιακού ανέμου είναι οι στεμματικές οπές, περιοχές του Ήλιου που χαρακτηρίζονται από ανοικτές δυναμικές γραμμές, χαμηλή θερμοκρασία και πυκνότητα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του στέμματος (Schwenn, 2006; Λουκάς, 2009). Ο ηλιακός άνεμος χαμηλής ταχύτητας πηγάζει, κατά τη διάρκεια των ελαχίστων του κύκλου, από περιοχές κοντά στον ηλιακό ισημερινό, ενώ οι κυριότερες και πιο εκτεταμένες πηγές του γρήγορου ηλιακού ανέμου είναι οι δύο πολικές στεμματικές οπές. Στο ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας ισχύει και το λεγόμενο πρότυπο της μπαλαρίνας (Kallenrode, 1998) (Σχ. 1.4, δεξιά). Σύμφωνα με αυτό από τους πόλους του Ήλιου και τις πολικές στεμματικές οπές υπάρχουν συνήθως δύο ταχέα ρεύματα ηλιακού ανέμου που γεμίζουν όλο τον χώρο γύρω από τον Ήλιο και ορίζουν το όριο της ηλιόσφαιρας. Το όριο ανάμεσα στα δύο ρεύματα μεγάλης ταχύτητας του ηλιακού ανέμου λέγεται ουδέτερη επιφάνεια ή επιφάνεια ρεύματος. Είναι μία κυματιστή επιφάνεια με πτυχές που αρχίζει κοντά στον ισημερινό του Ήλιου και εκτείνεται προς τα έξω (Μουσάς & Πρέκα, 2003). Καθώς ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του περιστρέφεται και αυτή η ουδέτερη κυματοειδής επιφάνεια, με τη Γη να βρίσκεται διαδοχικά πάνω ή κάτω από αυτήν. Έτσι για μερικές ημέρες η Γη βρίσκεται μέσα στο ρεύμα της βόρειας πολικής στεμματικής οπής και στη συνέχεια της νότιας, δηλαδή σε περιοχές θετικής ή αρνητικής πολικότητας (Hanslmeier, 2007).

### 1.3.1 Διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο

Εγκλωβισμένο στο πλάσμα του ηλιακού ανέμου βρίσκεται ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο, που στην απόσταση της Γης είναι της τάξης των μερικών nT (Kallenrode, 1998) και το οποίο είναι προσανατολισμένο σε κατεύθυνση σχεδόν παράλληλη με το επίπεδο της εκλειπτικής (Kivelson & Russell, 1995). Σε απόσταση 1 AU το μαγνητικό πεδίο σχηματίζει γωνία περίπου  $45^\circ$  με την ευθεία που ενώνει τον

Ήλιο με έναν παρατηρητή στη Γη (Kivelson & Russell, 1995; Hanslmeier, 2007). Σε απόσταση μικρότερη από δύο ηλιακές ακτίνες η πολύπλοκη μορφή του ηλιακού μαγνητικού πεδίου παίρνει την πιο απλή ακτινική μορφή (Kallenrode, 1998). Ο ηλιακός άνεμος χαρακτηρίζεται από υψηλή αγωγιμότητα και γι' αυτό το μαγνητικό πεδίο παραμένει παγωμένο στο πλάσμα του ηλιακού ανέμου και μεταφέρεται στον διαπλανητικό χώρο (Toptygin, 1985; Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998).

Εξαιτίας της περιστροφής του Ήλιου οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου αυτού, που φέρεται παγωμένο μέσα στον ηλιακό άνεμο, παίρνουν τη μορφή της σπείρας του Αρχιμήδη (Kallenrode, 1998; Μουσάς & Πρέκα, 2003), ενώ η μέση έντασή του ακολουθεί το λεγόμενο garden hose model (Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998; Hansmeier, 2007) (Σχ. 1.4, αριστερά). Έτσι, όσο μεγαλώνει η ακτινική απόσταση από τον Ήλιο το αρχικά ακτινικό μαγνητικό πεδίο παίρνει βαθμιαία μία τοροειδή κατεύθυνση (Kallenrode, 1998). Αυτό το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο ακολουθεί την περιοδικότητα της 27ήμερης ηλιακής περιστροφής αλλά και κάθε άλλη ηλιακή μεταβολή, όπως τα μέγιστα και τα ελάχιστα του 11ετούς ηλιακού κύκλου, τις ηλιακές εκλάμψεις, τις στεμματικές εκτινάξεις μάζας, κτλ.



Σχ. 1.4 Οι δυναμικές γραμμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ακολουθούν τη μορφή της σπείρας του Αρχιμήδη (αριστερά). Το πρότυπο μπαλαρίνας (δεξιά).

Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τους Kivelson & Russell (1995) σε ένα σύστημα συντεταγμένων  $(r, \theta, \varphi)$  που στρέφεται με τον Ήλιο ( $\theta = 0^\circ$  κατά μήκος του

άξονα περιστροφής του Ήλιου) οι συνιστώσες της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου είναι:

$$v_r(r, \theta, \varphi) = v \quad (1.1)$$

$$v_\theta(r, \theta, \varphi) = -\omega r \sin \theta \quad (1.2)$$

$$v_\varphi(r, \theta, \varphi) = 0 \quad (1.3)$$

όπου  $v$  η ταχύτητα εκτόνωσης και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Η γραμμική ροής του πλάσματος είναι:

$$\frac{dr}{rd\varphi} = \frac{v_r}{v} = \frac{v}{-\omega r \sin \theta} \quad (1.4)$$

όπου  $\theta = \text{σταθερή}$ . Αν  $v = \text{σταθερή}$  σε απόσταση μερικών δεκάδων ηλιακών ακτίνων η αναλυτική περιγραφή των γραμμών ροής είναι:

$$r - r_o = -\frac{v}{\omega \sin \theta} (\varphi - \varphi_o) \quad (1.5)$$

Από την εξίσωση του Maxwell  $\nabla B = 0$  και  $B \approx av$  προκύπτουν για σφαιρική γεωμετρία οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου (Parks, 1991):

$$B_r(r, \theta, \varphi) = B(r_o, \theta, \varphi_o) \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 \quad (1.6)$$

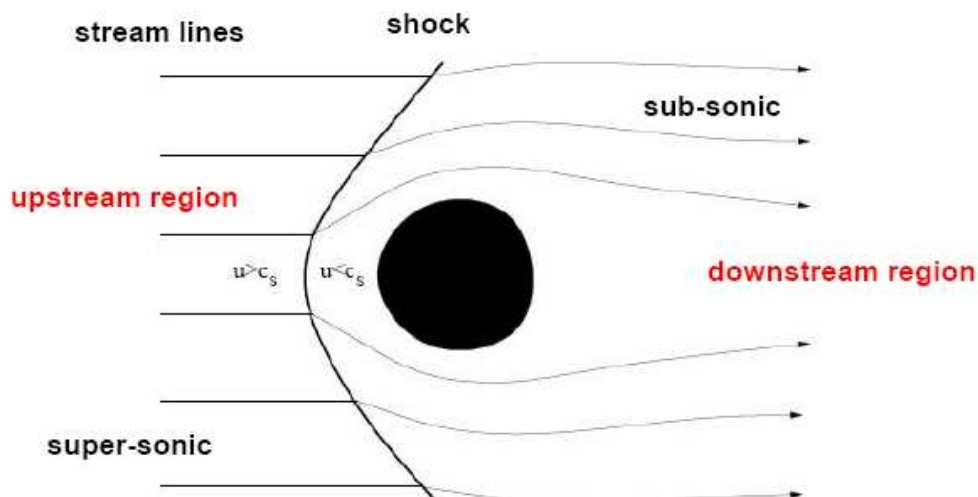
$$B_\varphi(r, \theta, \varphi) = B(r_o, \theta, \varphi_o) \frac{\omega r_o}{v} \frac{r_o}{r} \sin \theta \quad (1.7)$$

$$B_\theta(r, \theta, \varphi) = 0 \quad (1.8)$$

Η γωνία ρεύματος (stream angle ή garden hose angle) στη τροχιά της Γης είναι  $v \sin \varphi = \omega r \cos \varphi \Rightarrow \tan \varphi = \frac{\omega r}{v}$ .

## 1.4 Κρουστικά κύματα

Το κρουστικό κύμα είναι μία ασυνέχεια που διαχωρίζει δύο διαφορετικές περιοχές σε ένα κατ' άλλα συνεχές μέσο (Kallenrode, 1998).



Σχ. 1.5 Δημιουργία κρουστικού κύματος

Σημειώνονται η επιφάνεια του κρουστικού κύματος και οι περιοχές μπροστά και πίσω ([http://theory.physics.helsinki.fi/~plasma/lect09/3b\\_Shocks.pdf](http://theory.physics.helsinki.fi/~plasma/lect09/3b_Shocks.pdf)).

Γενικά, ως κρουστικό κύμα ορίζεται η μετάβαση από την υπερηχητική στην υποηχητική ροή ενός ρευστού, η οποία συνοδεύεται από συμπίεση και διάχυση (<http://theory.physics.helsinki.fi/~xfiles/shockwave/07/notes-1.pdf>). Ας υποθεθεί ότι ένα ρευστό ρέει προς ένα συγκεκριμένο εμπόδιο με υπερηχητική ταχύτητα. Προκειμένου η πληροφορία της κίνησης να μεταδοθεί, δημιουργείται κρουστικό κύμα. Στο σύστημα αναφοράς του κρουστικού κύματος (δηλαδή το σύστημα αναφοράς στο οποίο η επιφάνεια του κρουστικού κύματος είναι ακίνητη) διακρίνονται δύο περιοχές (Σχ. 1.5), μία περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream), η οποία χαρακτηρίζεται ως περιοχή χαμηλής εντροπίας και μία πίσω από αυτό (downstream), η οποία χαρακτηρίζεται ως περιοχή υψηλής εντροπίας. Η ταχύτητα του ρευστού στην περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα είναι υπερηχητική, ενώ πίσω από αυτό είναι υποηχητική και η πυκνότητα αυξάνει



(<http://theory.physics.helsinki.fi/~xfiles/shockwave/07/notes-1.pdf>; Kallenrode, 1998; Μουσάς & Πρέκα, 2003).

Τα κρουστικά κύματα εμφανίζονται είτε σε μέσα που κυριαρχούν οι συγκρούσεις και οι αλληλεπιδράσεις (αέριο), είτε σε μέσα όπου δεν εμφανίζονται αλληλεπιδράσεις (διαστρικός χώρος) (Kallenrode, 1998; Παπαϊωάννου, 2012). Η μελέτη των κρουστικών κυμάτων που σχετίζονται με αέρια ξεκίνησε στα τέλη του 19ου αιώνα και κορυφώθηκε τη δεκαετία του 1940. Σε αυτή την περίπτωση οι συγκρούσεις μεταξύ των μορίων παίζουν σημαντικό ρόλο αφού μεταφέρουν ενέργεια και ορμή μεταξύ τους και παρέχουν τη σύζευξη, η οποία επιτρέπει στο ηχητικό κύμα να υπάρξει (Kivelson & Russell, 1995).

Γύρω στο 1950 το ενδιαφέρον στρέφεται στα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται στο πλάσμα (Kivelson & Russell, 1995). Τότε ανιχνεύεται ένα νέο είδος κρουστικών κυμάτων των οποίων η δυναμική διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη των κρουστικών κυμάτων σε αέρια. Σε αυτή την περίπτωση η μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ των συγκρούσεων είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος του συστήματος (Kivelson & Russell, 1995). Με άλλα λόγια οι πυκνότητες είναι τόσο χαμηλές και οι συγκρούσεις τόσο σπάνιες, ώστε η διαδικασία μεταφοράς δεν είναι πλέον οι συγκρούσεις μεταξύ μεμονωμένων ατόμων ή μορίων (Kallenrode, 1998). Αυτά τα κρουστικά κύματα αναφέρονται ως κρουστικά κύματα χωρίς συγκρούσεις (collisionless shocks) (Parks, 1991; Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998). Εδώ είναι οι συλλογικές επιδράσεις των ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων του πλάσματος που επιτρέπουν τις συχνές αλληλεπιδράσεις και τη δημιουργία κρουστικού κύματος (Kallenrode, 1998).

Παρ' όλες τις διαφορές των κρουστικών κυμάτων χωρίς συγκρούσεις από τα κρουστικά κύματα σε αέριο, όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, οι βασικοί νόμοι διατήρησης όπως και οι θεμελιώδεις έννοιες σχετικά με τη φύση των κρουστικών κυμάτων ισχύουν και στις δύο περιπτώσεις (Kallenrode, 1998).

Τα κρουστικά κύματα του διαπλανητικού χώρου μπορούν να διαχωριστούν σε κινούμενα/παροδικά, όταν η διαταραχή και μαζί το κρουστικό κύμα κινούνται και σε στάσιμα. Στον διαπλανητικό χώρο παρατηρούνται τόσο τα κινούμενα/παροδικά όσο

και τα στάσιμα κρουστικά κύματα. Στην πρώτη περίπτωση το κινούμενο κρουστικό κύμα οφείλεται, π.χ. σε μία CME η οποία διαδίδεται από τον Ήλιο προς τον διαπλανητικό χώρο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο υπερηχητικός ηλιακός άνεμος, ο οποίος επιβραδύνεται από τις πλανητικές μαγνητόσφαιρες, δημιουργεί ένα στάσιμο τοξοειδές κρουστικό κύμα (Parks, 1991; Kallenrode, 1998).

Όπως αναφέρεται στην Kallenrode (1998) τα κρουστικά κύματα συνδέονται με δραματικές μεταβολές στις ιδιότητες του μέσου. Συγκεκριμένα μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- ❖ Η διαταραχή διαδίδεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης. Για ένα αέριο η ταχύτητα αυτή είναι η ταχύτητα του ήχου, ενώ για το πλάσμα εξαρτάται από την ταχύτητα Alfven και την ταχύτητα του ήχου.
- ❖ Στο μέτωπο του κρουστικού κύματος οι ιδιότητες του μέσου μεταβάλλονται απότομα. Στην περίπτωση του αερίου η πίεση και η πυκνότητα του αυξάνονται, ενώ στην περίπτωση του πλάσματος η πυκνότητα του πλάσματος και η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνονται.
- ❖ Πίσω από το μέτωπο του κρουστικού κύματος πρέπει να σημειωθεί μία μετάβαση στις ιδιότητες του αδιατάρακτου μέσου. Η πίεση και η πυκνότητα του αερίου μειώνονται, ενώ για το πλάσμα η πυκνότητα του πλάσματος και η ένταση του μαγνητικού πεδίου μειώνονται.

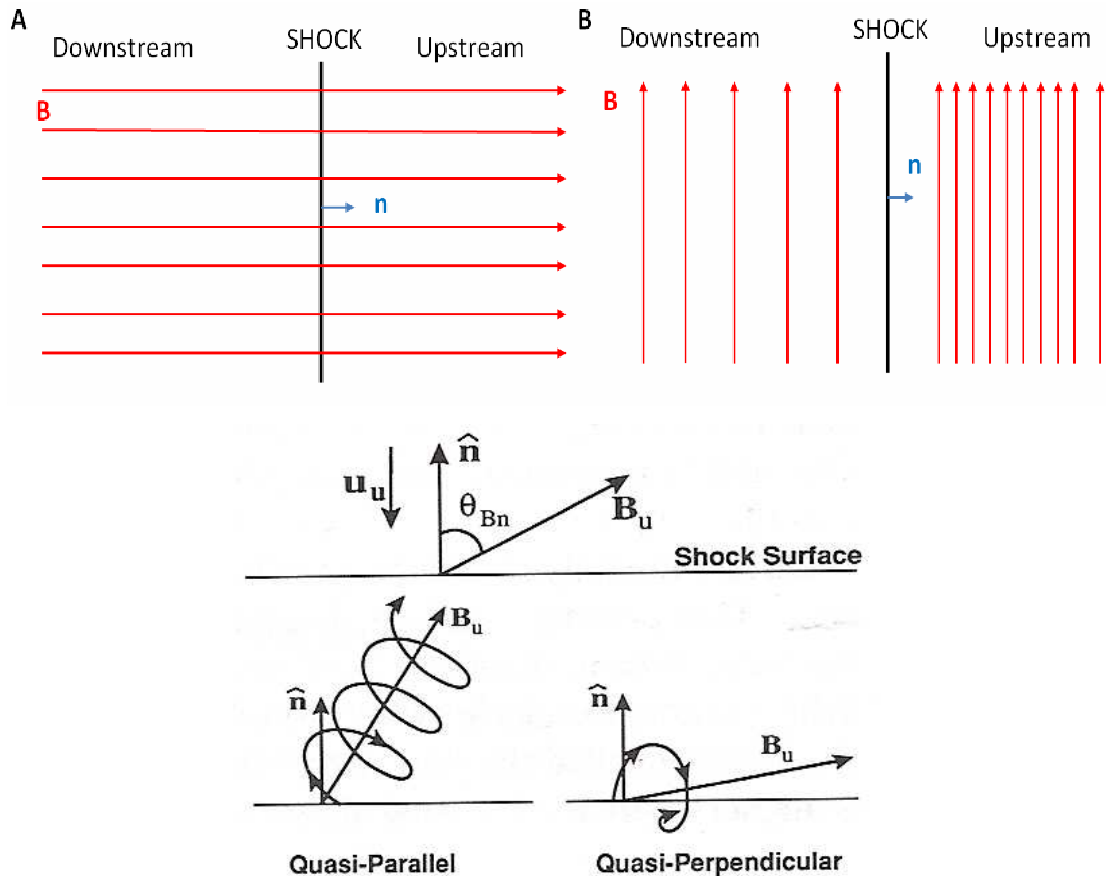
#### 1.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά κρουστικού κύματος

##### A) Γεωμετρία κρουστικού κύματος

Ο τύπος ενός κρουστικού κύματος χωρίς συγκρούσεις καθορίζεται από τη γωνία  $\theta_{Bn}$  που σχηματίζει το μαγνητικό πεδίο με την κάθετη στην επιφάνεια του κρουστικού κύματος (Parks, 1991; Kallenrode, 1998). Έτσι, οι τύποι των κρουστικών κυμάτων είναι οι εξής:

- ❖ το παράλληλο (parallel) κρουστικό κύμα ( $\theta_{Bn} = 0^\circ$ ) το οποίο διαδίδεται παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο (Σχ. 1.6, άνω διάγραμμα περίπτωση A)
- ❖ το κάθετο (perpendicular) κρουστικό κύμα ( $\theta_{Bn} = 90^\circ$ ) το οποίο διαδίδεται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6 (άνω διάγραμμα περίπτωση B)

- ❖ το πλάγιο (oblique) κρουστικό κύμα ( $0^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$ ) το οποίο διαδίδεται σε τυχαία διεύθυνση (Σχ. 1.6, κάτω διάγραμμα). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και τα:
  - ❖ σχεδόν παράλληλο (quasi parallel) κρουστικό κύμα ( $0^\circ < \theta_{Bn} < 45^\circ$ ) και
  - ❖ σχεδόν κάθετο (quasi perpendicular) κρουστικό κύμα ( $45^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$ ).



Σχ. 1.6 Γεωμετρία κρουστικών κυμάτων:

Παράλληλο (A) και κάθετο (B) κρουστικό κύμα (άνω διάγραμμα) (Παπαϊωάννου, 2012).

Σχεδόν παράλληλο (κάτω αριστερά) και σχεδόν κάθετο (κάτω δεξιά) κρουστικό κύμα (Kivelson & Russell, 1995).

## B) Τύποι κρουστικών κυμάτων

Τα κρουστικά κύματα αποτελούν έναν τύπο μαγνητοϋδροδυναμικής ασυνέχειας. Για να είναι όμως μία ασυνέχεια κρουστικό κύμα θα πρέπει να υπάρχει ροή πλάσματος από το μέτωπο κρούσης ( $u_n \neq 0$ ) (Kivelson & Russell, 1995;

Kallenrode, 1998). Οι διάφοροι τύποι κρουστικών κυμάτων δίνονται στον Πίνακα 1.1. Οι δείκτες  $n$  και  $t$  αναφέρονται στην παράλληλη και κάθετη συνιστώσα ως προς το κρουστικό κύμα των μεγεθών της ταχύτητας και του μαγνητικού πεδίου.

*Πίνακας 1.1* Πιθανοί τύποι κρουστικών κυμάτων (Kivelson & Russell, 1995).

<b>Κρουστικά κύματα</b>	$u_n \neq 0$	Παρατηρείται ροή κατά μήκος της επιφάνειας ασυνέχειας η οποία συνοδεύεται από συμπίεση και διάχυση
<b>Παράλληλο</b>	$B_t = 0$	Το μαγνητικό πεδίο δεν μεταβάλλεται λόγω κρουστικού κύματος
<b>Κάθετο</b>	$B_n = 0$	Η πίεση πλάσματος και η ένταση του πεδίου αυξάνονται στο κρουστικό κύμα
<b>Πλάγιο</b>	$B_t \neq 0, B_n \neq 0$	
<b>Γρήγορο</b>		Η πίεση πλάσματος και η ένταση του πεδίου αυξάνονται στο κρουστικό κύμα
<b>Αργό</b>		Η πίεση πλάσματος αυξάνεται και η ένταση του πεδίου μειώνεται στο κρουστικό κύμα
<b>Ενδιάμεσο</b>		Το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται κατά $180^\circ$

### Γ) Ισχύς κρουστικού κύματος

Η ισχύς ενός κρουστικού κύματος, που αποτελεί και μέτρο της ενέργειας που περικλείει, μετράται με τον αριθμό Mach  $M$ . Στο ηλιακό σύστημα έχουν παρατηρηθεί κρουστικά κύματα με αριθμούς Mach μεταξύ 1 και 20, ενώ σε πιο βίαια αστροφυσικά φαινόμενα, όπως εκρήξεις supernova, έχουν παρατηρηθεί κρουστικά κύματα της τάξεως των 1000 αριθμών Mach. Τα κρουστικά κύματα χαρακτηρίζονται ως υποκρίσιμα ή υπερκρίσιμα ανάλογα με το αν υπερβαίνουν ή όχι, κάποια τιμή του αριθμού Mach. Για  $\theta_{Bn} = 90^\circ$  η κρίσιμη τιμή του αριθμού Mach είναι  $\sim 2.7 M_A$  και μειώνεται με τη μείωση της γωνίας  $\theta_{Bn}$ . Το κρουστικό κύμα της Γης παρουσιάζεται υπερκρίσιμο τις περισσότερες φορές, με τιμές του αριθμού Mach στο εύρος  $M_A = 1.5 - 10$  (Kivelson & Russell, 1995).

### 1.4.2 Μηχανισμοί επιτάχυνσης στα κρουστικά κύματα

Η επιτάχυνση σωματιδίων στα κρουστικά κύματα χωρίς συγκρούσεις έχει αποτελέσει αντικείμενο ενδιαφέροντος για πολλά χρόνια. Η επιτάχυνση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί τόσο στα κρουστικά κύματα που σχηματίζονται μπροστά από πλανήτες, στις co-rotating interaction regions (CIRs), αλλά και στα κινούμενα στον διαπλανητικό χώρο κρουστικά κύματα. Τα πιο αποτελεσματικά και πιο ενεργητικά είναι τα κινούμενα διαπλανητικά κρουστικά κύματα με ταχύτητες μέχρι και  $2000 \text{ km s}^{-1}$ , τα οποία μπορούν να επιταχύνουν σωματίδια σε ενέργειες της τάξης GeV. Όλα τα κινούμενα διαπλανητικά κρουστικά κύματα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ραδιοεξάρσεις τύπου II και να επιταχύνουν σωματίδια σχετίζονται, κυρίως, με CMEs. Κοντά στον Ήλιο, οι ταχύτητες των CMEs και των κρουστικών κυμάτων μερικές φορές μπορούν να φτάσουν  $\sim 2000 \text{ km s}^{-1}$ , αν και οι ταχύτητες μειώνονται κατά έναν παράγοντα 2 όταν το κρουστικό κύμα βρίσκεται σε απόσταση 1 AU (Reames, 1999).

Υπάρχουν διαφορετικοί μηχανισμοί οι οποίοι εμπλέκονται στην επιτάχυνση σωματιδίων από διαπλανητικά κρουστικά κύματα (Kallenrode, 1998) και δύο από αυτούς είναι οι: α) Επιτάχυνση μέσω ολίσθησης (shock drift acceleration) και β)  $1^{\text{ης}}$  τάξης επιτάχυνση Fermi (diffusive shock acceleration).

Οι σχετικές συνεισφορές των παραπάνω μηχανισμών εξαρτώνται από τις ιδιότητες των κρουστικών κυμάτων. Για παράδειγμα, η επιτάχυνση μέσω ολίσθησης είναι σημαντική για κάθετα κρουστικά κύματα όταν το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι μέγιστο, αλλά εξαφανίζεται στα παράλληλα κρουστικά κύματα (Reames, 1999). Η  $1^{\text{ης}}$  τάξης επιτάχυνση Fermi απαιτεί ένα ικανό ποσό σκέδασης τόσο στην περιοχή μπροστά (upstream) όσο και πίσω (downstream) από το κρουστικό κύμα. Επίσης, οι παράμετροι του κρουστικού κύματος, όπως η ταχύτητα, ο λόγος συμπίεσης (λόγος πυκνοτήτων στην περιοχή πίσω και μπροστά από το κρουστικό κύμα), ή ο αριθμός Mach καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών επιτάχυνσης (Kallenrode, 1998).

Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη περιγραφή των προαναφερθέντων μηχανισμών επιτάχυνσης σωματιδίων στα κρουστικά κύματα (Kallenrode, 1998).

### α) Επιτάχυνση μέσω ολίσθησης

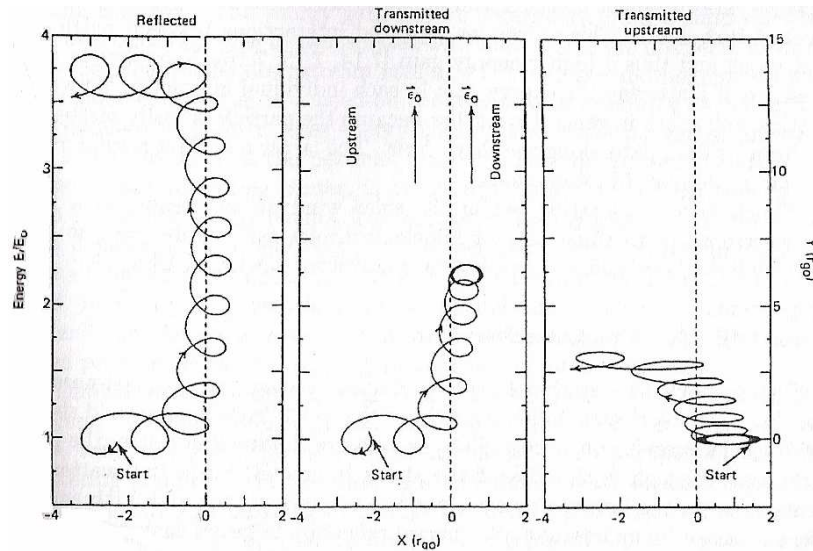
Κατά την επιτάχυνση μέσω ολίσθησης τα σωματίδια κερδίζουν ενέργεια εξαιτίας του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου στο μέτωπο κρούσης παρασυρόμενα κατά μήκος του. Μερικές φορές καλείται και επιτάχυνση χωρίς σκέδαση (scatter – free acceleration) αφού η σκέδαση θεωρείται ότι είναι αμελητέα.

Σε αυτή την περίπτωση το φορτισμένο σωματίδιο ολισθαίνει κατά μήκος του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου στο μέτωπο κρούσης. Στο σύστημα αναφοράς του

κρουστικού κύματος το ηλεκτρικό πεδίο είναι  $\vec{E} = -\frac{\vec{u}_u \times \vec{B}_u}{c} = -\frac{\vec{u}_d \times \vec{B}_d}{c}$ . Το πεδίο

αυτό έχει διεύθυνση κατά μήκος του μετώπου κρούσης και είναι κάθετο τόσο στο μαγνητικό πεδίο όσο και στη ροή. Παίρνει τη μέγιστη τιμή του στα κάθετα κρουστικά κύματα, ενώ δεν εμφανίζεται καθόλου στα παράλληλα. Η διεύθυνση της ολίσθησης του σωματιδίου εξαρτάται από το φορτίο του και είναι πάντα τέτοια ώστε το σωματίδιο να κερδίζει ενέργεια (Kallenrode, 1998).

Αν θεωρηθεί ένα πλάγιο κρουστικό κύμα τότε το σωματίδιο μετά την αλληλεπίδραση είτε θα ανακλαστεί είτε θα περάσει μέσα από το κρουστικό κύμα. Στο σχήμα 1.7 δίνονται παραδείγματα όπου ένα σωματίδιο που βρίσκεται στην περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream) ανακλάται (αριστερό διάγραμμα) ή περνάει μέσα από το κρουστικό κύμα από την μπροστά περιοχή στην πίσω (μεσαίο διάγραμμα) ή και αντιστρόφως (δεξιό διάγραμμα). Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση της ανάκλασης, καθώς το σωματίδιο χτυπάει στο μέτωπο κρούσης ολισθαίνει κατά μήκος αυτού και κερδίζει ενέργεια. Με την αύξηση της ενέργειας η κάθετη προς το μέτωπο κρούσης συνιστώσα της ταχύτητας αυξάνει και σταδιακά γίνεται μεγαλύτερη από τη ταχύτητα του κύματος κρούσης. Σε αυτό το σημείο το σωματίδιο δραπετεύει από το μέτωπο κρούσης στην περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα. Το αν τελικά το σωματίδιο θα ανακλαστεί ή θα περάσει μέσα από το κρουστικό κύμα εξαρτάται από την αρχική ενέργεια του σωματιδίου και την γωνία ρεύματος (pitch angle), ώστε τελικά προκύπτει μία γωνιακή κατανομή των επιταχυνόμενων σωματιδίων (Kallenrode, 1998).



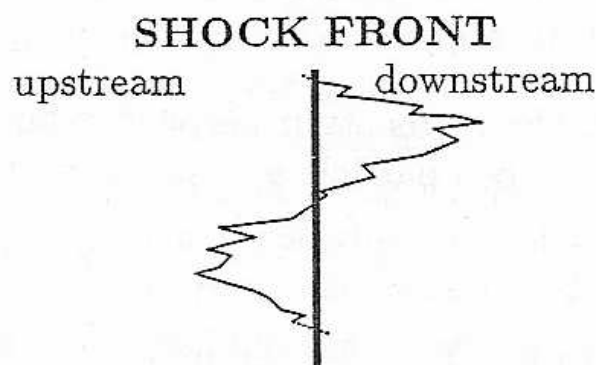
Σχ. 1.7 Παραδείγματα τροχιών σωματιδίων σε ένα τυπικό πλάγιο κρουστικό κύμα. Η διακεκομμένη γραμμή δηλώνει το μέτωπο κρούσης (Kallenrode, 1998).

Το κέρδος ενέργειας είναι μεγαλύτερο αν το σωματίδιο μπορεί να αλληλεπιδράσει με το μέτωπο κρούσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης εξαρτάται από την κάθετη προς το κρουστικό κύμα ταχύτητα του σωματιδίου. Αν αυτή είναι μικρή το σωματίδιο παραμένει στο κρουστικό κύμα, ενώ αν είναι μεγάλη το σωματίδιο δραπετεύει πριν κερδίσει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας. Η ενέργεια που κερδίζεται είναι μεταξύ ενός παράγοντα 1.5 και 5. Όμως, αυτό το ποσοστό είναι πολύ μικρό ώστε να επιταχύνει σωματίδια εκτός του ηλιακού ανέμου σε ενέργειες μερικών δεκάδων keV ή μερικών δεκάδων MeV. Αν τα σωματίδια μπορούν να αλληλεπιδράσουν επανειλημμένα με το κρουστικό κύμα τότε συνολικά το κέρδος ενέργειας είναι μεγαλύτερο (Kallenrode, 1998).

### β) 1<sup>ης</sup> τάξης επιτάχυνση Fermi

Η 1<sup>ης</sup> τάξης επιτάχυνση Fermi επικρατεί, κυρίως, στα σχεδόν παράλληλα κρουστικά κύματα, όπου το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο μέτωπο κρούσης είναι μικρό και επομένως η επιτάχυνση μέσω ολίσθησης θεωρείται αμελητέα. Σημαντικό ρόλο παίζει η σκέδαση των σωματιδίων και στις δύο πλευρές του κρουστικού κύματος. Συγκεκριμένα είναι ο μηχανισμός κατά τον οποίο τα σωματίδια κερδίζουν ενέργεια λόγω των επαναλαμβανόμενων σκεδάσεων στο διαταραγμένο πλάσμα που

συγκλίνει στο μέτωπο κρούσης. Τόσο η χρονική διάρκεια της επιτάχυνσης όσο και η ενέργεια που κερδίζεται εξαρτώνται από το ποσοστό σκέδασης. Αυτός ο μηχανισμός επιτάχυνσης είναι μία αργή διαδικασία, η μέγιστη ενέργεια εξαρτάται από τις συνθήκες σκέδασης, τις παραμέτρους του κρουστικού κύματος και τον χρόνο διαθέσιμο για επιτάχυνση (Kallenrode, 1998).



Σχ. 1.8 Κίνηση ενός σωματιδίου στο σύστημα αναφοράς του κρουστικού κύματος. Ο κύκλος κίνησης περιλαμβάνει περάσματα από τη μία πλευρά του κρουστικού κύματος στην άλλη και τανάπαλι (Kallenrode, 1998).

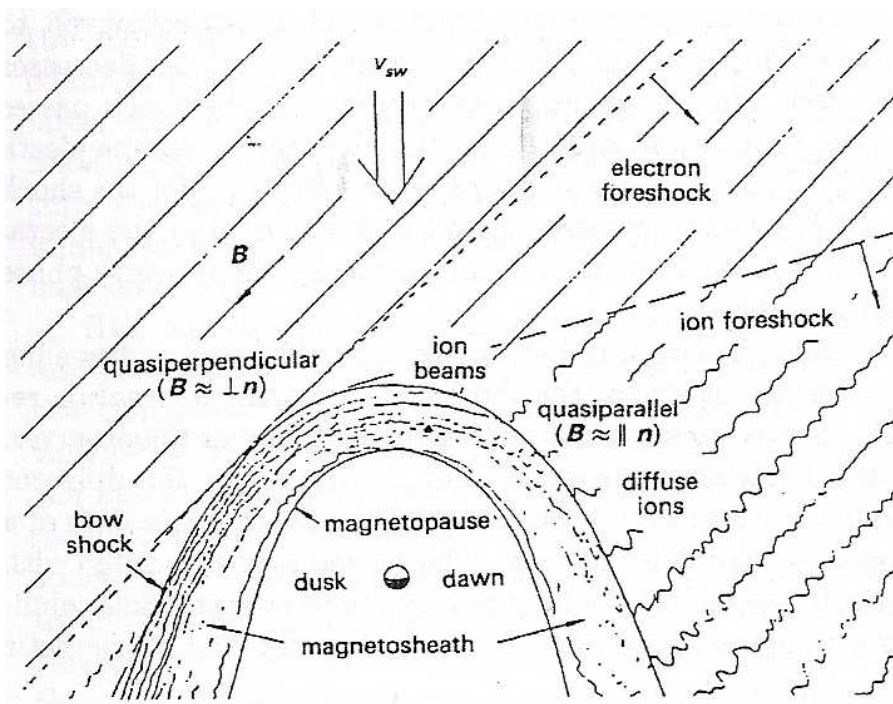
Ας υποθεθεί ότι το σωματίδιο έχει μόλις διασχίσει το μέτωπο κρούσης στην περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream). Το σωματίδιο τότε θα ακολουθήσει μία ζικ ζακ διαδρομή και τελικά θα σκεδαστεί πάλι πίσω στο μέτωπο κρούσης διασχίζοντάς το προς την πίσω (downstream) περιοχή (Σχ. 1.8). Εδώ σημειώνεται πάλι η ίδια διαδικασία. Καθώς τελικά το σωματίδιο σκεδάζεται πάλι πίσω στο μέτωπο κρούσης διασχίζοντάς το προς την μπροστά περιοχή ένας καινούργιος κύκλος κίνησης ξεκινά. Στην περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα το σωματίδιο κερδίζει ενέργεια λόγω των μετωπικών συγκρούσεων με ένα κέντρο σκέδασης, ενώ στην περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα το σωματίδιο χάνει ενέργεια γιατί το κέντρο σκέδασης κινείται στην ίδια διεύθυνση με το σωματίδιο. Καθώς η ταχύτητα ροής και επομένως η ταχύτητα του κέντρου σκέδασης είναι μεγαλύτερη στην μπροστά περιοχή αντί της πίσω προκύπτει ένα καθαρό κέρδος σε ενέργεια. Το κέρδος ενέργειας σε κάθε αλληλεπίδραση εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του σωματιδίου ως προς το κέντρο σκέδασης (Kallenrode, 1998).



### 1.4.3 Κρουστικό κύμα της Γης

Το 1962 οι I.A. Axford και P.J. Kellogg ανεξάρτητα προέβλεψαν τον σχηματισμό ενός κρουστικού κύματος μπροστά από τη γήινη μαγνητόσφαιρα (Μουσάς & Πρέκα, 2003). Η ύπαρξή του επιβεβαιώθηκε το 1963 από τις πρώτες διαστημικές αποστολές που μελέτησαν τη μαγνητόσφαιρα της Γης (Parks, 1991). Το κρουστικό κύμα της Γης δημιουργείται στην προσήλια πλευρά της μαγνητόσφαιρας της και επεκτείνεται γύρω από αυτήν περιβάλλοντάς την (Σχ. 1.9). Αποτελεί περίπτωση πλάσματος τα σωματίδια του οποίου δεν υφίστανται συγκρούσεις. Πρόκειται για ένα στάσιμο κρουστικό κύμα.

Ο ηλιακός άνεμος συναντά εμπόδιο στο μαγνητικό πεδίο της Γης και επιβραδύνεται σε ταχύτητες υποηχητικές. Έτσι μπορεί να ρέει γύρω από τη μαγνητόσφαιρα. Το σχήμα του κρουστικού κύματος είναι σχεδόν παραβολοειδές εκ περιστροφής, γι' αυτό και καλείται και τοξοειδές κρουστικό κύμα (bow shock), και παρουσιάζει, σε πρώτη προσέγγιση, αξονική συμμετρία με άξονα τη γραμμή Ήλιου – Γης (Kivelson & Russell, 1995). Η συμμετρία δεν είναι τέλεια επειδή η πρόσκρουση του ηλιακού ανέμου στο μαγνητικό δίπολο της Γης δεν είναι κάθετη σε αυτό. Η γεωμετρία μεταβάλλεται από σχεδόν κάθετη σε σχεδόν παράλληλη (Reames, 1999).



Σχ. 1.9 Το τοξοειδές κρουστικό κύμα της Γης (Kallenrode, 1998).

Το πλέον απομακρυσμένο σημείο του κρουστικού κύματος, στην προσήλια πλευρά της Γης, απέχει από το κέντρο της Γης  $14R_E$  ( $1R_E = 6.371 \text{ km}$ ). Η μέση θέση του κρουστικού κύματος της Γης υπολογίζεται από τη σχέση:  $R = \frac{K}{1 + \varepsilon \cos \theta}$  όπου  $K \sim 25R_E$  και  $\varepsilon \sim 0.8$ , το  $R$  μετράται από το κέντρο της Γης και  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση Ήλιου – Γης και τη διεύθυνση της  $R$ . Το κρουστικό κύμα απέχει ουσιαστικά από τη μαγνητόσφαιρα μόλις λίγες  $R_E$ , θέση η οποία μεταβάλλεται με τη δυναμική πίεση του ηλιακού ανέμου, λόγω της ελαστικότητας που παρουσιάζει η μαγνητόσφαιρα. Η περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα, στην οποία ο ηλιακός άνεμος κινείται με υποηχητική ταχύτητα, ονομάζεται μαγνητοθήκη (Kivelson & Russell, 1995).

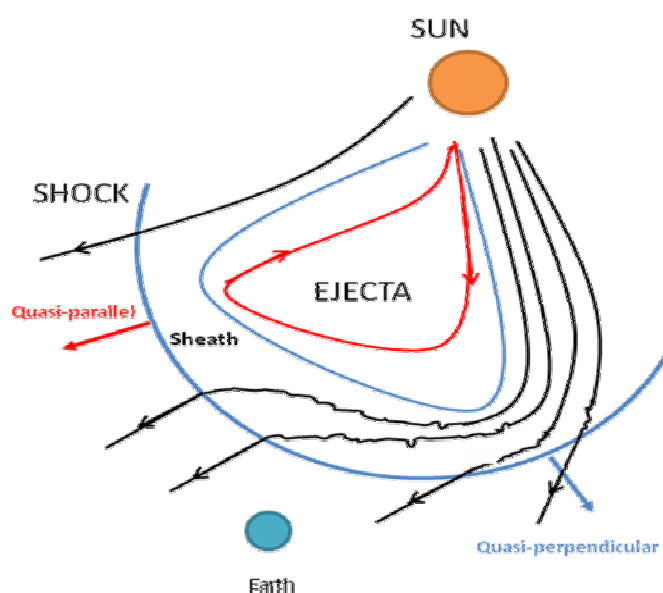
Μία σημαντική ιδιότητα των κρουστικών κυμάτων χωρίς συγκρούσεις είναι η ύπαρξη του foreshock, δηλαδή μίας περιοχής πίσω από το κρουστικό κύμα η οποία περιέχει σωματίδια και κύματα που σχετίζονται με το κρουστικό κύμα. Ενώ συνήθως το κρουστικό κύμα λειτουργεί ως ‘ορίζοντας πληροφοριών’, δηλαδή η πληροφορία σχετικά με την ύπαρξη του κρουστικού κύματος δεν μπορεί να ταξιδέψει στην περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream), σε αυτή την περίπτωση κρουστικών κυμάτων ένα σωματίδιο μπορεί να έχει αυθαίρετα υψηλή ταχύτητα και γι’ αυτό να μπορεί να κινείται πιο γρήγορα από το κρουστικό κύμα στην περιοχή μπροστά από αυτό (upstream) (Parks, 1991; Kivelson & Russell 1995). Μάλιστα τα κρουστικά κύματα που αναπτύσσονται στην ηλιόσφαιρα φαίνεται να είναι ικανοποιητικοί επιταχυντές ηλεκτρονίων και ιόντων. Στο κρουστικό κύμα της Γης υπάρχουν ιόντα με ενέργειες μέχρι μερικές εκατοντάδες keV (η κινητική ενέργεια ενός πρωτονίου στον ηλιακό άνεμο είναι 1 keV) και ηλεκτρόνια με ενέργειες μέχρι μερικές δεκάδες keV (Parks, 1991; Kivelson & Russell, 1995).

Για την περίπτωση του κρουστικού κύματος της Γης έχει αναφερθεί ότι, κοντά στη Γη, το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τη γραμμή Ήλιου – Γης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9 η πρώτη δυναμική γραμμή που αγγίζει το κρουστικό κύμα της Γης είναι η εφαπτομενική και προφανώς το κρουστικό κύμα σε αυτό το σημείο χαρακτηρίζεται από  $\theta_{Bn} = 90^\circ$ . Οι δυναμικές γραμμές στη συνέχεια συνδέονται με το κρουστικό κύμα και η  $\theta_{Bn}$  γίνεται σταδιακά μικρότερη των  $90^\circ$ . Έτσι οπουδήποτε κάτω από την εφαπτομενική δυναμική γραμμή μπορεί να υπάρχουν

foreshock περιοχές. Αρχικά παρατηρούνται ηλεκτρόνια και η περιοχή λέγεται electron foreshock. Τα ηλεκτρόνια με τις υψηλότερες ενέργειες παρατηρούνται κοντά στην εφαπτομενική γραμμή. Υπάρχει, όμως και μία περιοχή επιταχυνόμενων ιόντων η οποία καλείται ion foreshock. Τα συγκεκριμένα ιόντα προέρχονται από περιοχές του κρουστικού κύματος με  $\theta_{Bn}$  μικρότερη των  $70^\circ$ , αφού προφανώς δεν υπάρχει αποτελεσματικός μηχανισμός επιτάχυνσης για ιόντα με  $\theta_{Bn}$  μεγαλύτερη των  $70^\circ$ , κάτι το οποίο οφείλεται στο μέγεθος και στο σχήμα του κρουστικού κύματος (Kivelson & Russell, 1995).

#### 1.4.4 Κρουστικά κύματα και στεμματικές εκτινάξεις μάζας

Οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας είναι μεγάλα μαγνητισμένα νέφη πλάσματος, τα οποία εκπέμπονται από τον Ήλιο με ταχύτητες που ποικίλουν από μερικές δεκάδες μέχρι και  $3000 \text{ km s}^{-1}$ . Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα κρουστικό κύμα από CME θα πρέπει η ταχύτητα της τελευταίας να ξεπερνά την ταχύτητα του περιβάλλοντος ηλιακού ανέμου (Schwenn, 2006). Γι' αυτό και οι ταχύτερες CMEs ( $V > 500 \text{ km s}^{-1}$ ), που είναι υπερηχητικές ακόμα και σε σύγκριση με τον περιβάλλοντα ηλιακό άνεμο, δημιουργούν κρουστικά κύματα μπροστά από αυτές (<http://theory.physics.helsinki.fi/~xfiles/shockwave/07/notes-1.pdf>).



Σχ. 1.10 Απεικόνιση μίας στεμματικής εκτίναξης μάζας η οποία διαδίδεται από τον Ήλιο προς τη Γη (Παπαϊωάννου, 2012).

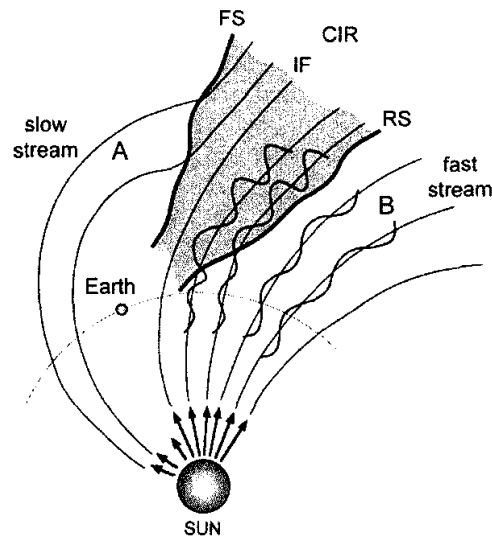
Τα κρουστικά κύματα χωρίς συγκρούσεις που δημιουργούνται από τις γρήγορες CMEs (Σχ. 1.10) είναι παρόμοια με το κρουστικό κύμα μπροστά από τη μαγνητόσφαιρα της Γης. Το μέτωπο κρούσης είναι το εξωτερικό όριο μίας πλασματοθήκης η οποία οφείλεται σε συμπίεση, εκτροπή και θέρμανση του περιβάλλοντος ηλιακού ανέμου από την επακόλουθη εκροή μάζας. Αυτή η εκροή διαχωρίζεται από την πλασματοθήκη με μία εφαπτομενική ασυνέχεια (Schwenn, 2006).

#### 1.4.5 Κρουστικά κύματα και ρεύματα ηλιακού ανέμου

Τα ρεύματα ηλιακού ανέμου τα οποία εκπέμπονται από διαφορετικές περιοχές του ηλιακού στέμματος έχουν ποικίλες ταχύτητες, αφού οι ήσυχες περιοχές εκπέμπουν τον αργό ηλιακό άνεμο ( $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$ ), ενώ οι στεμματικές οπές εκπέμπουν τον γρήγορο ηλιακό άνεμο ( $\sim 700 \text{ km s}^{-1}$ ). Λόγω της περιστροφής του Ήλιου, είναι δυνατόν ένα ταχύ ρεύμα ηλιακού ανέμου που προέρχεται από μία στεμματική οπή να αλληλεπιδράσει με τον ηλιακό άνεμο που κινείται ακτινικά προς τα έξω από μία ήσυχη περιοχή με μικρή ταχύτητα. Σε αυτή την περίπτωση τα δύο ρεύματα του ηλιακού ανέμου συγκρούονται και σχηματίζεται ένα ζεύγος κρουστικών κυμάτων λόγω της αλληλεπίδρασής τους, ένα μπροστά και ένα πίσω από τη διαχωριστική επιφάνεια αλληλεπίδρασης (Reames, 1999). Οι περιοχές αυτές καλούνται co-rotating interaction regions (CIRs) και τα κρουστικά κύματα, τα οποία είναι στάσιμα στο σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται με τον Ήλιο, λέγονται co-rotating shocks (Kallenrode, 1998; Tsurutani, 2001; Schwenn, 2006).

Από τα δύο κρουστικά κύματα που σχηματίζονται το ένα ονομάζεται ηγούμενο (forward shock) και το άλλο ανάστροφο (reverse shock), ενώ και τα δύο απομακρύνονται συνεχώς από την επιφάνεια αλληλεπίδρασης προς αντίθετες κατευθύνσεις (Reames, 1991; Kallenrode, 1998; Μουσάς & Πρέκα, 2003). Συγκεκριμένα το ηγούμενο κρουστικό κύμα κινείται προς τα έξω με διεύθυνση κάθετη προς τη διαχωριστική επιφάνεια και φορά αυτή του ηλιακού ανέμου, ενώ το ανάστροφο κρουστικό κύμα έχει διεύθυνση κάθετη προς τη διαχωριστική επιφάνεια και φορά προς τον Ήλιο. Επειδή, όμως, η ταχύτητα των κρουστικών κυμάτων είναι πολύ μικρότερη από αυτή του ηλιακού ανέμου παρασύρονται από αυτόν κατά την κίνησή του προς τα έξω (Μουσάς & Πρέκα, 2003). Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται

μία σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης γρήγορου/αργού ρεύματος ηλιακού ανέμου. Έχει σημειωθεί η περιοχή αλληλεπίδρασης (IF), όπως επίσης και το ηγούμενο (FS) και ανάστροφο (RS) κρουστικό κύμα (Tsurutani, 2001).



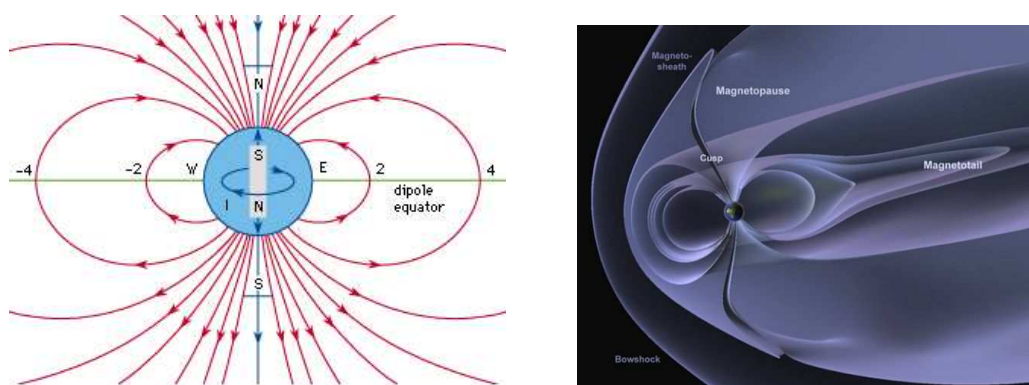
Σχ. 1.11 Αλληλεπίδραση ενός γρήγορου με ένα αργό ρεύμα ηλιακού ανέμου (Tsurutani, 2001).

## 1.5 Γεωμαγνητικό πεδίο

Το γεωμαγνητικό πεδίο είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει την επιστήμη από πολύ παλιά. Ήδη το 1600 ο William Gilbert δέχεται ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι διπολικό, όμοιο με το πεδίο ενός ραβδόμορφου μαγνήτη (Μαυρομιχαλάκη, 2005), ενώ αργότερα, το 1683 και το 1692, ο Edmund Halley εξέδωσε δύο βιβλία με θέμα τον γεωμαγνητισμό αλλά και γεωμαγνητικούς χάρτες (Kivelson & Russell, 1995).

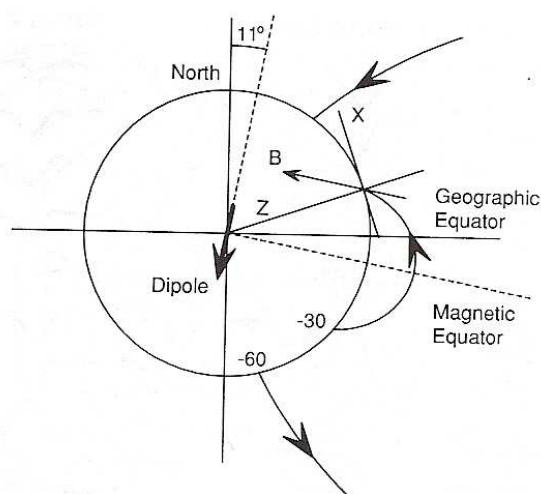
Και αυτό θα συνέβαινε αν η Γη ήταν απομονωμένη στο διάστημα (Σχ. 1.12, αριστερά). Το 1958 οι διαστημικές παρατηρήσεις έδειχναν ότι το γήινο μαγνητικό πεδίο σε μεγάλες αποστάσεις από τη Γη συμπεριφέρεται πολύ διαφορετικά από ότι προβλέπει το διπολικό πρότυπο. Δηλαδή, η ένταση του ακολουθεί τη διπολική συμπεριφορά μέχρι περίπου  $5 R_E$  ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Επίσης σημαντική ήταν και η πληροφορία σχετικά με την ύπαρξη της μαγνητοουράς (Σχ. 1.12, δεξιά).



Σχ. 1.12 Αρχική προσέγγιση του γήινου μαγνητικού πεδίου σαν δίπολο (αριστερά).  
Μορφή της γήινης μαγνητόσφαιρας, όπως θεωρείται σήμερα (δεξιά).

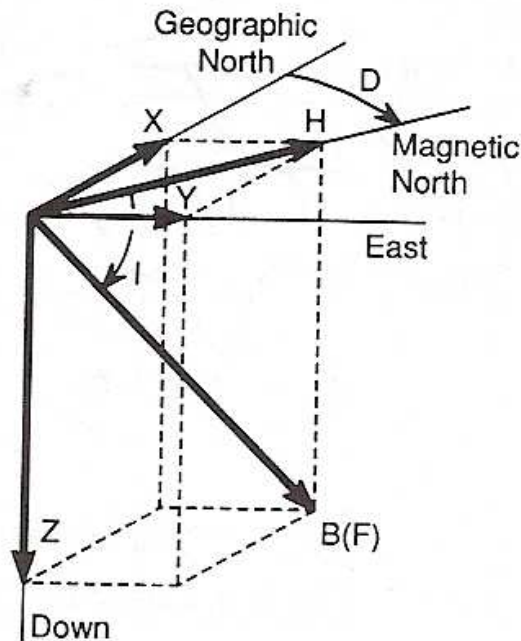
Έτσι, όπως είναι σήμερα γνωστό, το γήινο μαγνητικό πεδίο αποτελεί ένα εμπόδιο για τον ηλιακό άνεμο. Αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης τους είναι ο ηλιακός άνεμος να πιέζει το μαγνητικό πεδίο αναγκάζοντας το να περιοριστεί σε μία κοιλότητα γνωστή ως γήινη μαγνητόσφαιρα με μία μακριά ουρά που εκτείνεται στην αντίθετη πλευρά του Ήλιου (Kivelson & Russell, 1995). Ο άξονας του γεωμαγνητικού διπόλου σχηματίζει γωνία  $\sim 11^\circ$  με τον άξονα περιστροφής της Γης (Σχ. 1.13).



Σχ. 1.13 Ο άξονας περιστροφής της Γης δεν ταυτίζεται με τον άξονα μεταξύ των δύο μαγνητικών πόλων (Kivelson & Russell, 1995).

### 1.5.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη του γεωμαγνητικού πεδίου

Έστω ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης παριστάνεται ως ένα διάνυσμα  $\vec{B}$ . Το διάνυσμα αυτό μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες σε ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς με την αρχή των αξόνων πάνω στην επιφάνεια της Γης που θεωρείται ότι είναι και το σημείο μέτρησης του γεωμαγνητικού πεδίου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.14 ο άξονας x είναι ο γεωγραφικός μεσημβρινός που κατευθύνεται προς τον Βορρά, ο άξονας y είναι ο γεωγραφικός παράλληλος που κατευθύνεται προς την Ανατολή και ο άξονας z είναι κάθετος στην επιφάνεια της Γης και δείχνει προς τα μέσα.



Σχ. 1.14 Διανυσματική περιγραφή του γεωμαγνητικού πεδίου (Kivelson & Russell, 1995).

Έτσι οι τρεις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου θα είναι οι  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$  και  $\vec{Z}$ , οπότε:

$$\vec{B} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad \text{και} \quad \vec{H} = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

όπου  $\vec{H}$  η οριζόντια συνιστώσα του πεδίου  $\vec{B}$ . Για την πλήρη περιγραφή του πεδίου πρέπει να οριστούν και δύο γωνίες, η γωνία  $I$  μεταξύ του διανύσματος  $\vec{B}$  και του

οριζοντίου επιπέδου, που ονομάζεται γωνία κλίσης (inclination) και η γωνία  $D$  μεταξύ της οριζόντιας συνιστώσας  $\vec{H}$  και της συνιστώσας  $\vec{X}$ , που ονομάζεται γωνία απόκλισης (declination). Οι σχέσεις ανάμεσα σε αυτές τις ποσότητες είναι:

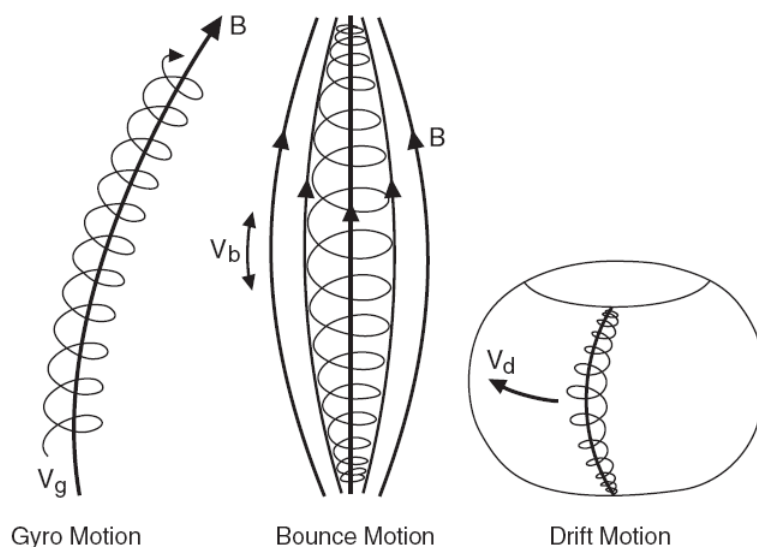
$$H = B \cos l \quad Z = B \sin l = H \tan l \quad X = H \cos D \quad Y = H \sin D$$

### 1.5.2 Κίνηση φορτισμένου σωματιδίου μέσα στο γεωμαγνητικό πεδίο

Η κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων μέσα στο γεωμαγνητικό πεδίο περιγράφεται από τρεις συνιστώσες (Alfven & Faelthammer, 1963):

1) **Ελικοειδή τροχιά** γύρω από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου (κίνηση σύγχροτρον). Η κίνηση αυτή είναι υπέρθεση μίας περιστροφής (gyration) γύρω από ένα οδηγούν κέντρο και μίας μεταφορικής κίνησης του κέντρου αυτού (Σχ. 1.15). Η φορά περιστροφής εξαρτάται από το φορτίο και η συχνότητα από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου (Μουσάς & Πρέκα, 2003; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Η γυροσυχνότητα και η γυροακτίνα γι' αυτή την κίνηση δίνονται από τους τύπους:

$$\omega_c = \frac{qB}{m} \quad \text{και} \quad \rho_c = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} = \frac{mv_{\perp}}{qB}.$$

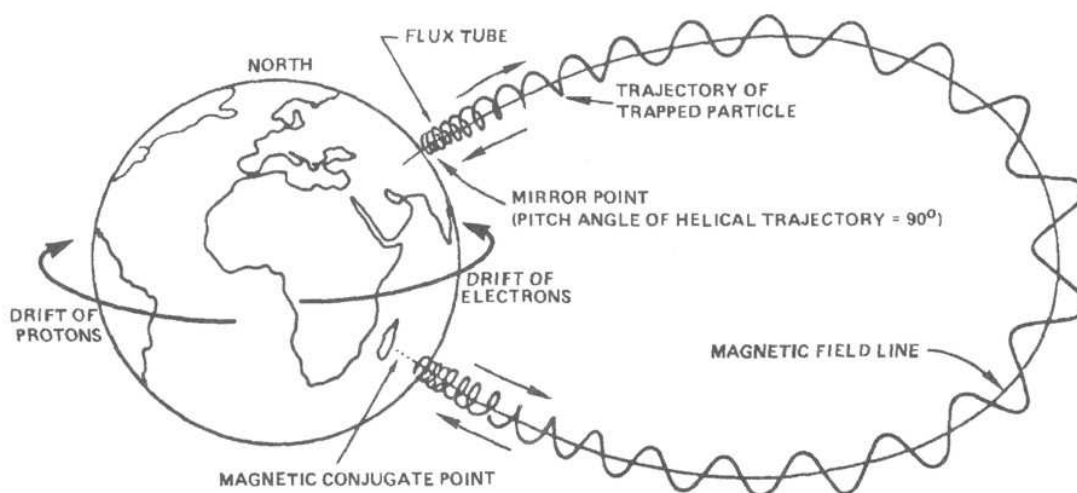


Σχ. 1.15 Οι τρεις κινήσεις που εκτελεί ένα φορτισμένο σωματίδιο που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο (Russell, 2000).



2) **Κίνηση αναπήδησης μεταξύ δύο κατοπτρικών σημείων** που το καθένα βρίσκεται σε διαφορετικό ημισφαίριο (Σχ. 1.15). Η περίοδος εξαρτάται από την ταχύτητα τους και η συχνότητα από το πόσο γρήγορα κινείται το σωματίδιο καθώς και από το μήκος της δυναμικής γραμμής (Μουσάς & Πρέκα, 2003; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Καθώς το σωματίδιο πλησιάζει προς τη Γη κατά μήκος μίας δυναμικής γραμμής το μαγνητικό πεδίο αυξάνει. Άρα η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας αυξάνει και αυτή οπότε αυξάνει και η ενέργεια στην κάθετη διεύθυνση εις βάρος της ενέργειας στην παράλληλη προς το μαγνητικό πεδίο συνιστώσα της κίνησης. Για κάποια τιμή του μαγνητικού πεδίου η ενέργεια σε αυτή τη συνιστώσα γίνεται μηδέν. Το σωματίδιο δεν μπορεί να διεισδύσει περαιτέρω στο μαγνητικό πεδίο οπότε υπό την επίδραση της δύναμης αναγκάζεται να γυρίσει πίσω (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 1.16 Οι τρεις κινήσεις που εκτελούν τα φορτισμένα σωματίδια στο μαγνητικό πεδίο της Γης (Tsurutani, 2001).

3) **Ανακύκλωση γύρω από τον μαγνητικό άξονα.** Τα σωματίδια ολισθαίνουν κατά γεωγραφικό πλάτος (Σχ. 1.15). Η συχνότητα εξαρτάται από τη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου, την καμπυλότητα των δυναμικών γραμμών και την ενέργεια των σωματιδίων. Όπως φαίνεται και στο σχήμα τα ηλεκτρόνια κινούνται από τη Δύση προς την Ανατολή, ενώ τα πρωτόνια ακολουθούν την αντίθετη πορεία (Tsurutani, 2001; Μουσάς & Πρέκα, 2003). Λόγω αυτής της κίνησης των φορτισμένων

σωματιδίων δημιουργείται ένα δακτυλιοειδές ρεύμα το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το μαγνητικό πεδίο της Γης (Tsurutani, 2001). Αυτές οι τρεις κινήσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 1.16.

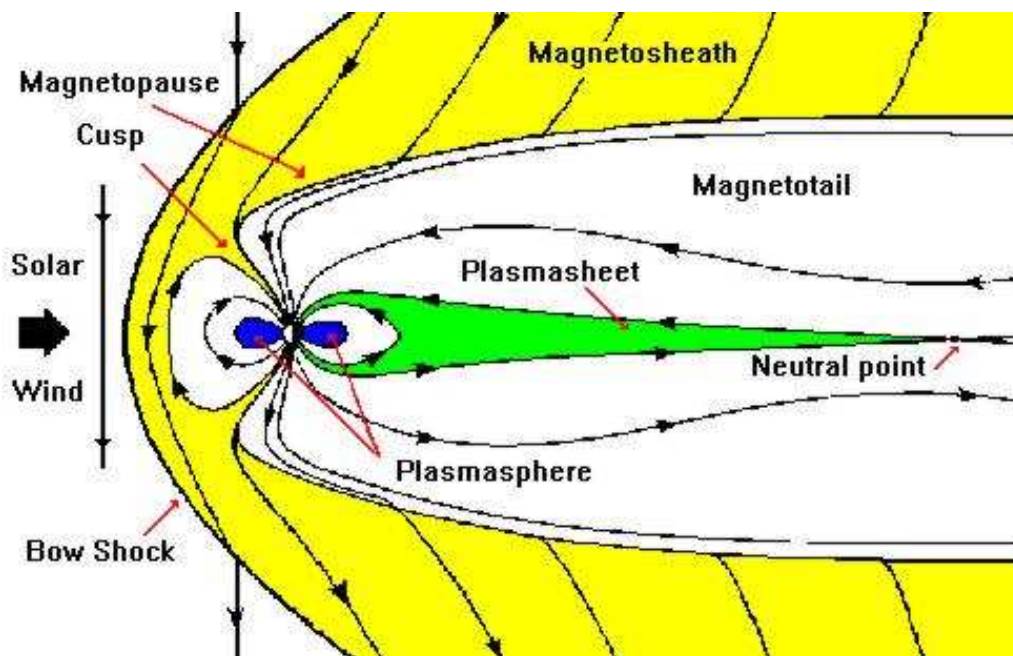
### 1.5.3 Δομή του γεωμαγνητικού πεδίου

Καθώς ο ηλιακός άνεμος πλησιάζει τη Γη με υπερηχητική ταχύτητα αισθάνεται το εμπόδιο του γεωμαγνητικού πεδίου και το παρακάμπτει σαν ρευστό γύρω από κυρτή επιφάνεια (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Ως αποτέλεσμα αυτού, μπροστά από τη φωτεινή πλευρά της Γης και σε απόσταση περίπου  $14 R_E$  δημιουργείται ένα κρουστικό κύμα (bow shock). Μόλις ο ηλιακός άνεμος περάσει το κύμα κρούσης η ταχύτητά του μειώνεται από  $400$  σε  $250 \text{ km s}^{-1}$  και η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική οπότε αυξάνει η θερμοκρασία και η πυκνότητα (Μουσάς & Πρέκα, 2003).

Η μαγνητοθήκη (magnetosheath) είναι μία περιοχή εύρους  $2 - 4 R_E$  (Σχ. 1.17) μέσα στην οποία η ροή του πλάσματος είναι διαταραγμένη (Μουσάς & Πρέκα, 2003; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Σε απόσταση  $10 R_E$  βρίσκεται η μαγνητόπαυση (magnetopause), δηλαδή η περιοχή όπου ο ηλιακός άνεμος συναντά τη μαγνητόσφαιρα (Kivelson & Russell, 1995). Πρόκειται για το όριο της μαγνητοθήκης προς την πλευρά της Γης. Ουσιαστικά είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου η πίεση του ηλιακού ανέμου εξισώνεται με την πίεση του γεωμαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα  $\frac{B_{\kappa}^2}{8\pi} = 2N_{\kappa}mv^2 \cos^2 \theta$ , όπου  $B_{\kappa}$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο  $\kappa$  της μαγνητόπαυσης,  $\theta$  η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της γραμμής που ενώνει το σημείο  $\kappa$  με τη Γη και της γραμμής Γης – Ήλιου,  $N_{\kappa}$  η σωματιδιακή πυκνότητα στο  $\kappa$ ,  $v$  η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και  $m$  η μάζα του σωματιδίου (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Η μαγνητόπαυση διαρκώς αλλάζει και διογκώνεται ή συρρικνώνεται καθώς αλλάζουν η ταχύτητα ή η πυκνότητα του ηλιακού ανέμου (Kallenrode, 1998).

Η περιοχή αδρανούς πλάσματος, η οποία δημιουργείται μπροστά από τη μαγνητόπαυση και κοντά στη γραμμή Ήλιου – Γης λέγεται σημείο στασιμότητας (stagnation point). Πρόκειται για μία περιοχή όπου η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου

έχει ελαττωθεί και η πυκνότητα του πλάσματος είναι πολύ μικρή (Μουσάς & Πρέκα, 2003; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Αυτό οφείλεται στο ότι το μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού ανέμου παρεκκλίνει της ακτινικής του πορείας μόλις συναντήσει τη μαγνητόπαυση και ρέει γύρω από αυτήν (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 1.17 Σχηματική αναπαράσταση της γήινης μαγνητόσφαιρας.

Στη σκοτεινή πλευρά της Γης σχηματίζεται η μαγνητοουρά (magnetotail), η οποία εκτείνεται μέχρι 80 – 100  $R_E$ . Ο σχηματισμός της οφείλεται στη σύρση των πολικών δυναμικών γραμμών από τη διαταραγμένη ροή του ηλιακού ανέμου στη μαγνητοθήκη. Η Σελήνη βρίσκεται μέσα στη μαγνητοουρά μία φορά το μήνα (Μουσάς & Πρέκα, 2003).

Η γεωμετρία της μαγνητοουράς περιλαμβάνει δύο λοβούς στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο αντίστοιχα (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Στο βόρειο λοβό οι δυναμικές γραμμές διευθύνονται προς τον Ήλιο ενώ στο νότιο προς το άκρο της ουράς (Μουσάς & Πρέκα, 2003). Ιόντα της πολικής σχισμής, ιόντα της πολικής περιοχής που εισχωρούν σε χαμηλά στρώματα της μαγνητόσφαιρας και ηλεκτρόνια του ηλιακού ανέμου που εισέρχονται από τις ανοιχτές δυναμικές γραμμές αποτελούν τους σωματιδιακούς πληθυσμούς αυτών των περιοχών (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Ο ουδέτερος φλοιός (neutral sheet), που δημιουργείται από τη συνένωση γραμμών

αντίθετης διεύθυνσης (μαγνητική επανασύνδεση), διαχωρίζει τους δύο λοβούς (Kallenrode, 1998). Έτσι αυξάνει η πίεση του πλάσματος για να διατηρηθεί η ισορροπία. Η περιοχή με την υψηλότερη πίεση πλάσματος, η οποία έχει πάχος  $4 R_E$  και εκτείνεται προς τη μαγνητοουρά σε απόσταση  $7 - 8 R_E$ , λέγεται πλασμοφλοιός (plasma sheet). Το πλάσμα σε αυτή την περιοχή προέρχεται από τον ηλιακό άνεμο. Η αποθήκευση ενέργειας κάνει την παρουσία του πλασμοφλοιού μεταξύ των δύο λοβών της μαγνητοουράς ιδιαίτερα σημαντική (Μουσάς & Πρέκα, 2003).

Ως πλασμόσφαιρα (plasmosphere) αναφέρεται η περιοχή ψυχρού πλάσματος μεγάλης πυκνότητας πάνω από την ιονόσφαιρα. Η πυκνότητα του πλάσματος μειώνεται με το ύψος μέχρι ενός ορίου που καλείται πλασμόπαυση (plasmaopause). Η πλασμόπαυση, ουσιαστικά, αποτελεί το όριο μεταξύ του πλάσματος το οποίο περιστρέφεται γύρω από τη Γη και του πλάσματος που κινείται μέσα στη μαγνητόσφαιρα, χωρίς να περιστρέφεται σε κλειστές τροχιές γύρω από τη Γη (Hanslmeier, 2007). Υπάρχει, συνεπώς, το ηλεκτρικό πεδίο που επάγεται από τα σωματίδια που ολισθαίνουν σε μικρές ακτινικές αποστάσεις γύρω από τη Γη και λέγεται co-rotation electric field και επίσης, το ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί την ολίσθηση των ψυχρών σωματιδίων του ηλιακού ανέμου μέσα στη μαγνητόσφαιρα και λέγεται convection electric field. Δηλαδή, η πλασμόπαυση αποτελεί το όριο στο οποίο εξισώνονται τα δύο ηλεκτρικά πεδία (Μουσάς & Πρέκα, 2003).

Στη συνέχεια αναφέρεται το οριακό στρώμα (boundary layer). Πρόκειται για ακόμα έναν λεπτό φλοιό πλάσματος που εφάπτεται κατά μήκος της μαγνητόπαυσης και αποτελείται από πλάσμα σχεδόν της ίδιας θερμοκρασίας και παρομοίων ιδιοτήτων με το πλάσμα της μαγνητοθήκης. Οι πιο γνώστες περιοχές του είναι το στρώμα εισόδου (entry layer), ο μανδύας πλάσματος (plasma mantle) και το οριακό στρώμα χαμηλού πλάτους (low latitude boundary layer – LLBL).

Στη φωτεινή πλευρά της μαγνητόπαυσης υπάρχουν δύο περιοχές οι οποίες καλούνται πολικές σχισμές (polar cusps) (Kallenrode, 1998; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Σε αυτές παρατηρείται ένας απότομος διαχωρισμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που βρίσκονται στη φωτεινή μαγνητόσφαιρα από τις δυναμικές γραμμές μεγάλου πλάτους που προεκτείνονται στη μαγνητοουρά. Πιο συγκεκριμένα, οι πολικές σχισμές συνδέονται με δύο ουδέτερα σημεία, δηλαδή σημεία όπου το ολικό

μαγνητικό πεδίο μηδενίζεται, στη μαγνητόπαυση. Πρόκειται για τις απολήξεις των μαγνητικών γραμμών που τέμνουν την επιφάνεια της Γης σε γεωγραφικά πλάτη  $\pm 78^\circ$ . Οι δυναμικές γραμμές που ξεκινούν από χαμηλότερα πλάτη σχηματίζουν κλειστούς βρόχους, ενώ αυτές που ξεκινούν από μεγαλύτερα πλάτη είναι ανοιχτές και καταλήγουν στη μαγνητοουρά. Τελικά, παρατηρείται σύγκλιση όλων των δυναμικών γραμμών στα δύο σημεία της γήινης επιφάνειας που προβάλλονται τα ουδέτερα σημεία δημιουργώντας ένα είδος χωνιού, το οποίο καλύπτει κατά μέσο όρο  $5^\circ$  πλάτος. Το πλάσμα της μαγνητοθήκης μπαίνει στο χωνί από το στρώμα εισόδου και φθάνει στη γήινη ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια μεταφέρεται προς τα πίσω, στο μανδύα πλάσματος, δηλαδή στο φλοιό που ξεκινά από τις πολικές σχισμές και φθάνει στα άκρα της μαγνητοουράς. Το οριακό στρώμα χαμηλού πλάτους ξεκινά από τη φωτεινή πλευρά και σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη,  $\pm 30^\circ$  (Μουσάς & Πρέκα, 2003).

#### 1.5.4 Ρεύματα στη μαγνητόσφαιρα

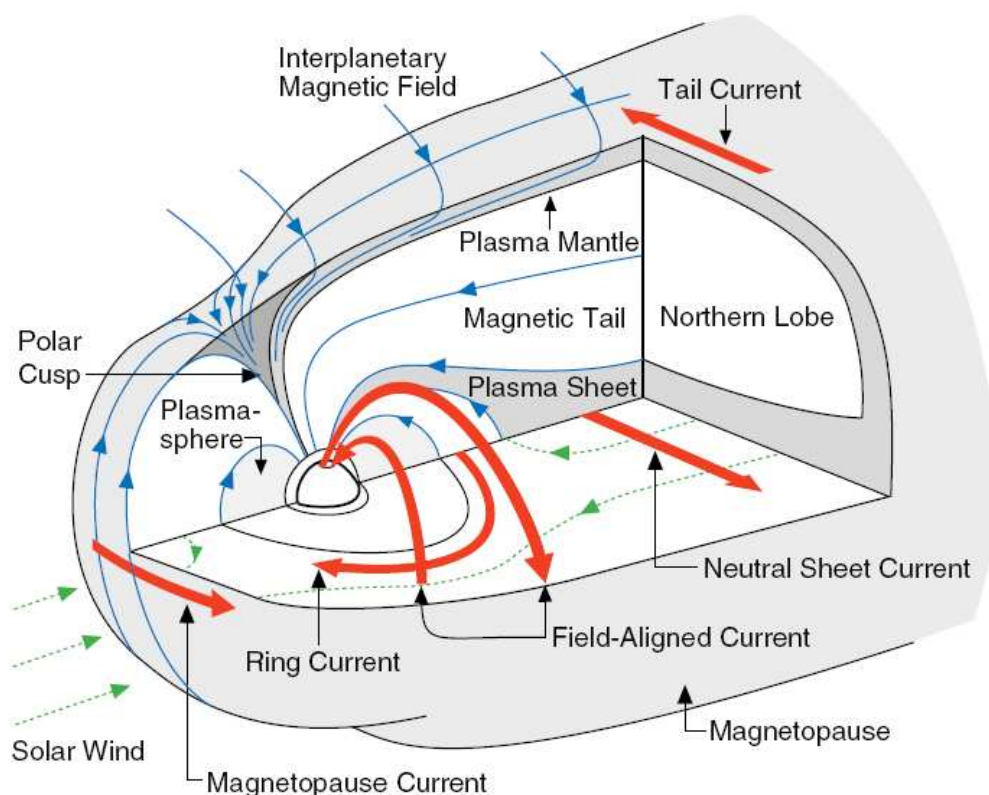
Η γήινη μαγνητόσφαιρα διαρρέεται από ένα πολύπλοκο σύστημα ηλεκτρικών ρευμάτων (Σχ. 1.18), τα οποία δημιουργούνται από μεταβολές στην κίνηση των σωματιδίων (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Ο Potemra (1984) διαχώρισε τα μαγνητοσφαιρικά ρεύματα στις εξής κατηγορίες: ρεύμα της μαγνητόπαυσης ή ρεύμα Chapman – Ferraro, εγκάρσιο ρεύμα της μαγνητοουράς, ρεύματα Birkeland, δακτυλιοειδές ρεύμα και ένα πολύπλοκο σύστημα ρευμάτων τα οποία ρέουν μέσα στην ιονόσφαιρα. Η ένταση αυτών των ρευμάτων φθάνει τα μερικά εκατομμύρια Ampere, ενώ σχετίζονται στενά με την ηλιακή δραστηριότητα (Potemra, 1984). Στη συνέχεια ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των ρευμάτων αυτών (Σχ. 1.19).

##### ❖ Ρεύμα της μαγνητόπαυσης ή ρεύμα Chapman – Ferraro

Το συγκεκριμένο ρεύμα ρέει σε απόσταση περίπου  $10 - 15 R_E$  στο όριο μεταξύ ηλιακού ανέμου και γεωμαγνητικού πεδίου (Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998; Μαυρομιχαλάκη, 2005) και κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του γεωμαγνητικού πεδίου (Potemra, 1984). Σχηματίζεται από τη συμπίεση που προκαλεί το πλάσμα του ηλιακού ανέμου στο γεωμαγνητικό πεδίο στη φωτεινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας (Potemra, 1984). Συνεπώς το ρεύμα της μαγνητόπαυσης

περιορίζει το πεδίο της Γης προς τη μαγνητόσφαιρα και αυξάνει το μαγνητικό πεδίο παντού μέσα στη μαγνητόπαυση (Kivelson & Russell, 1995; Μαυρομιχαλάκη, 2005).



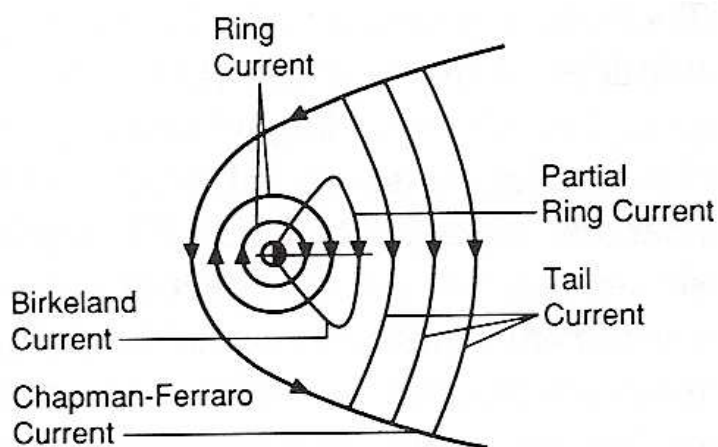
Σχ. 1.18 Ρεύματα στη μαγνητόσφαιρα της Γης (Russell, 2000).

#### ❖ Εγκάρσιο ρεύμα της μαγνητοουράς

Το ρεύμα της μαγνητοουράς (Parks, 1991; Μαυρομιχαλάκη, 2005) παράγεται λόγω των επαπτομενικών τάσεων μεταξύ του ηλιακού ανέμου και του γεωμαγνητικού πεδίου που έχουν ως αποτέλεσμα να παρασύρονται οι γραμμές του γήινου πεδίου και του πλάσματος αντίθετα από τη διεύθυνση του Ήλιου, σχηματίζοντας μία μαγνητική ουρά πίσω από τη Γη (Kivelson & Russell, 1995). Πρόκειται για ρεύμα το οποίο κινείται στη διεύθυνση Ανατολής – Δύσης (Parks, 1991), πάνω στο ισημερινό επίπεδο (Kivelson & Russell, 1995) και το οποίο αρχίζει στις  $10 R_E$  περίπου και εκτείνεται πέρα από τις  $200 R_E$ , ενώ χωρίζει τη μαγνητοουρά στους δύο λοβούς (Kallenrode, 1998). Η κύρια επίδρασή του στην επιφάνεια της Γης είναι η μείωση του ολικού πεδίου (Kivelson & Russell, 1995; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

#### ❖ Ρεύματα Birkeland

Αναφέρθηκαν για πρώτη φορά από τον Birkeland το 1908, ρέουν συγγραμμικά με τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές προς ή από τις περιοχές των ζωνών σέλαος (Potemra, 1984), αποτελούνται από το ανερχόμενο και το κατερχόμενο ρεύμα και φτάνουν μέχρι την περιοχή της ιονόσφαιρας (Parks, 1991; Kallenrode, 1998). Επειδή τα ρεύματα Birkeland αποτελούνται από δύο σχεδόν παράλληλα στρώματα με αντίθετες φορές, το μαγνητικό τους πεδίο βρίσκεται περιορισμένο μεταξύ των δύο στρωμάτων. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο γίνεται εμφανής η ύπαρξη των ρευμάτων Birkeland είναι η δημιουργία δύο ηλεκτροχειμάρων στην ιονόσφαιρα που είναι ένα δευτερογενές σύστημα ρευμάτων (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 1.19 Τα κυριότερα ρεύματα που αναπτύσσονται στη μαγνητόσφαιρα της Γης στο επίπεδο του ισημερινού, όπως φαίνονται από τον Βόρειο πόλο (Kivelson & Russell, 1995).

#### ❖ Δακτυλιοειδές ρεύμα

Πρόκειται για ένα ρεύμα σχήματος τοροειδούς το οποίο ρέει στην εσωτερική μαγνητόσφαιρα από Ανατολή προς Δύση (Daglis, 2001). Επίσης, το δακτυλιοειδές ρεύμα ρέει σε μεγάλα υψόμετρα γύρω από τον ισημερινό (Potemra, 1984; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Αποτελείται από παγιδευμένα ιόντα (κυρίως  $H^+$ ) ενέργειας 10 – 200 keV τα οποία παρασύρονται αζιμουθιακά γύρω από τη Γη σε ακτινικές αποστάσεις 2 – 7  $R_E$ , επικαλύπτοντας την περιοχή των ζωνών ακτινοβολίας (Daglis, 2001; [http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/ring\\_current.html](http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/ring_current.html)). Αύξηση του δακτυλιοειδούς ρεύματος προκαλεί μείωση της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου

που μετράται στην επιφάνεια της Γης (Parks, 1991; Kivelson & Russell, 1995; Daglis, 2001; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Όλα τα ρεύματα που αναπτύσσονται πάνω από την ιονόσφαιρα εξαρτώνται από τον ηλιακό άνεμο. Οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι που τα επηρεάζουν είναι η δυναμική πίεση, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα και το από βορρά προς νότο προσανατολισμένο μαγνητικό πεδίο. Όταν οποιαδήποτε από αυτές τις παραμέτρους μεταβληθεί σημειώνονται αξιοσημείωτες μεταβολές στην ένταση, τη θέση και την κατανομή των ρευμάτων (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Οι μεταβολές αυτές στα ρεύματα σχετίζονται με μεταβολές του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης, οι οποίες αποτελούν τη γεωμαγνητική δραστηριότητα (geomagnetic activity, GMA) και η οποία επηρεάζει τις ανθρώπινες δραστηριότητες με πολλούς τρόπους (βλ. Κεφ. VII § 7.2) (Kivelson & Russell, 1995).

### 1.6 Γεωμαγνητικές καταιγίδες

Ως γεωμαγνητικές καταιγίδες (geomagnetic storms) ορίζονται οι έντονες διαταραχές της μαγνητόσφαιρας που συνοδεύονται από σημαντική μείωση της οριζόντιας συνιστώσας  $H$  του γεωμαγνητικού πεδίου ([http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geomagnetic\\_storm.html](http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geomagnetic_storm.html); Parks, 1991; Daglis, 2001; Hanslmeier, 2007). Η δυνατότητα πρόγνωσης των γεωμαγνητικών καταιγίδων είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού μπορούν να επηρεάσουν τις ανθρώπινες δραστηριότητες και τηλεπικοινωνίες (Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998; Daglis, 2001) αλλά, όπως αποδεικνύεται από πρόσφατες μελέτες και την ανθρώπινη ζωή (Babayev & Allahverdiyeva, 2007; Dimitrova et al., 2004a, b; Dimitrova, 2007).

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες είναι πολύπλοκα φαινόμενα, τα οποία πηγάζουν από το ηλιακό στέμμα και εξελίσσονται στον ηλιακό άνεμο, τη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τη θερμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, οι επιδράσεις των γεωμαγνητικών καταιγίδων στο περιβάλλον της Γης προκύπτουν από μία αλυσίδα διαδικασιών οι οποίες σχετίζονται με τη ροή και μετατροπή της ενέργειας του ηλιακού ανέμου και την ηλεκτροδυναμική σύζευξη ανάμεσα στο διαπλανητικό μέσο,



τη μαγνητόσφαιρα, την ιονόσφαιρα και τα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας (Kamide et al., 1998; Daglis, 2001).

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες ανιχνεύτηκαν πρώτα με τη χρήση μαγνητογραφημάτων από το έδαφος, με χαρακτηριστικό γνώρισμα τη μείωση της έντασης της οριζόντιας συνιστώσας  $H$  του γεωμαγνητικού πεδίου με διάρκεια μερικών δεκάδων ωρών. Η μείωση της οριζόντιας συνιστώσας  $H$  εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και είναι μέγιστη στον ισημερινό και ελάχιστη στους πόλους (Parks, 1991; Daglis, 2001). Αυτή η μείωση προκαλείται από το δακτυλιοειδές ρεύμα στη μαγνητόσφαιρα που περικλείει τη Γη έχει δυτική κατεύθυνση και απέχει από το κέντρο της Γης από 2 έως 7  $R_E$  (βλ. Κεφ. I § 1.5.4).

Η ένταση του δακτυλιοειδούς ρεύματος αποτελεί μέτρο της έντασης της καταιγίδας, η οποία εκτιμάται από τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst (βλ. Κεφ. I § 1.7.2). Ο δείκτης Dst μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των καταιγίδων στο εύρος τιμών από  $-600\text{nT}$  έως  $100\text{nT}$ . Στον Πίνακα 1.2 δίνεται μία ταξινόμηση των γεωμαγνητικών καταιγίδων ανάλογα με τα κατώφλια τιμών του γεωμαγνητικού δείκτη Dst και του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου Bz (<http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/storms.html>).

**Πίνακας 1.2** Κατηγοριοποίηση των καταιγίδων και χρονική διάρκεια αυτών ανάλογα με το κατώφλι τιμών για τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst και το διαπλανητικό πεδίο Bz.

Ένταση καταιγίδας	Dst (nT)	Bz (nT)	Διάρκεια (hrs)
<b>Ισχυρή</b>	-100	-10	3
<b>Μέτρια</b>	-50	-5	2
<b>Ασθενής</b>	-30	-3	1

Το NOAA Space Weather Prediction Center έχει ταξινομήσει τις γεωμαγνητικές καταιγίδες σε 5 επίπεδα ανάλογα με την έντασή τους (Πίνακας 1.3). Επίσης η συγκεκριμένη κλίμακα παρέχει και τις πιθανές επιδράσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες για κάθε επίπεδο, δίνει τη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων φαινομένων και ένα μέτρο της έντασης του φυσικού αίτιου.

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες χωρίζονται σε περιοδικές και μη περιοδικές. Οι περιοδικές καταιγίδες συμβαίνουν κάθε 27 ημέρες, ακολουθώντας την περίοδο περιστροφής του Ήλιου. Προκαλούνται όταν η Γη αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο που έχει σχηματιστεί στον διαπλανητικό χώρο από την αλληλεπίδραση αργού και γρήγορου ηλιακού ανέμου. Οι περιοδικές καταιγίδες συμβαίνουν στο τέλος του ηλιακού κύκλου. Οι μη περιοδικές γεωμαγνητικές καταιγίδες εμφανίζονται κοντά στα μέγιστα της ηλιακής δραστηριότητας. Προκαλούνται από διαπλανητικές διαταραχές που οφείλονται σε στεμματικές εκτινάξεις μάζας (Ramesh, 1996; [http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geomagnetic\\_storm.html](http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/geomagnetic_storm.html)).

*Πίνακας 1.3 Η 'NOAA Space Weather Scale for Geomagnetic Storms' (<http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/>).*

Geomagnetic storms			
Category		Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor	Kp values <sup>1</sup>	Number of storm events when Kp level was met; (number of storm days)
<b>G 5</b>	<b>Extreme</b>	Kp = 9	4 per cycle (4 days per cycle)
<b>G 4</b>	<b>Severe</b>	Kp = 8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)
<b>G 3</b>	<b>Strong</b>	Kp = 7	200 per cycle (130 days per cycle)
<b>G 2</b>	<b>Moderate</b>	Kp = 6	600 per cycle (360 days per cycle)
<b>G 1</b>	<b>Minor</b>	Kp = 5	1700 per cycle (900 days per cycle)

### 1.6.1 Φάσεις γεωμαγνητικής καταιγίδας

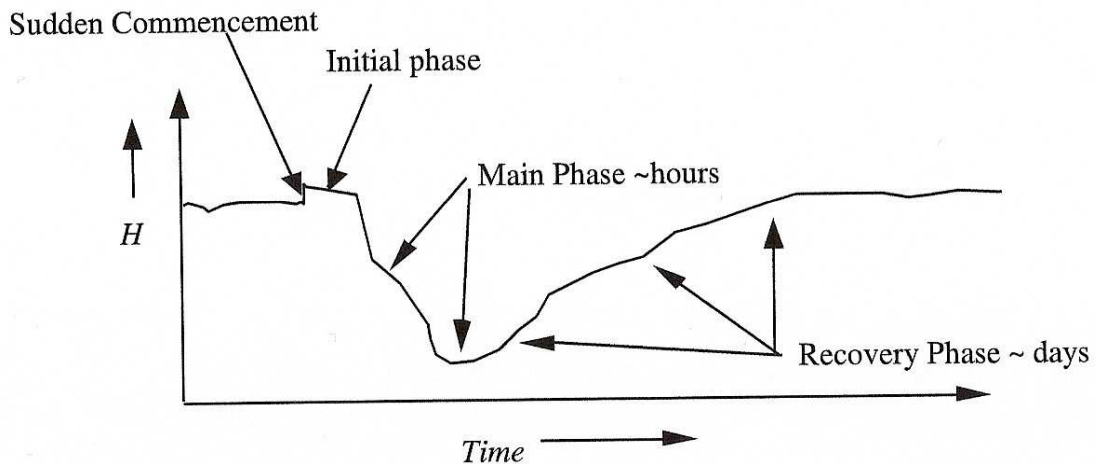
Μία γεωμαγνητική καταιγίδα, όπως φαίνεται και στα σχήματα 1.20 και 1.24 (άνω διάγραμμα), περιλαμβάνει κυρίως τρεις φάσεις (Parks, 1991; Daglis, 2001):

<sup>1</sup> The Kp-index used to generate these messages is derived from a real-time network of observatories the report data to SWPC in near real-time. In most cases the real-time estimate of the Kp index will be a good approximation to the official Kp indices that are issued twice per month by the German GeoForschungsZentrum (GFZ) (Research Center for Geoscience).

α) Ξεκινάει με μία απότομη αύξηση στην οριζόντια συνιστώσα  $H$ , που ονομάζεται αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (sudden storm commencement – SSC) και στη συνέχεια ακολουθεί μία μικρή περίοδος τυχαίας διάρκειας που ονομάζεται αρχική φάση στην οποία η οριζόντια συνιστώσα  $H$  παραμένει σταθερή (ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst αυξάνει και παίρνει θετικές τιμές έως και μερικές δεκάδες nT).

β) Την αρχική φάση διαδέχεται η κύρια φάση, όπου πλέον η οριζόντια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου μειώνεται (ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst μειώνεται έως και μερικές εκατοντάδες nT), με τη μείωση αυτή να διαρκεί λίγες ώρες.

γ) Τέλος παρατηρείται η φάση ανάκαμψης του γεωμαγνητικού πεδίου στα επίπεδα που είχε πριν την έναρξη της καταιγίδας (ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst επανέρχεται σε κανονικές τιμές). Η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκέσει μερικές ημέρες (<http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/storms.html>).



Σχ. 1.20 Χρονική εξέλιξη μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας ([http://www.vsp.ucar.edu/Heliophysics/pdf/ToffolettoF2\\_GeomagneticStormsSubstorms\\_07.pdf](http://www.vsp.ucar.edu/Heliophysics/pdf/ToffolettoF2_GeomagneticStormsSubstorms_07.pdf)).

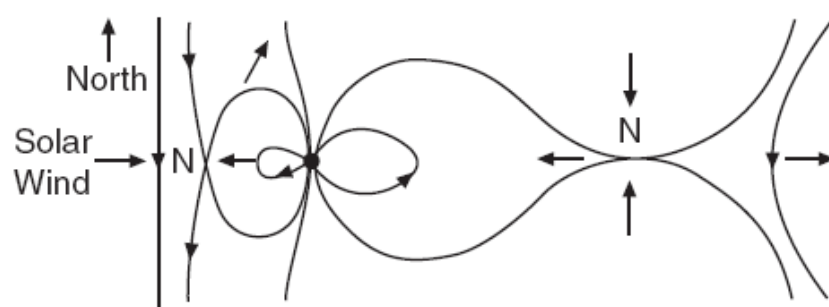
Πρέπει να σημειωθεί ότι το SSC δεν είναι απαραίτητη συνθήκη ώστε να παρατηρηθεί γεωμαγνητική καταιγίδα και γι' αυτό η αρχική φάση δεν είναι ουσιώδες χαρακτηριστικό (Joselyn & Tsurutani, 1990; Daglis, 2001). Σε αυτή την περίπτωση (Σχ. 1.24, κάτω διάγραμμα) η αρχική φάση δεν ξεκινά ξαφνικά (δεν σημειώνεται

SSC), η κύρια φάση είναι μικρή και ακανόνιστης μορφής και η φάση επαναφοράς είναι ακανόνιστης μορφής και μεγάλης διάρκειας (Tsurutani, 2001).

Η διάρκεια τυπικών καταιγίδων είναι από μία έως πέντε ημέρες (Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998). Η αρχική φάση διαρκεί περίπου μέχρι μία ημέρα, η κύρια φάση της καταιγίδας διαρκεί περίπου μία ημέρα και η φάση επαναφοράς πολλές ημέρες (Kivelson & Russell, 1995; Kallenrode, 1998). Κατά τη διάρκεια των γεωμαγνητικών καταιγίδων αυξάνει η ένταση του πολικού σέλαος, που μπορεί να παρατηρηθεί όχι μόνο στους πόλους αλλά και σε μικρότερα γεωγραφικά πλάτη.

### 1.6.2 Φυσική ερμηνεία γεωμαγνητικής καταιγίδας

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες είναι σημαντικές διαταραχές της μαγνητόσφαιρας, οι οποίες συμβαίνουν όταν το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο προσανατολίζεται προς τον Νότο και διατηρεί αυτό τον προσανατολισμό για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Τότε, μπορεί να λάβει χώρα το φαινόμενο της μαγνητικής επανασύνδεσης (magnetic reconnection), κατά το οποίο ισχύει το μοντέλο της ανοιχτής μαγνητόσφαιρας, δηλαδή η μαγνητόσφαιρα αποτελεί ένα ανοιχτό σύστημα ανταλλαγής ενέργειας με τον ηλιακό άνεμο (Kallenrode, 1998; Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 1.21 Σχηματική αναπαράσταση της μαγνητικής επανασύνδεσης μεταξύ του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και του γεωμαγνητικού πεδίου (Russell, 2000).

Κατά τη μαγνητική επανασύνδεση (Σχ. 1.21) το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο φέρεται παγωμένο μέσα στον ηλιακό άνεμο και έχει προσανατολισμό προς Νότο, αλληλεπιδρά με το γεωμαγνητικό πεδίο στο επίπεδο του ισημερινού. Αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μίας δυναμικής γραμμής του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου με μία αντίστοιχη του γεωμαγνητικού πεδίου είναι ο σχηματισμός μίας ουδέτερης γραμμής τύπου  $X$  και η δημιουργία ενός ζεύγους δυναμικών γραμμών στη φωτεινή πλευρά της μαγνητόσφαιρας (Kallenrode, 1998; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Ο ηλιακός άνεμος με την κίνηση του παρασύρει τις επανασυνδεόμενες δυναμικές γραμμές στη μαγνητοουρά, όπου παρατηρείται η αντίστροφη διαδικασία. Τα πιο έντονα γεωμαγνητικά φαινόμενα συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του φαινομένου της επανασύνδεσης. Συγκεκριμένα, καθώς πλάσμα εισέρχεται στη μαγνητόσφαιρα και ρέει μέσα σε αυτή σχηματίζεται το δακτυλιοειδές ρεύμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για τις μεγάλες μειώσεις της συνιστώσας  $H$  του γεωμαγνητικού πεδίου σχεδόν σε ολόκληρη την επιφάνεια της Γης (φαινόμενο μαγνητικής καταιγίδας). Όσο συνεχίζεται η έκχυση σωματιδίων η ένταση του δακτυλιοειδούς ρεύματος αυξάνει και πλησιάζει ασυμπτωτικά μία τιμή στην οποία ο ρυθμός έκχυσης σωματιδίων ισούται με τον ρυθμό απώλειας σωματιδίων. Το χρονικό διάστημα που διαρκεί η αύξηση του δακτυλιοειδούς ρεύματος αποτελεί την κύρια φάση της καταιγίδας. Όμως, όταν το διαπλανητικό πεδίο στραφεί πάλι προς τα βόρεια, ο ρυθμός ενεργοποίησης του πλάσματος και της προς τα μέσα μεταφοράς του ελαττώνεται, οι διάφοροι μηχανισμοί απώλειας, οι οποίοι μεταφέρουν πλάσμα από το δακτυλιοειδές ρεύμα, το επαναφέρουν στην προ-καταιγίδας κατάσταση και οι επίγειες διαταραχές μειώνονται (Kivelson & Russell, 1995).

### 1.6.3 Γεωμαγνητικές καταιγίδες και ηλιακή δραστηριότητα

Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ηλιακή δραστηριότητα και ξεκινούν όταν διαταραχές στον ηλιακό άνεμο φτάνουν στη γήινη μαγνητόσφαιρα. Οι ηλιακές εκλάμψεις και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας είναι τα πιο έντονα φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν κοντά στο ηλιακό μέγιστο και προκαλούν γεωμαγνητικές καταιγίδες. Αυτά τα φαινόμενα μπορεί να παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος έντασης και ταχύτητας, αλλά αυτά που είναι πιο πιθανό να προκαλέσουν καταιγίδα είναι τα πιο απότομα με ταχύτητες που ξεπερνούν την ταχύτητα του

περιβάλλοντος ανέμου με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρουστικού κύματος (Daglis, 2001).

Κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου ένας άλλος τύπος ηλιακού γεγονότος, τα ταχέως περιστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου από τις στεμματικές οπές, φαίνεται να κυριαρχεί στην περιοδική γεωμαγνητική δραστηριότητα (Reames, 1991; Tsurutani, 2001). Σε αυτή τη φάση του ηλιακού κύκλου οι στεμματικές οπές, περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας και ανοιχτών δυναμικών γραμμών, κυριαρχούν στον χώρο και επεκτείνονται μέχρι τις ισημερινές περιοχές. Από αυτές τις περιοχές, οι οποίες έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και παρουσιάζονται να περιστρέφονται μαζί με τον Ήλιο (Daglis, 2001), διαφεύγουν συνεχώς γρήγορα ρεύματα πλάσματος τα οποία 'καταπίνουν' τη μαγνητόσφαιρα μία φορά κάθε ~27 ημέρες σχηματίζοντας τις λεγόμενες περιοδικές γεωμαγνητικές καταιγίδες (Tsurutani, 2001).

Η αλληλεπίδραση των ταχέως κινουμένων ρευμάτων του ηλιακού ανέμου με τον αργότερο ηλιακό άνεμο οδηγεί σε συμπίεση του πλάσματος και των μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι συμπιεσμένες περιοχές καλούνται co-rotating interaction regions (CIRs) (βλ. Κεφ. I § 1.4.5). Σε απόσταση 1 AU από τον Ήλιο, οι CIRs τυπικά δεν παρουσιάζουν γρήγορα προπορευόμενα κρουστικά κύματα, γι' αυτό και σε αυτά τα γεγονότα δεν σημειώνεται SSC στην αρχική τους φάση (Tsurutani, 2001).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα αίτια των γεωμαγνητικών καταιγίδων είναι τα ισχυρά ηλεκτρικά πεδία με κατεύθυνση από την Ανατολή προς τη Δύση τα οποία περιέχονται στον ηλιακό άνεμο και μεταφέρουν ενέργεια, μέσω του πλάσματος, στη μαγνητόσφαιρα. Αυτά τα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται από τον συνδυασμό δύο παραγόντων: την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και τη νότια κατεύθυνση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (IMF). Από τα δύο το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο είναι πιο σημαντικό για μεμονωμένες καταιγίδες, λόγω των εντονότερων μεταβολών που παρουσιάζει, ενώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου παίζει σημαντικό ρόλο στη μακρόχρονη γεωμαγνητική δραστηριότητα (Daglis, 2001).

Κατά τη διάρκεια ενός ηλιακού κύκλου παρατηρούνται δύο κορυφές γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μία λίγο πριν και μία μετά το ηλιακό μέγιστο (Cliver et al., 1996). Από μελέτη του αριθμού των ηλιακών κηλίδων σχετικά με τον αριθμό

των έντονων γεωμαγνητικών καταιγίδων για τη χρονική περίοδο 1972 – 1996 προκύπτει ότι η γεωμαγνητική δραστηριότητα ακολουθεί πιστά τον ηλιακό κύκλο κυρίως στην αρχή και προς το τέλος του (Daglis, 2001).

Άλλη μία στατιστική τάση η οποία παρατηρείται στη γεωμαγνητική δραστηριότητα είναι η διαμόρφωσή της ανάλογα με τον 22ετή κύκλο (Cliver et al., 1996). Προκύπτει ότι τα μέσα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας φαίνεται να είναι υψηλότερα κατά την ανοδική φάση των περιττών ηλιακών κύκλων και κατά την καθοδική φάση των άρτιων ηλιακών κύκλων (Daglis, 2001).

## 1.7 Γεωμαγνητικοί δείκτες

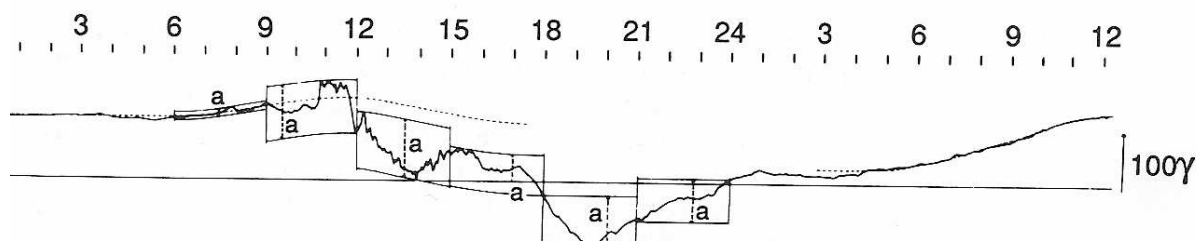
Οι μεταβολές στο πλάτος των χρονικών διακυμάνσεων στο γεωμαγνητικό πεδίο ορίζουν τη γεωμαγνητική δραστηριότητα. Η γεωμαγνητική δραστηριότητα καταγράφεται στα επίγεια παρατηρητήρια και προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί έχουν εισαχθεί οι γεωμαγνητικοί δείκτες (Kallenrode, 1998; Λουκάς, 2009). Ο γεωμαγνητικός δείκτης είναι η μονότονη συνάρτηση κάποιας φυσικής παραμέτρου του φαινομένου που προκάλεσε μία διαταραχή και μπορεί να προσδιοριστεί απλά (Kivelson & Russell, 1995; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

### 1.7.1 Γεωμαγνητικοί δείκτες $K_p$ και $A_p$

Ο  $K$ -δείκτης είναι δείκτης της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σε ένα σταθμό και μετρά το μέγεθος των διαταραχών που προέρχονται από άλλα φαινόμενα εκτός από την ημερήσια μεταβολή και τις μακρόχρονες συνιστώσες μίας καταιγίδας (Kivelson & Russell, 1995; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Δηλαδή ο  $K$ -δείκτης απομονώνει τις επιδράσεις των ηλιακών σωματιδίων στο μαγνητικό πεδίο της Γης ([http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/description.html](http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/description.html); Hanslmeier, 2007). Ο τρόπος που εξάγεται φαίνεται στο σχήμα 1.22 για τον σταθμό Fredericksburg.

Κάθε διάστημα 3 ωρών μίας ημέρας σε παγκόσμιο χρόνο περιγράφεται από έναν ακέραιο αριθμό από το 0 έως το 9. Έτσι, κάθε ημέρα χαρακτηρίζεται από 8 δείκτες  $K$ . Το εύρος των μεταβολών των συνιστωσών  $H$  (οριζόντια συνιστώσα) και  $D$  (γωνιακή απόκλιση) του γεωμαγνητικού πεδίου σε nT για κάθε 3ωρο διάστημα

καθορίζει το ποιος δείκτης θα αντιστοιχηθεί σε αυτό το διάστημα, αφού πρώτα έχει αφαιρεθεί η πιθανή αναμενόμενη ημερήσια διακύμανση λόγω της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Προκειμένου να γίνει η αφαίρεση αυτή και να βρεθεί μία μέση κανονική διακύμανση βάσει της οποίας θα υπολογίζονται οι μεταβολές των συνιστωσών του γεωμαγνητικού πεδίου λαμβάνονται υπόψη οι πέντε πιο ήρεμες γεωμαγνητικές ημέρες για κάθε μήνα (Λουκάς, 2009).



Σχ. 1.22 Απεικόνιση της διαδικασίας σύμφωνα με την οποία καθορίζεται ο 3ωρος δείκτης  $K$  σε έναν σταθμό (Kivelson & Russell, 1995; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

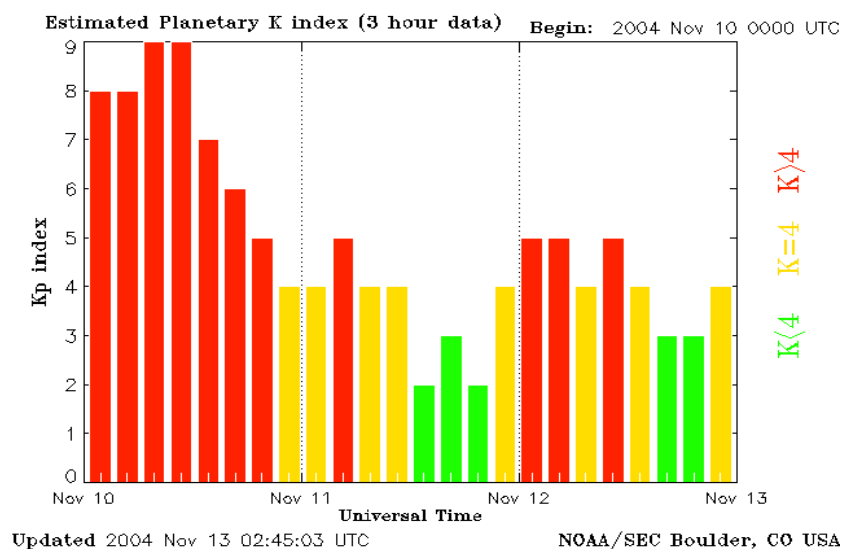
**Πίνακας 1.4** Πίνακας αντιστοιχίας γεωμαγνητικών μεταβολών (nT) στον δείκτη  $K$ .

Δείκτης $K$	Μέγεθος διαταραχής σε (nT)
0	0 – 5
1	5 – 10
2	10 – 20
3	20 – 40
4	40 – 70
5	70 – 120
6	120 – 200
7	200 – 330
8	330 – 550
9	> 500

Η μετατροπή του εύρους από nT σε μία αριθμητική τιμή γίνεται με τη χρήση ημιλογαριθμικής κλίμακας. Οι τιμές της κλίμακας διαφέρουν ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητηρίου. Οι ίδιες γεωμαγνητικές διαταραχές μπορούν να εμφανιστούν σε πολλά γεωγραφικά πλάτη με διαφορετική ένταση. Γενικά, παρατηρητήρια με μεγαλύτερο πλάτος χρειάζονται μεγαλύτερο εύρος γεωμαγνητικής διαταραχής για τον ίδιο δείκτη  $K$  (Λουκάς, 2009). Στον Πίνακα 1.4 δίνεται η αντιστοίχιση γεωμαγνητικών μεταβολών (nT) στον δείκτη  $K$  για το NOAA



Space Weather Prediction Center στο Boulder των ΗΠΑ  
(<http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>).



Σχ. 1.23 Μεταβολές του δείκτη Kp για το χρονικό διάστημα 10 – 13 Νοεμβρίου 2004.

Είναι αναγκαίο να ορισθεί ένας διαπλανητικός δείκτης (Kp index), ο οποίος να μην μεταβάλλεται από παρατηρητήριο σε παρατηρητήριο, όπως ο δείκτης K. Αυτό γίνεται με τον εξής τρόπο, οι δείκτες K από 13 πρότυπα παρατηρητήρια που βρίσκονται ανάμεσα στις 44° και 60° στο Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο (Hanslmeier, 2007) {Lerwick (UK), Eskdalemuir (UK), Hartland (UK), Ottawa (Canada), Fredericksburg (USA), Meannook (Canada), Sitka (USA), Eyrewell (New Zealand), Canberra (Australia), Lovo (Sweden), Brorfelde (Denmark), Wingst (Germany) and Niemegek (Germany)} κανονικοποιούνται στους δείκτες K<sub>s</sub>. Αυτό γίνεται μέσα από πίνακες που δίνουν ισοδύναμες κατανομές των K<sub>s</sub> τιμών κάθε σταθμού κάθε τρίωρο διάστημα κάθε εποχής. Οι πίνακες αυτοί, οι οποίοι σχετίζονται με το κάθε παρατηρητήριο, αντιστοιχούν το διάστημα τιμών του δείκτη K από 0 (ήσυχη περίοδος) έως 9 (διαταραγμένη περίοδος) σε 28 κλασματικούς δείκτες K<sub>s</sub>, οι οποίοι παίρνουν τιμές που είναι ακέραια πολλαπλάσια του  $\frac{1}{3}$  της μονάδας (Kivelson & Russell, 1995). Δηλαδή, τιμή ίση με 5<sup>-</sup> σημαίνει 4 και  $\frac{2}{3}$ , τιμή ίση με 5 σημαίνει 5 και

$\frac{0}{3}$  ή 5 ακριβώς, ενώ τιμή ίση με  $5^+$  σημαίνει 5 και  $\frac{1}{3}$  (Hanslmeier, 2007). Ο αριθμητικός μέσος των δεικτών  $K_s$  ορίζεται ως ο δείκτης  $K_p$  (Kivelson & Russell, 1995; Hanslmeier, 2007).

Ο δείκτης  $K_p$  είναι το μέτρο για την ένταση των γεωμαγνητικών καταιγίδων και επομένως και τη φόρτιση της επιφάνειας. Ο δείκτης αυτός μετράται κάθε τρεις ώρες με κλίμακα από 0 – 9 (0 δεν υπάρχει γεωμαγνητική καταιγίδα, 9 έντονη διαταραχή). Ένα παράδειγμα όπου ο δείκτης  $K_p$  παίρνει τιμή 9 φαίνεται στο σχήμα 1.23 που αφορά στο χρονικό διάστημα 10 – 13 Νοεμβρίου 2004. Γενικά οι συνέπειες παρουσιάζονται στη γήινη επιφάνεια όταν ο  $K_p$  είναι 4 ή 5 (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Για μακρόχρονες μεταβολές είναι χρήσιμο να υπάρχουν ημερήσιοι δείκτες. Επειδή όμως οι δείκτες  $K$  και  $K_p$  είναι λογαριθμικοί πρέπει να οριστούν γραμμικοί δείκτες εύρους (<http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>). Ο γραμμικός δείκτης  $ap$  προκύπτει από τον  $K_p$  όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.5 (Hanslmeier, 2007). Ο ημερήσιος δείκτης  $A_p$  είναι ο μέσος όρος των 8 δεικτών  $ap$  για μία ημέρα (Λουκάς, 2009; <http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>).

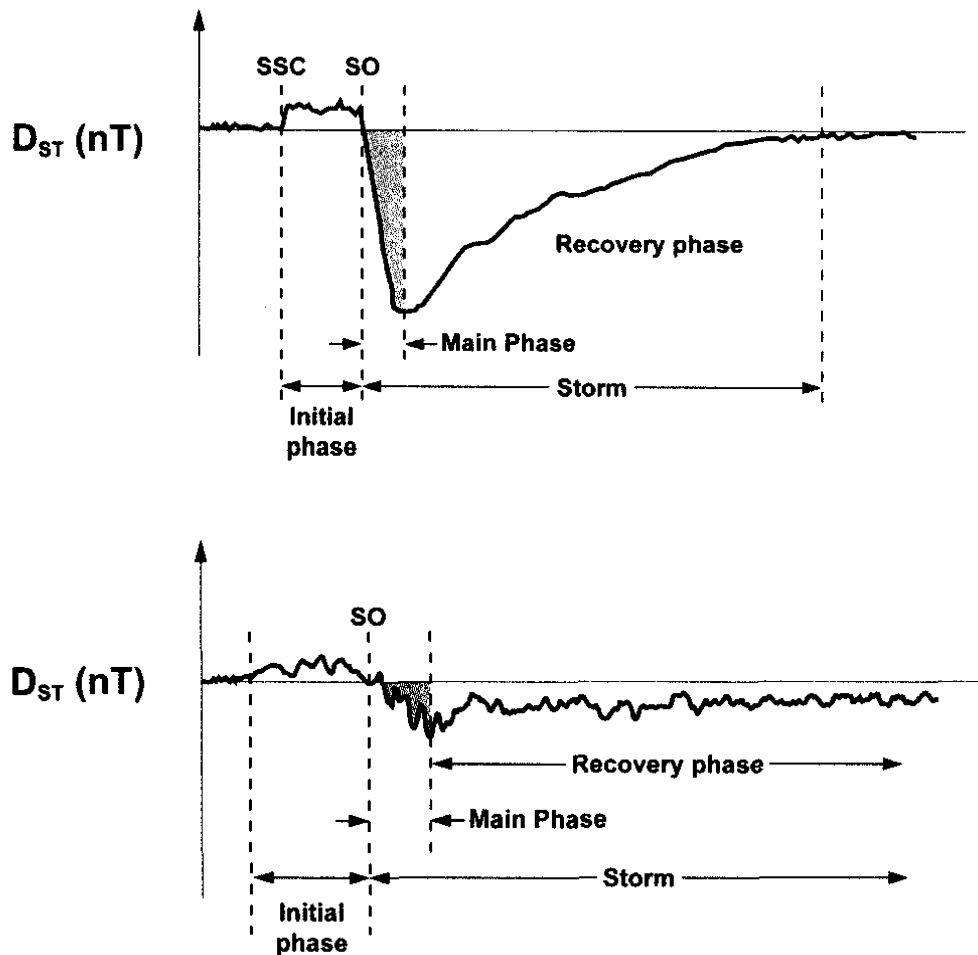
**Πίνακας 1.5** Πίνακας μετατροπής του δείκτη  $K_p$  στον γραμμικό δείκτη  $ap$ .

<b><math>K_p</math></b>	0	$0^+$	$1^-$	$1^0$	$1^+$	$2^-$	$2^0$	$2^+$	$3^-$	$3^0$	$3^+$	$4^-$	$4^0$	$4^+$
<b><math>ap</math></b>	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
<b><math>K_p</math></b>	$5^-$	$5^0$	$5^+$	$6^-$	$6^0$	$6^+$	$7^-$	$7^0$	$7^+$	$8^-$	$8^0$	$8^+$	$9^-$	$9^0$
<b><math>ap</math></b>	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

### 1.7.2 Γεωμαγνητικός δείκτης $Dst$

Η ανάπτυξη μίας καταιγίδας ορίζεται καλύτερα στα μεσαία πλάτη από τον δείκτη  $Dst$  (Disturbance storm time -  $Dst$  index). Ο δείκτης αυτός εξάγεται από τα μαγνητογράμματα των μέσου πλάτους και ισημερινών σταθμών (οι οποίοι, όμως, δεν είναι τόσο κοντά στην ισημερινή περιοχή για να μην επηρεάζονται από τα ηλεκτρικά μαγνητοσφαιρικά ρεύματα της περιοχής) και είναι η στιγμιαία παγκόσμια μέση τιμή της ισημερινής διαταραχής  $H$  (Kivelson & Russell, 1995). Σε αυτά τα γεωγραφικά πλάτη η οριζόντια και η κάθετη ένταση των γεωμαγνητικών διαταραχών

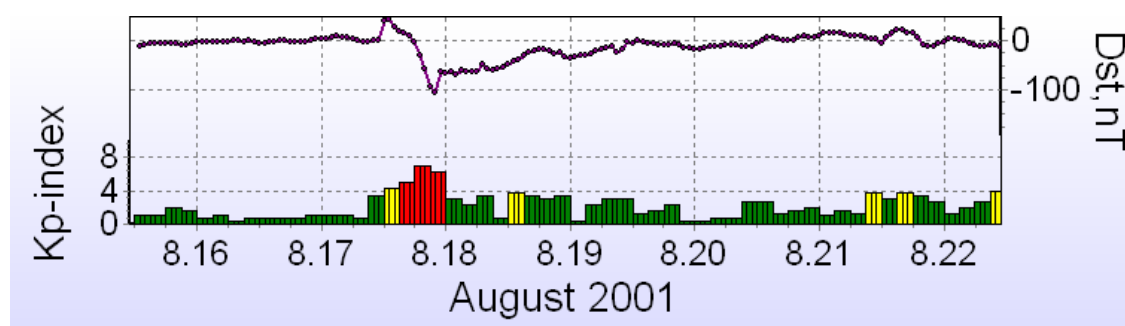
επηρεάζονται άμεσα από το δακτυλιοειδές μαγνητοσφαιρικό ρεύμα. Ο δείκτης Dst είναι ένα άμεσο μέτρο μέτρησης της ωριαίας μέσης τιμής αυτών των διαταραχών. Μεγάλες μειώσεις στη συνιστώσα  $H$  είναι ενδείξεις για την αύξηση της έντασης του δακτυλιοειδούς ρεύματος και εμφανίζονται σε χρονικές κλίμακες περίπου 1 ώρας. Η μείωση της έντασης αυτής μπορεί να διαρκέσει περισσότερο μέχρι και 1 ή 2 ημέρες.



Σχ. 1.24 Μεταβολή του γεωμαγνητικού δείκτη  $D_{ST}$  κατά τη διάρκεια μίας γεωμαγνητικής καταιγίδας στο ηλιακό μέγιστο (άνω διάγραμμα) και στην καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου (κάτω διάγραμμα) (Tsurutani, 2001).

Μία καταιγίδα ξεκινά από μία ξαφνική αύξηση του μαγνητικού πεδίου που διαρκεί μερικές ώρες. Ακολουθεί μία απότομη και μερικές φορές διαταραγμένη ελάττωση του  $D_{ST}$ , που αποτελεί την κύρια φάση. Στη συνέχεια ο  $D_{ST}$  αρχίζει μία απότομη, αρχικά, επαναφορά που ακολουθείται αργότερα από μία μακρά και αργή επαναφορά (Σχ. 1.24, άνω διάγραμμα). Για να προκύψει ο δείκτης  $D_{ST}$  σημειώνεται ο

αριθμός των σταθμών που κατέγραψαν την έναρξη της καταιγίδας και καταγράφονται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σταθμό. Έτσι προκύπτουν οι μέσες τιμές από όλους τους σταθμούς. Το μέσο αποτέλεσμα της χρονικής μεταβολής της καταιγίδας είναι η ελάττωση της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου. Έτσι ο Dst είναι γενικά αρνητικός και μεγάλες αρνητικές τιμές του σημαίνουν έντονη καταιγίδα (Σχ. 1.25). Γενικά για τιμές των  $Dst < -100\text{nT}$  και  $Kp > 5$  καταγράφεται γεωμαγνητική καταιγίδα (Daglis, 2001; Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 1.25 Μεταβολές των δεικτών  $Kp$  και  $Dst$  για το γεγονός στις 17 Αυγούστου 2001.

Η κατανομή των μεγεθών των καταιγίδων ακολουθεί νόμο δύναμης (Kivelson & Russell, 1995), δηλαδή καταιγίδες με δείκτη Dst μεταξύ  $-50\text{nT}$  και  $-150\text{nT}$  παρατηρούνται 1 φορά το μήνα. Διαταραχές με δείκτη Dst μεταξύ  $-150\text{nT}$  και  $-300\text{nT}$  καταγράφονται αρκετές φορές στη διάρκεια ενός έτους, ενώ μόνο μερικές διαταραχές με δείκτη Dst μεγαλύτερο από  $-500\text{nT}$  σημειώνονται στη διάρκεια ενός ολόκληρου ηλιακού κύκλου (Kallenrode, 1998).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

### ΜΕΙΩΣΕΙΣ FORBUSH

#### 2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική αναφορά στις βασικές έννοιες των κοσμικών ακτίνων, όπως επίσης και στις κυριότερες μεταβολές αυτών. Περιγράφονται αναλυτικά οι μειώσεις Forbush και αναφέρονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες αυτού του φαινομένου. Δίνονται λεπτομερείς περιγραφές των δύο προτύπων που σχετίζονται με τις μειώσεις Forbush. Τελικά, περιγράφεται η θεωρία των προειδοποιητικών σημάτων, παρέχονται σχετικά παραδείγματα από τη βιβλιογραφία και δίνεται η θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου.

#### 2.2 Κοσμικές ακτίνες

Ως κοσμικές ακτίνες (cosmic rays) ορίζονται τα σωματίδια υψηλών ενεργειών που προέρχονται από εξωγήινες πηγές. Ανάλογα με την προέλευσή τους οι κοσμικές ακτίνες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Hanslmeier, 2007):

- ❖ γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (galactic cosmic rays, GCRs),
- ❖ ηλιακές κοσμικές ακτίνες (solar cosmic rays, SCRs) και
- ❖ ανώμαλες κοσμικές ακτίνες (anomalous cosmic rays, ACRs).

Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες προέρχονται από άγνωστες πηγές εκτός του ηλιακού συστήματος, αποτελούνται από πρωτόνια, σωματίδια α (7% – 10%) και βαρύτερους πυρήνες (1%) (Baker, 1998) και η ροή τους στο ηλιακό σύστημα καθορίζεται από την ηλιακή δραστηριότητα (Usoskin & Mursula, 2001; Daglis, 2001). Αυτό συμβαίνει γιατί η έντονη ηλιακή δραστηριότητα δρα σαν ασπίδα η οποία προστατεύει τη Γη από αυτά (Usoskin & Mursula, 2001).

Οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες (solar energetic particles – SEPs) προέρχονται από τις ηλιακές εκλάμψεις (Miroshnichenko, 2001) και τις στεμματικές εκτινάξεις

μάζας (Daglis, 2001) και αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια (>89%), σωματία α (10%) και βαρύτερους πυρήνες (<1%). Πρόκειται για σωματίδια με τυπικές τιμές ενέργειας μερικές εκατοντάδες MeV/νουκλεόνιο που κάποιες φορές φτάνει τα GeV/νουκλεόνιο (Usoskin & Mursula, 2001; Daglis, 2001). Παρατηρείται, επίσης, έντονη εξάρτηση από την ηλιακή δραστηριότητα, αφού στο μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας και κατά την καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου καταγράφονται μεγαλύτερες ροές σωματιδίων χαμηλής ενέργειας (Daglis, 2001). Ορίζονται τα γεγονότα αύξησης της ροής των ηλιακών κοσμικών ακτίνων στον διαπλανητικό χώρο κοντά στη Γη, τα οποία σχετίζονται με την ύπαρξη σχετικιστικών σωματίων ηλιακής προέλευσης ως ‘γεγονότα ηλιακών σωματίων’ (Solar Particle Events - SPEs) ή πιο απλά ‘ηλιακά πρωτονικά γεγονότα’ (Solar Proton Events - SPEs), λόγω του ότι το πρωταρχικό συστατικό των πληθυσμών αυτών είναι τα πρωτόνια (Πλαϊνάκη, 2007).

Τέλος, οι ανώμαλες κοσμικές ακτίνες προέρχονται από τον μεσοαστρικό χώρο πέρα από την ηλιόπαυση και η σύστασή τους διαφέρει αρκετά από αυτή των γαλαξιακών και των ηλιακών κοσμικών ακτίνων, αφού έχουν περισσότερο ήλιο από ότι πρωτόνια και πολύ περισσότερο οξυγόνο από ότι άνθρακα (Usoskin & Mursula, 2001).

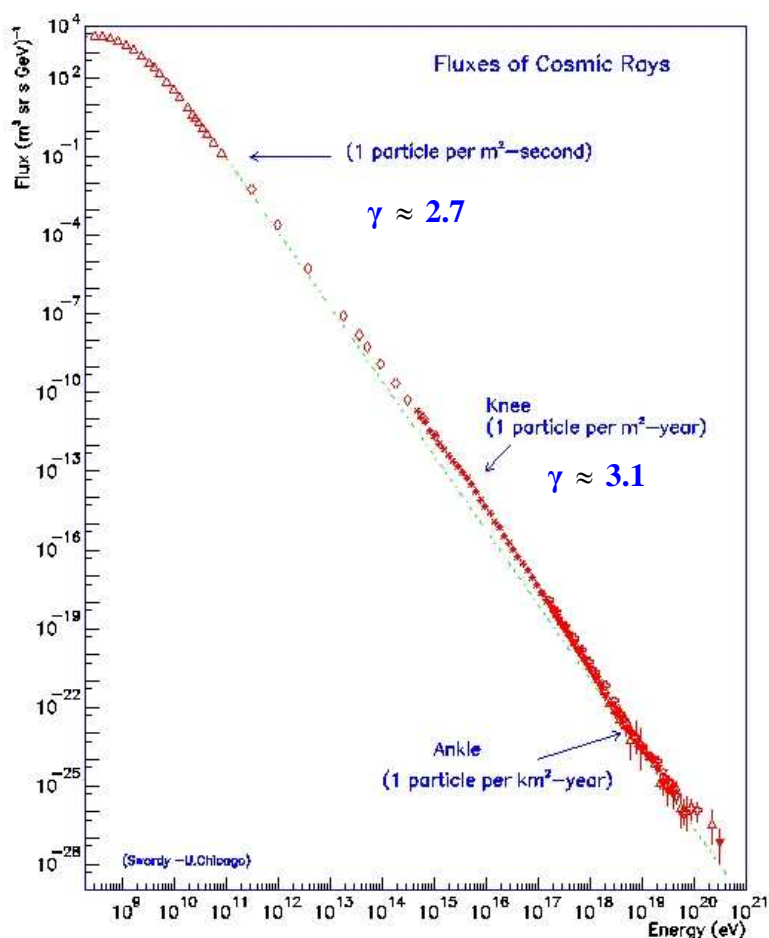
Το μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων που ανιχνεύεται στη Γη είναι γαλαξιακής προέλευσης γιατί τα μικρής ενέργειας σωματίδια, όπως αυτά που προέρχονται από τον Ήλιο, απορροφώνται από την ατμόσφαιρα και το γεωμαγνητικό πεδίο (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Η σχέση που εκφράζει τη μεταβολή της έντασης  $J(> E)$  των κοσμικών ακτίνων (αριθμός σωματιδίων που περνούν ανά μονάδα επιφάνειας) συναρτήσει της ενέργειας δίνει το διαφορικό ενεργειακό φάσμα (differential energy spectrum). Αυτό ακολουθεί την εκθετική κατανομή της μορφής (Usoskin & Mursula, 2001):

$$J(E) \propto E^{-\gamma} \quad (2.1)$$

όπου η ένταση  $J(E)$  μετριέται σε  $cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}GeV^{-1}$  και  $\gamma$  σταθερά. Συγκεκριμένα το  $\gamma$  είναι ο φασματικός δείκτης (spectral index) και η τιμή του μεταβάλλεται καθώς

μεταβάλλονται οι ενέργειες των κοσμικών ακτίνων από  $10^9$  eV έως  $10^{20}$  eV (Usoskin & Mursula, 2001; Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 2.1 Διαφορικό φάσμα πρωτογενών κοσμικών ακτίνων. Η μικρή αλλά σημαντική μεταβολή που υπάρχει στην κλίση στην περιοχή  $3 \cdot 10^{15}$  eV (γόνατο) και  $10^{20}$  eV (αστράγαλος) οφείλεται πιθανώς στη φύση των κοσμικών ακτίνων (Usoskin & Mursula, 2001).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 σχετικά με το φάσμα των κοσμικών ακτίνων αξίζει να σημειωθούν τα παρακάτω (Usoskin & Mursula, 2001; <http://www.nmdb.eu>):

- ❖ Οι κοσμικές ακτίνες με ενέργειες έως μερικά GeV προέρχονται από τον Ήλιο και άλλες πηγές στον Γαλαξία. Η ροή των σωματιδίων ενέργειας κάτω των 50 GeV εξαρτάται από την αλληλεπίδραση και τη διάχυση των σωματιδίων αυτών από τον ηλιακό άνεμο. Το φάσμα σε αυτή την περιοχή παρουσιάζει μία καμπή γιατί η

είσοδος της κοσμικής ακτινοβολίας στο ηλιακό σύστημα εμποδίζεται από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

- ❖ Στην περιοχή από  $10^{10}$  eV έως  $10^{15}$  eV, ο φασματικός δείκτης  $\gamma$  παίρνει την τιμή  $\approx 2.7$ .
- ❖ Στην περιοχή από  $10^{15}$  eV έως  $10^{20}$  eV ο φασματικός δείκτης  $\gamma$  παίρνει την τιμή  $\approx 3.1$ . Στην περιοχή  $3 \cdot 10^{15}$  eV παρατηρείται μία μικρή αλλά σημαντική μεταβολή, δηλαδή παρουσιάζεται ένα ‘σπάσιμο’ και το φάσμα γίνεται πιο απότομο. Η περιοχή αυτή καλείται γόνατο (knee).
- ❖ Υπάρχουν ενδείξεις ότι το φάσμα γίνεται σχεδόν οριζόντιο πάλι στην περιοχή των  $10^{20}$  eV, η οποία λέγεται αστράγαλος (ankle).

Οι παραπάνω μεταβολές οφείλονται σε δύο διαφορετικές πηγές των κοσμικών ακτίνων, μία γαλαξιακή και μία εξωγαλαξιακή, που περνάει η μία μέσα από την άλω και η άλλη μέσα από τον δίσκο του Γαλαξία και παρουσιάζουν διαφορετικά φάσματα (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

### 2.3 Μεταβολές κοσμικών ακτίνων

Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η κοσμική ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλη ισοτροπία και σταθερότητα σε γαλαξιακή κλίμακα (Usoskin & Mursula, 2001). Όμως, στην πορεία της προς τη Γη επιδρούν σε αυτήν ο Ήλιος και ο διαπλανητικός χώρος, ακόμα και σε ηλιοκεντρικές αποστάσεις περίπου 10 AU. Ως αποτέλεσμα τόσο το ενεργειακό φάσμα όσο και η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζουν ανισοτροπίες και μεταβολές (Rao et al., 1971; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, οι οποίες είναι ‘εξωγήινης’ προέλευσης, δηλαδή οι μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας εκτός της μαγνητόσφαιρας της Γης, δίνονται ενδεικτικά στον Πίνακα 2.1 (Usoskin & Mursula, 2001) και στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι πιο σημαντικές.

Οι μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας συναρτήσει του χώρου, του χρόνου και της ενέργειας ονομάζονται διαμόρφωση (solar modulation) αυτής (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Προκειμένου να μελετηθούν αυτές οι μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις από επίγειους σταθμούς. Έτσι η Γη μπορεί να θεωρηθεί σαν διαστημόπλοιο, το οποίο καθώς περιστρέφεται περί τον εαυτό του μεταφέρει και τους επίγειους μετρητές. Ο συνδυασμός της ατμόσφαιρας, όπου γίνεται η ανάμιξη των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων και του γήινου μαγνητικού πεδίου, με τους επίγειους μετρητές παρέχει ένα οπτικό σύστημα με πολλές συνιστώσες (Μαυρομαχάκη, 2005). Επιπλέον, επειδή η κύρια αιτία των ανισοτροπιών είναι οι αντιδράσεις των σωματιών με το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, σημαντικό χαρακτηριστικό κάθε διαδικασίας διαμόρφωσης είναι η εξάρτησή της από τη μαγνητική δυσκαμψία (βλ. Κεφ. IV § 4.2).

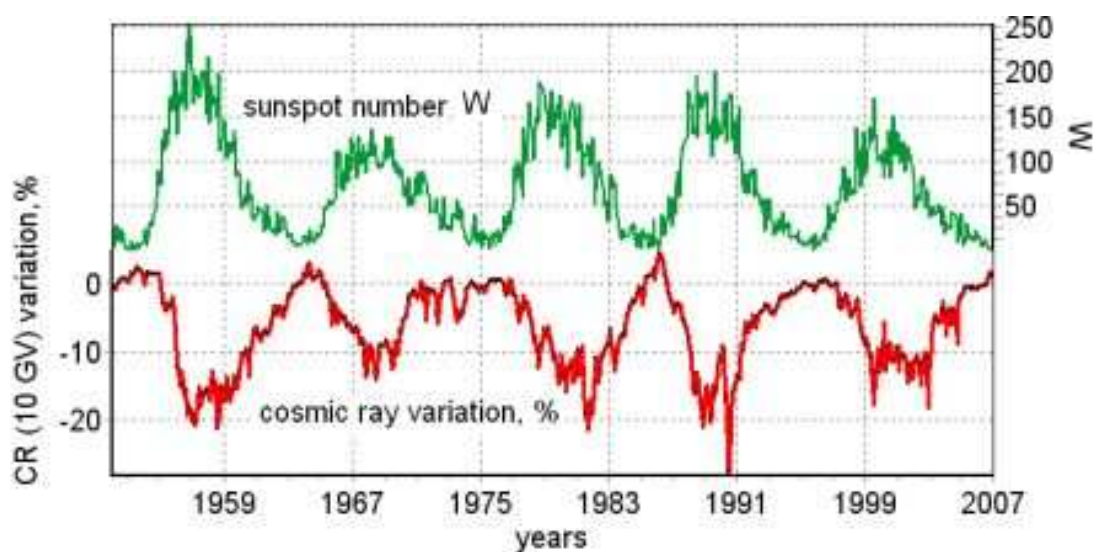
*Πίνακας 2.1* Μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ‘εξωγήινης’ προέλευσης (Usoskin & Mursula, 2001).

Τύπος	Πλάτος μεταβολής	Φύση μεταβολής
<b>Περιοδικές μεταβολές</b>		
<b>11ετής και 22ετής κύκλος</b>	έως 30%	Ηλιακή διαμόρφωση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στην ηλιόσφαιρα
<b>27ήμερη μεταβολή</b>	< 2%	Μακράς διάρκειας ασυμμετρία στη δομή του ηλιακού ανέμου
<b>Ημερήσια μεταβολή</b>	μερικά %	Τοπική ανισοτροπία στη ροή των κοσμικών ακτίνων λόγω διάδοσης από τον ηλιακό άνεμο και διάχυσης κατά μήκος των γραμμών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου
<b>Σποραδικές μεταβολές</b>		
<b>GLE</b>	1 – 300%	Αύξηση της έντασης των κοσμικών ακτίνων λόγω της άφιξης των ηλιακών κοσμικών ακτίνων
<b>Μείωση Forbush</b>	έως 30%	Μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων λόγω της θωράκισης από ένα διαπλανητικό κρουστικό κύμα που περνά από τη Γη
<b>Μαγνητοσφαιρικό γεγονός</b>	μερικά %	Μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων λόγω της θωράκισης από ένα μαγνητικό νέφος που περνά από τη Γη
<b>Προ-αυξήσεις των μειώσεων Forbush</b>	< 2%	Αύξηση της έντασης των κοσμικών ακτίνων λόγω της ‘συγκέντρωσης’ σωματιδίων μπροστά από τη μείωση Forbush, που δημιουργεί το διαπλανητικό κρουστικό κύμα

Οι υπό μελέτη μεταβολές διακρίνονται σε ισότροπες (11ετής κύκλος, μειώσεις Forbush, 27ήμερη μεταβολή) και ανισότροπες (ημερήσια μεταβολή, ημιημερήσια μεταβολή, μικρής κλίμακας μεταβολές). Παρακάτω θα περιγραφούν πιο αναλυτικά ο 11ετής κύκλος, οι μειώσεις Forbush, οι επίγειες επαυξήσεις και η ημερήσια μεταβολή.

#### α) Μακρόχρονη διαμόρφωση (11ετής κύκλος)

Το 1958 ο Forbush έδειξε ότι η κοσμική ακτινοβολία βρίσκεται σε αρνητική συσχέτιση με τη δραστηριότητα του Ήλιου (Toptygin, 1985; Kallenrode, 1998) με χρονική υστέρηση αρκετών μηνών (Σχ. 2.2), αν ληφθεί σαν μέτρο της ηλιακής δραστηριότητας ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων, ή 1 – 2 μηνών αν συγκριθεί με τη γραμμή εκπομπής του ηλιακού στέμματος στα  $5303 \text{ \AA}$  (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 2.2 Η αρνητική συσχέτιση ηλιακής δραστηριότητας και κοσμικής ακτινοβολίας (<http://www.nmdb.eu>).

Υπεύθυνη για την ηλιακή διαμόρφωση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων είναι η διάδοση των ενεργητικών σωματιδίων στο δυναμικό περιβάλλον της ηλιόσφαιρας. Σε περιόδους με αυξημένη δραστηριότητα, για παράδειγμα όταν ο αριθμός των κηλίδων, αλλά επίσης και των εκλάμψεων και των CMEs είναι αυξημένος, το μαγνητικό πεδίο στην ηλιόσφαιρα είναι ιδιαίτερος μεταβαλλόμενο

(<http://www.nmdb.eu>). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας οφείλεται σε μεταβολές της δομής του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Kallenrode, 1998), αφού όταν το μαγνητικό πεδίο, που φέρεται παγωμένο μέσα στο πλάσμα, είναι ισχυρότερο, ο μαγνητικός θώρακας της ηλιόσφαιρας γίνεται λιγότερο διαπερατός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όσο η ηλιόσφαιρα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση τόσο λιγότερα σωματίδια να μπορούν να φθάσουν στην περιοχή της Γης (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Αποτέλεσμα των ισχυρών διαταραχών του μαγνητικού πεδίου είναι όχι μόνο η ελάττωση του αριθμού των κοσμικών ακτίνων που φτάνουν στην ηλιόσφαιρα και τη Γη, αλλά επίσης και η μεταβολή του ενεργειακού τους φάσματος (αφού τα σωματίδια χαμηλότερων ενεργειών επηρεάζονται πολύ περισσότερο από αυτά με υψηλότερες ενέργειες) αλλά και της κατεύθυνσης διάδοσής τους (ανισοτροπία) (<http://www.nmdb.eu>).

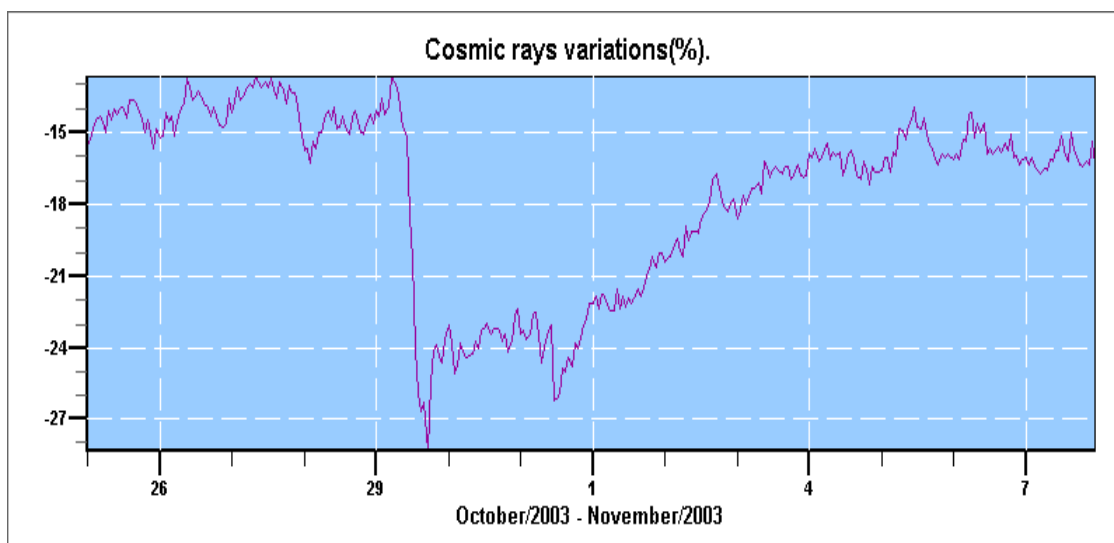
Πέρα από τα παραπάνω πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι υπάρχει και 22ετής κύκλος της ηλιακής δραστηριότητας (Hale cycle), που οφείλεται στην αλλαγή της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου κάθε 22 χρόνια. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εμφανίζονται διαφορές ανάμεσα στους άρτιους και περιττούς ηλιακούς κύκλους (βλ. Κεφ. V § 5.1). Η χρονική εξέλιξη της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη είναι διαφορετική σε δύο συνεχόμενους κύκλους δραστηριότητας.

## **β) Μειώσεις Forbush**

Μία από τις πιο σημαντικές μεταβολές των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων είναι οι μειώσεις Forbush (Forbush decreases, FDs) ή πιο γενικά τα φαινόμενα Forbush (Forbush effects, FEs), όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.

Μειώσεις στο ρυθμό καταγραφής των κοσμικών ακτίνων, οι οποίες διαρκούν περίπου μία εβδομάδα, παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά από τον Forbush το 1937 (Forbush, 1937; 1938) και τους Hess και Demmelmair (1937) χρησιμοποιώντας θαλάμους ιονισμού (Kane, 2010). Συγκεκριμένα ο Forbush (1938) χρησιμοποίησε μετρήσεις 17 συνεχόμενων μηνών από θαλάμους ιονισμού, οι οποίοι ήταν κατανομημένοι ανά τη Γη, για να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι αυτές οι μεταβολές

στην ένταση που παρατηρούνταν στους σταθμούς όλου του κόσμου συνδέονταν μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα έδειχναν ότι παρατηρείται μία σημαντική αύξηση σε μεγαλύτερα ύψη για γεωγραφικά πλάτη από  $0^{\circ}$  –  $30^{\circ}$  N ενώ οι διαφορές για πλάτη  $30^{\circ}$  –  $47^{\circ}$  N ήταν μικρές. Επιπλέον, αυτές οι μεταβολές της έντασης συναρτήσει του χρόνου δεν είχαν εξάρτηση από ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Αρχικά είχε υποθεθεί ότι οι μεταβολές αυτές ήταν αποτέλεσμα, άμεσο ή έμμεσο, γεωμαγνητικών μεταβολών, όπως διαταραχές του γεωμαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια γεωμαγνητικών καταιγίδων. Γι' αυτό θεωρήθηκε ότι η προέλευσή τους ήταν γήινη (Lockwood, 1971).



Σχ. 2.3 Απεικόνιση της μείωσης Forbush της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2003, όπως καταγράφηκε από τον σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας, με πλάτος 21% (<http://cosray.phys.uoa.gr>).

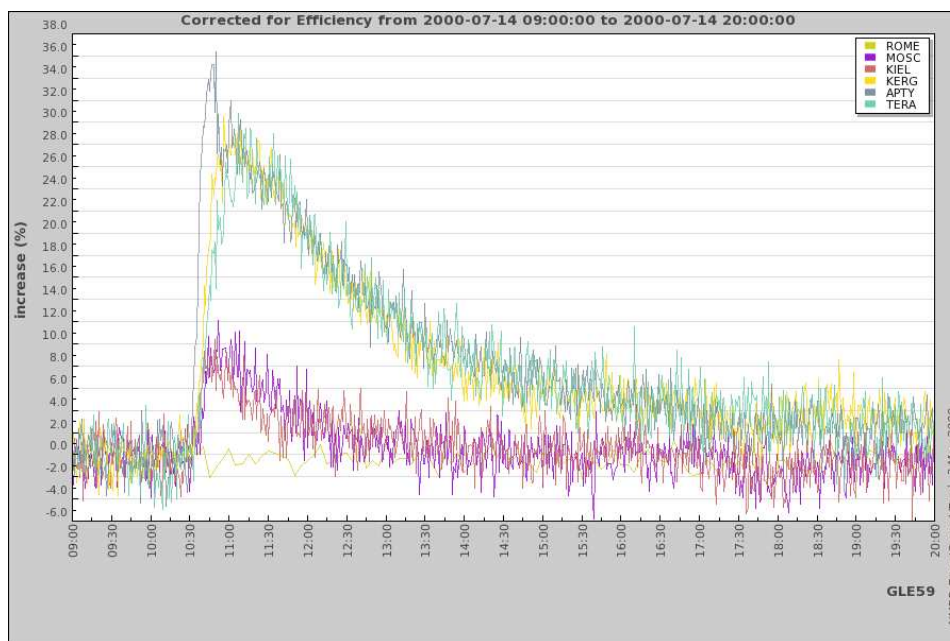
Παρατηρήσεις που έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του 1950 κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτές οι χρονικές μεταβολές δεν οφείλονταν μόνο σε μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου (Kane, 2010). Συγκεκριμένα ο Singer (1954; 1958), ο Simpson (1951; 1954) και οι Simpson et al. (1953) παρατήρησαν μειώσεις στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας στον γεωμαγνητικό πόλο. Ο Simpson (1954) συνέχισε τη λεπτομερή έρευνα του χρησιμοποιώντας μετρητές νετρονίων ώστε να μελετήσει τις μεταβολές έντασης – χρόνου σε τμήμα του φάσματος πρωτογενών σωματιδίων χαμηλότερης ενέργειας και έδειξε τελικά ότι η πηγή αυτών των μειώσεων δεν ήταν οι μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου (Lockwood, 1971) αλλά βρισκόταν στο διαπλανητικό μέσο (Cane, 2000) και συγκεκριμένα σχετιζόταν με τα φαινόμενα της ηλιακής δραστηριότητας (Lockwood, 1971). Αυτές οι πρώτες έρευνες μπορεί να

θεωρηθεί ότι έθεσαν τα θεμέλια για τη μετέπειτα ανάπτυξη του κλάδου της διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Από τότε μέχρι και σήμερα εκατοντάδες τέτοια γεγονότα έχουν παρατηρηθεί και αναλυθεί, ενώ ένας μεγάλος αριθμός δημοσιευμένων εργασιών επικεντρώνεται στη λεπτομερή μελέτη αυτού του φαινομένου. Μειώσεις Forbush αναλύονται και στη συγκεκριμένη εργασία, γι' αυτό και ο ορισμός, τα χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί που δημιουργούν αυτά τα φαινόμενα αναφέρονται αναλυτικότερα στην παράγραφο 2.4.

### γ) Επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας

Οι ανιχνευτές νετρονίων στη Γη ανιχνεύουν τη νουκλεονική συνιστώσα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας (βλ. Κεφ. III § 3.3). Η επιτάχυνση των πρωτονίων είναι άμεσα συνδεδεμένη χρονικά με εκλάμπεις και εκτινάξεις στεμματικού υλικού που συμβαίνουν στον Ήλιο. Ορίζονται ως επίγειες επαυξήσεις (ground level enhancements, GLEs) τα γεγονότα όπως αυτά, όπου ο Ήλιος επιταχύνει σωματίδια σε τέτοιες ενέργειες ώστε να είναι ανιχνεύσιμα από ανιχνευτές νετρονίων ή άλλους ανιχνευτές σωματιδίων στη Γη (Σχ. 2.4). Αυτά τα σωματίδια υψηλών ενεργειών αποτελούν και την ηλιακή κοσμική ακτινοβολία (<http://www.nmdb.eu>).

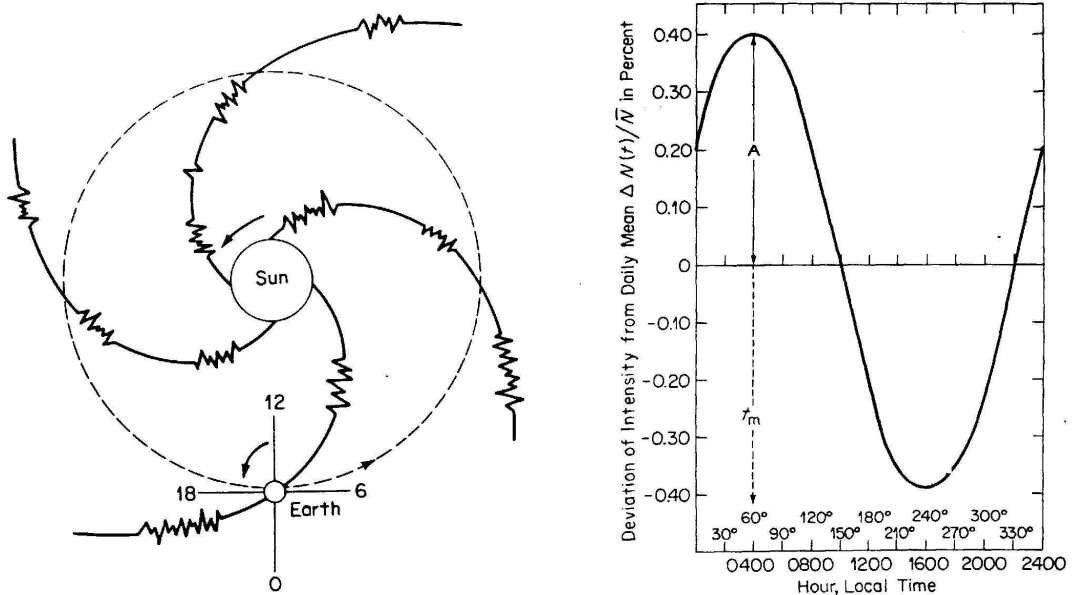


Σχ. 2.4 Απεικόνιση του GLE59 (<http://www.nmdb.eu>).

### δ) Ημερήσια ανισοτροπία

Η ύπαρξη ενός μεγίστου στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες έχει αναφερθεί ήδη από το 1938. Η ημερήσια ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων (solar diurnal anisotropy) έχει περίοδο 24 ώρες και είναι τοπικού χρόνου. Η ανισοτροπία έχει μεταβλητό χαρακτήρα και τα μέσα ετήσια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν εντυπωσιακή συσχέτιση με τον 11ετή κύκλο (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Το μέσο πλάτος της ημερήσιας ανισοτροπίας είναι 0.4% και μπορεί να φθάσει το 1.5%. Η μέγιστη ένταση σημειώνεται στη διεύθυνση 18:00 hr ως προς τη γραμμή Γης – Ήλιου (Σχ. 2.5, αριστερά). Καθώς το σπειροειδές μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο σαν ένα σώμα με αυτόν, αναταράσσει το αέριο των ισοτροπικών κοσμικών ακτίνων με μία ταχύτητα μερικών εκατοντάδων  $\text{km s}^{-1}$ . Η ταχύτητα αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα κίνησης της Γης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ένταση από τη διεύθυνση  $90^\circ$  Α της γραμμής Γης – Ήλιου να είναι αυξημένη (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 2.5 Μηχανισμός στον οποίο οφείλεται η ημερήσια ανισοτροπία (αριστερά) και 24ώρη μεταβολή της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας (δεξιά) (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Η καταγεγραμμένη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μέσα σε 24 ώρες για ένα σταθμό καταμέτρησης μπορεί να αναλυθεί από ένα κύμα (Σχ. 2.5, δεξιά). Πρόκειται, επομένως, για την πρώτη αρμονική της ανάλυσης Fourier της καταγεγραμμένης έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Παριστάνεται με ένα άνυσμα μήκους ανάλογου προς το πλάτος και με διεύθυνση προς τη μέγιστη ένταση. Το διάνυσμα αυτό αναπαριστά ανισοτροπία χώρου (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

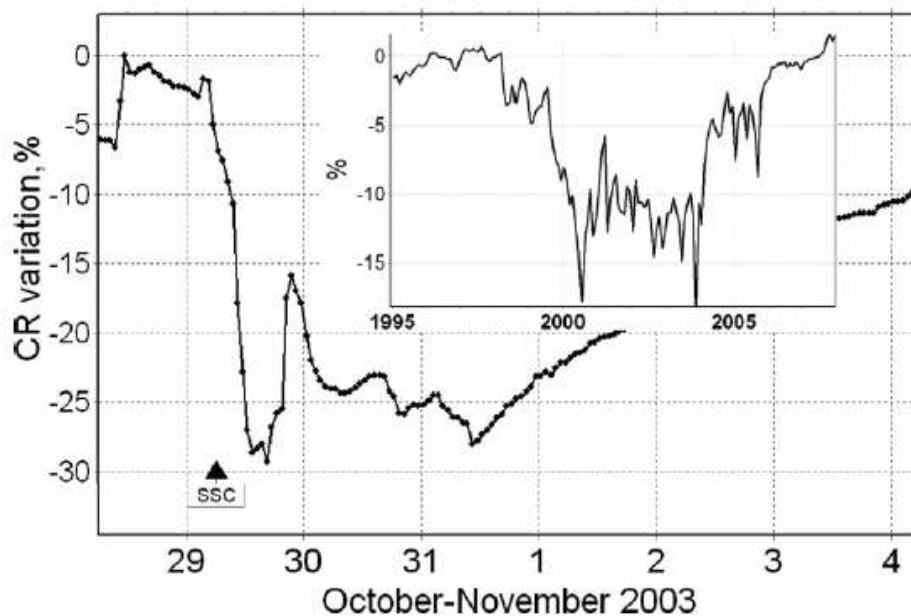
## 2.4 Μειώσεις Forbush

Σχετικά με τον ορισμό του φαινομένου Forbush το Glossary of Solar – Terrestrial terms NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov>) παρέχει την εξής ερμηνεία: *‘Πρόκειται για μία απότομη μεταβολή της τάξης του 10% στην ένταση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, όπως καταγράφεται από τους μετρητές νετρονίων’*. Ο συγκεκριμένος ορισμός, όμως, δεν είναι ακριβής, αφού μία μείωση Forbush δεν είναι απαραίτητως απότομη, αλλά τις περισσότερες φορές συμβαίνει σταδιακά και επίσης η μείωση είναι συνήθως τάξης μικρότερης του 10%. Επιπλέον τα φαινόμενα αυτά είναι δυνατόν να παρατηρηθούν όχι μόνο με τους μετρητές νετρονίων αλλά και με θαλάμους ιονισμού, με επίγεια ή υπόγεια τηλεσκόπια μιονίων, όπως επίσης και με άλλους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στη μελέτη των κοσμικών ακτίνων στο διάστημα (Belov, 2008).

Ουσιαστικά το φαινόμενο Forbush θα μπορούσε να οριστεί ως μία καταιγίδα κοσμικών ακτίνων (Belov, 2008). Κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου φαινομένου η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία διαμορφώνεται και το μέγεθος του πιο μεγάλου γεγονότος ίσως να ξεπερνά τη μεταβολή του 11ετούς κύκλου των κοσμικών ακτίνων. Όπως προκύπτει και από το παράδειγμα του σχήματος 2.6, η μεταβολή των κοσμικών ακτίνων για τον 23ο ηλιακό κύκλο δεν ξεπέρασε το 19%, ενώ για το γεγονός του Οκτωβρίου 2003 ήταν περίπου 28%. Επίσης, η ροή της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας γίνεται ανισοτροπική. Συνεπώς, το φαινόμενο Forbush είναι μία καταιγίδα στις κοσμικές ακτίνες αλλά και μία εκδήλωση ηλιοσφαιρικής καταιγίδας. Άρα το φαινόμενο Forbush θα μπορούσε να οριστεί ως: *‘Το αποτέλεσμα της επίδρασης των στεμματικών εκτινάξεων μάζας (CMEs και ICMEs) και/ή των ταχέως κινουμένων ρευμάτων ηλιακού ανέμου από τις στεμματικές οπές στις κοσμικές ακτίνες’* (Belov, 2008).

Από τη μελέτη των φαινομένων Forbush προκύπτει ότι υπάρχει μεγάλη ποικιλία τέτοιων γεγονότων. Συγκεκριμένα το μέγεθος και η διάρκεια του γεγονότος, η γρήγορη ή η σταδιακή μείωση, η πλήρης επαναφορά ή η απουσία επαναφοράς, η ολοκλήρωση σε ένα ή δύο βήματα, το απλό ή το περίπλοκο χρονικό προφίλ, κτλ είναι παράγοντες που μπορούν να διαφοροποιούνται από γεγονός σε γεγονός.

Συνήθως οι μεγάλες μειώσεις Forbush έχουν ταχύ ρυθμό μείωσης και αργή επαναφορά. Το μεγαλύτερο μέρος της φάσης της μείωσης ολοκληρώνεται σε περίπου 12 – 24 ώρες. Μάλιστα ο μέγιστος ρυθμός μείωσης σε ορισμένες στιγμές μπορεί να ξεπεράσει το 2% ανά ώρα για τους μετρητές νετρονίων που βρίσκονται στο επίπεδο της θάλασσας. Οι μειώσεις έχουν ένα χαρακτηριστικό σημείο έναρξης. Παρατηρούνται όμως και μικρότερης έντασης μειώσεις με πιο μεγάλο χρόνο έναρξης περίπου 2 ή 3 ημερών (Lockwood, 1971).

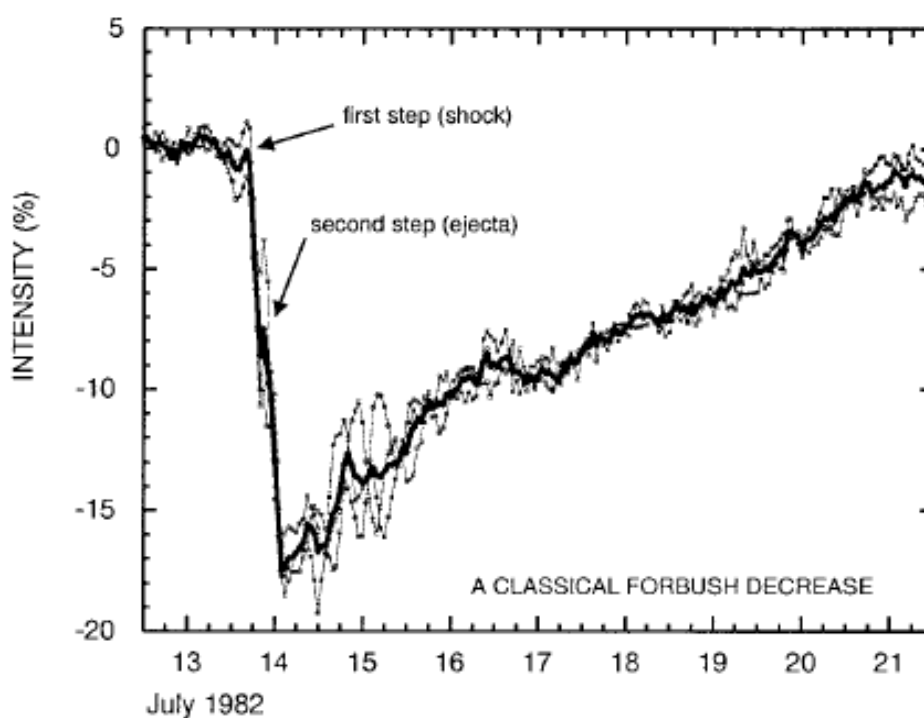


Σχ. 2.6 Μεταβολές της κοσμικής ακτινοβολίας των 10 GV για το μεγάλο γεγονός του Οκτωβρίου 2003 (ωριαίες τιμές) και τον 23ο ηλιακό κύκλο (μηνιαίες τιμές) (Belon, 2008).

Η ύπαρξη τόσο μεγάλης ποικιλίας φαινομένων Forbush αποδίδεται, κυρίως, σε τρεις λόγους: 1) την ποικιλία των ηλιακών πηγών και τον συνδυασμό τους, 2) τις διαφορετικές διαπλανητικές συνθήκες που επικρατούν πριν και κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος και 3) τη φύση των παρατηρήσεων (Belon, 2008).



Σχετικά με το τελευταίο πρέπει να τονιστεί ότι μία μείωση Forbush εξελίσσεται σε ένα μεγάλο όγκο και καταλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος της ηλιόσφαιρας. Πιο αναλυτικά, τα φορτισμένα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας εκτρέπονται προς τα έξω από το μαγνητικό πεδίο που φέρεται παγωμένο στον ηλιακό άνεμο και το οποίο θωρακίζει μαγνητικά τη Γη. Η εκτροπή είναι ανάλογη της εκπομπής ηλιακού πλάσματος (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Συνεπώς, η παρατήρηση του φαινομένου από ένα συγκεκριμένο σημείο της Γης δεν είναι πάντα πλήρης αφού το ίδιο γεγονός παρατηρούμενο από άλλο σημείο μπορεί να απεικονίζεται διαφορετικά (Belov, 2008). Μία σημαντική μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να εμφανιστεί και ως αύξηση (Belov et al., 1999).



Σχ. 2.7 Η % μείωση για τρεις σταθμούς μετρητών νετρονίων σε παρόμοια γεωγραφικά μήκη (Deep River, Mt. Wellington, Kerguelen). Διακρίνονται τα δύο βήματα της μείωσης. Η έντονη γραμμή δηλώνει τη μέση τιμή των μετρήσεων, η οποία είναι περίπου η ισοτροπική ένταση. Οι λεπτές γραμμές είναι οι αποκρίσεις των τριών σταθμών. Παρατηρείται η μεγάλη μεταβλητότητα μεταξύ των σταθμών (ανισοτροπία) για περίπου 1 ημέρα μετά το δεύτερο βήμα (Cane, 2000).

Στο σχήμα 2.7 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα μείωσης Forbush. Όπως φαίνεται η μείωση ολοκληρώνεται σε δύο βήματα. Το πρώτο εμφανίζεται στην τυρβώδη περιοχή του πεδίου που δημιουργείται πίσω από το μέτωπο κρούσης που

δημιουργεί η γρήγορη εκτίναξη μάζας (ejecta) στο μέσο μπροστά από αυτό. Μέσα στην εκτίναξη μάζας συμβαίνει επίσης και μία μείωση της πυκνότητας της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω της γεωμετρίας των κλειστών δυναμικών γραμμών (Cane, 2000; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

## 2.5 Τύποι των μειώσεων Forbush

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μειώσεων Forbush (Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2008; Kane, 2010):

### ❖ Μη περιοδικές/σποραδικές (non recurrent) μειώσεις

Πρόκειται για μειώσεις οι οποίες οφείλονται σε παροδικά διαπλανητικά γεγονότα που σχετίζονται με εκτοξεύσεις μάζας από τον Ήλιο (Toptygin, 1985; Cane, 2000; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Οι συγκεκριμένες μειώσεις χαρακτηρίζονται από ξαφνική έναρξη, φτάνουν στη μέγιστη μείωση μέσα σε περίπου 1 μέρα και η επαναφορά τους είναι σταδιακή (Cane, 2000).

### ❖ Περιοδικές (recurrent) μειώσεις

Πρόκειται για μειώσεις οι οποίες παρουσιάζουν μία πιο σταδιακή έναρξη, πιο συμμετρικό προφίλ και σχετίζονται με ταχέως συμπεριστροφόμενα ρεύματα του ηλιακού ανέμου (Iucci et al., 1979a; Toptygin, 1985).

Τα ταχέως συμπεριστροφόμενα ρεύματα του ηλιακού ανέμου μπορεί να είναι η κύρια αιτία για πολλές μειώσεις Forbush, αλλά αυτά τα φαινόμενα δεν είναι ποτέ πολύ μεγάλα. Ο αριθμός των φαινόμενων Forbush που οφείλονται σε στεμματικές οπές δεν ξεπερνά το 5%. Γενικά, όλες οι μειώσεις Forbush μεγάλης έντασης και η πλειοψηφία των μειώσεων Forbush μεσαίας και μικρής έντασης οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά σε CMEs. Όμως σε περιόδους όπου οι μεγάλες και αποτελεσματικές CMEs είναι σπάνιες, κυριαρχούν οι μειώσεις Forbush που οφείλονται σε στεμματικές οπές (Belov, 2008).

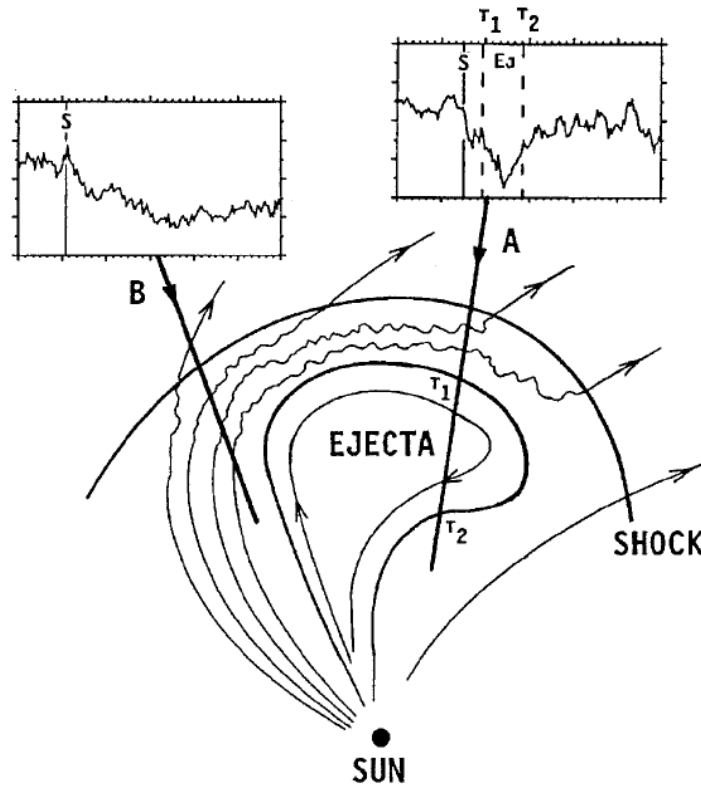
Υπάρχουν δύο διαφορετικοί φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν τις σποραδικές μειώσεις Forbush, το διαπλανητικό κρουστικό κύμα, εάν δημιουργηθεί και η διαπλανητική εκτίναξη μάζας (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Στο σχήμα 2.8

παρουσιάζεται η δομή μίας εκτίναξης μάζας και του σχετικού κρουστικού κύματος και η απόκριση της κοσμικής ακτινοβολίας. Για έναν παρατηρητή ο οποίος 'βρίσκεται στην πορεία' ενός κρουστικού κύματος και της σχετιζόμενης εκτίναξης μάζας η μείωση Forbush είναι δύο βημάτων (διαδρομή A). Μία λιγότερο ενεργητική εκτίναξη μάζας που δεν δημιουργεί κρουστικό κύμα θα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία μίας μείωσης μικρής διάρκειας και ενός βήματος τη στιγμή της διέλευσης της εκτίναξης. Τέτοια γεγονότα συνήθως είναι πολύ μικρά σε ένταση ώστε να παράξουν μία σημαντική μείωση που θα καταγραφεί από ένα μετρητή νετρονίων. Αφού τα κρουστικά κύματα έχουν κατά πλάτος μεγαλύτερη έκταση από την εκτίναξη μάζας, είναι πιθανόν ο παρατηρητής να αντιληφθεί μόνο το κρουστικό κύμα αλλά όχι την εκτίναξη μάζας, όπως φαίνεται στη διαδρομή B. Σε αυτή την περίπτωση, είναι εμφανής μόνο η επίδραση λόγω του κρουστικού κύματος. Η εκτίναξη μάζας σπρώχνει μακριά τον ηλιακό άνεμο που βρίσκεται μπροστά από το κρουστικό κύμα (upstream) συμπιέζοντας και θερμαίνοντας τον και οι δυναμικές γραμμές τυλίγονται γύρω από αυτήν. Έτσι εξηγείται η μακρά καθιερωμένη ασυμμετρία στα μεγέθη και την παρουσία των μειώσεων Forbush σαν συνάρτηση του μήκους του σχετιζόμενου ηλιακού γεγονότος (Haurwitz et al., 1965; Cane, 2000).

Συνεπώς, οι μειώσεις Forbush, οι οποίες σχετίζονται με CMEs, είναι τριών ειδών (Cane, 2000; Μαυρομιχαλάκη, 2005):

- ❖ αυτές που προκαλούνται από κρουστικό κύμα και εκτίναξη μάζας,
- ❖ αυτές που προκαλούνται μόνο από κρουστικό κύμα και
- ❖ αυτές που προκαλούνται μόνο από εκτίναξη μάζας

Η πλειοψηφία (>80%) των μικρής διάρκειας και μεγαλύτερων του 4% μειώσεων είναι των δύο βημάτων (κρουστικό κύμα και εκτίναξη μάζας) (Cane et al., 1996). Μόνο οι πολύ ενεργητικές CMEs μπορούν να δημιουργήσουν κρουστικά κύματα αρκετά ισχυρά ώστε να προκαλέσουν σημαντικές μειώσεις στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις το κρουστικό κύμα προκαλεί, επίσης και σημαντικές αυξήσεις ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων (solar energetic particles).



Σχ. 2.8 Η δομή μίας γρήγορης εκτίναξης μάζας και του σχετιζόμενου μετώπου κρούσης.

Ο ηλιακός άνεμος κινείται γύρω από την εκτίναξη μάζας και θερμαίνεται και συμπιέζεται στην περιοχή μπροστά από αυτήν. Δύο σημεία του συνόλου έχουν σημειωθεί με διαφορετικά προφίλ κοσμικής ακτινοβολίας. Η κάθετη γραμμή *S* δηλώνει τη χρονική στιγμή που καταγράφεται το μέτωπο κρούσης και με  $T_1$  και  $T_2$  έχουν σημειωθεί οι χρονικές στιγμές αρχής και τέλους του περάσματος της εκτίναξης μάζας. Μόνο αν η εκτίναξη μάζας εμποδιστεί θα παρατηρηθεί μείωση 2 βημάτων (Cane, 2000).

Τα ηλιακά ενεργητικά σωματίδια επιβεβαιώνουν ότι η μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας οφείλεται σε κρουστικό κύμα από CME και όχι από περιστρεφόμενο ρεύμα ηλιακού ανέμου (Cane, 2000). Αυτοί οι δύο τύποι μειώσεων, μειώσεις οι οποίες οφείλονται σε στεμματικές εκτίναξεις μάζας και μειώσεις οι οποίες δημιουργούνται από περιστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου, είναι παρόμοιοι, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού παρόμοιες είναι και οι τοπικές συνθήκες ηλιακού ανέμου. Παρ' όλα αυτά τα περιστρεφόμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου δεν παράγουν ανιχνεύσιμες επαυξήσεις σωματιδίων άνω των  $\sim 20 \text{ MeV amu}^{-1}$  σε απόσταση 1 AU. Αντιθέτως, οι ενεργητικές CMEs συνδέονται με ενεργητικά σωματίδια και μάλιστα η έναρξη του γεγονότος παρατηρείται περίπου μέσα σε μία ώρα από την εμφάνιση της

σχετικής έκλαμψης. Όταν κατά τη διάρκεια μίας μείωσης της κοσμικής ακτινοβολίας ενεργητικά σωματίδια ( $\geq 50$  MeV) είναι παρόντα τότε μία ηλιακή έκλαμψη συνόδευε την CME όταν έφευγε από τον Ήλιο. Όταν αυτά τα σωματίδια απουσιάζουν, η CME είναι λιγότερο ενεργητική και συνήθως σχετίζεται με εξαφάνιση προεξοχών (disappearing filament) και μία ασθενή έκλαμψη (Cane, 2000).

## 2.6 Ιδιότητες των μειώσεων Forbush

Τα κύρια χαρακτηριστικά (Cane, 2000) μίας μείωσης Forbush είναι τα εξής:

### ❖ Μέγεθος μειώσεων Forbush

Οι μεγαλύτερες μειώσεις Forbush έχουν μέγεθος 10 – 25%, όπως καταγράφεται από τους μετρητές νετρονίων. Λόγω της ύπαρξης ανισοτροπίας στα δεδομένα των μετρητών νετρονίων, το μέγεθος μίας μείωσης μπορεί να διαφέρει από σταθμό σε σταθμό. Επίσης, το μέγεθος θα είναι μικρότερο αν χρησιμοποιούνται ημερήσιες μέσες τιμές αντί για ωριαίες (Cane, 2000). Το μέγεθος της μείωσης εξαρτάται και από τη φάση του ηλιακού κύκλου (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

### ❖ Εξάρτηση από τη δυσκαμψία

Η εξάρτηση του πλάτους των μειώσεων Forbush από τη δυσκαμψία ( $R$ ) περιγράφεται από τη σχέση  $R^{-\gamma}$  όπου  $\gamma$  παίρνει τιμές από 0.4 – 1.2 (Cane, 2000). Αρκετοί επιστήμονες εξέτασαν αν η εξάρτηση των μειώσεων από τη δυσκαμψία αλλάζει ανάλογα με την πολικότητα του Ήλιου αλλά το αποτέλεσμα ήταν αρνητικό (Morishita et al., 1990).

### ❖ Προ-μείωση

Προηγείται μία μικρή μείωση (1 – 3%) της κύριας μείωσης που συμβαίνει 3 – 18 ημέρες πριν την κύρια φάση του γεγονότος και οφείλεται στο φαινόμενο του ‘κώνου απώλειας’ (loss cone) (Asipenka et al., 2009a; Μαυρομιχαλάκη, 2005; Kudela & Storini, 2006).

#### ❖ Προ-αύξηση

Σε πολλές μειώσεις παρατηρούνται προ-αυξήσεις (1 – 2%). Μία τέτοια προ-αύξηση οφείλεται σε ανάκλαση σωματιδίων από το κρουστικό κύμα ή επιτάχυνση στο κρουστικό κύμα (Tortygin, 1985; Kudela & Storini, 2006; Asipenka et al., 2009a).

#### ❖ Χαρακτηριστικά επαναφοράς

Σε μεμονωμένες μειώσεις ο χρόνος επαναφοράς είναι εκθετικός και κυμαίνεται από ~3 έως ~10 ημέρες με μέση τιμή ~5 ημέρες (Lockwood et al., 1986). Συγκεκριμένα η επαναφορά ακολουθεί την εκθετική μορφή:

$$\Delta I(t) = \Delta I_0 e^{-\frac{t}{r}} \quad (2.2)$$

όπου  $\Delta I(t)$  η μείωση σε χρόνο  $t$ ,  $\Delta I_0$  η μείωση σε χρόνο 0 και  $r$  σταθερά χρόνου επαναφοράς (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Ο χρόνος επαναφοράς συνδέεται με το μήκος της περιοχής της ηλιακής πηγής (Barnden, 1973a; Iucci et al., 1979b; Cane et al., 1994). Για φαινόμενα που προέρχονται από εκλάμψεις πλησίον του κεντρικού μεσημβρινού του Ήλιου ο χρόνος επαναφοράς είναι ταχύτερος. Υπάρχουν και φαινόμενα με χρόνο επαναφοράς  $r \rightarrow \infty$  (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

#### ❖ Ανισοτροπίες

Οι μειώσεις Forbush παρουσιάζουν ανισοτροπίες και μέσα αλλά και κάθετα στο εκλειπτικό επίπεδο, οι οποίες σχετίζονται με τη δομή του σχετιζόμενου ηλιακού ανέμου. Οι ανισοτροπίες, κυρίως, σημειώνονται κοντά στο πέρασμα κρουστικού κύματος και μέσα σε εκτόξευση υλικού (Cane, 2000).

#### ❖ Ηλιακές συσχετίσεις

Οι μεγάλες μειώσεις προκαλούνται από γρήγορες CMEs και τα σχετιζόμενα διαπλανητικά κρουστικά κύματα που μπορούν να σχετιστούν με συγκεκριμένες ηλιακές εκλάμψεις. Πρέπει να τονιστεί ότι, οι εκλάμψεις δεν παράγουν τις CMEs αλλά αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τον καθορισμό του ηλιογραφικού μήκους της CME και του κρουστικού κύματος που δημιουργούν τη μείωση.

### ❖ Συχνότητα εμφάνισης

Οι μειώσεις Forbush είναι πιο συχνές κοντά στο ηλιακό μέγιστο, αλλά μπορεί να συμβούν και καθ' όλη τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου. Παρατηρούνται λιγότερες από 10 μειώσεις μεγαλύτερες από 10% ανά κύκλο και συμβαίνουν κοντά στο μέγιστο των ηλιακών κηλίδων αλλά όχι τον χρόνο αμέσως μετά το ηλιακό μέγιστο (Cane et al., 1996). Υπάρχουν και οι μειώσεις εκ περιστροφής, δηλαδή μειώσεις που επαναλαμβάνονται μετά από 27 ημέρες (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι μειώσεις Forbush καταγράφονται μεγαλύτερες σε μέγεθος και διάρκεια στους σταθμούς που ανιχνεύουν σωματίδια μικρής ενέργειας (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

## 2.7 Μηχανισμός των μειώσεων Forbush

Τα διαφορετικά φυσικά μοντέλα που εξηγούν τη δημιουργία μίας μείωσης Forbush μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες: α) μοντέλα που βασίζονται κυρίως σε μη διαταραγμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στην περιοχή Γης – Ήλιου και β) μοντέλα που βασίζονται στα φαινόμενα που προκαλούν τα διαταραγμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία της ίδιας περιοχής. Ο Alfven και ο Dorman ήταν οι πρώτοι που απέδωσαν τη μείωση Forbush στις απώλειες ενέργειας που προκαλούνται από το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  που σχετίζεται με μία δέσμη ηλιακού πλάσματος. Ο Gold τροποποίησε ελαφρά αυτό το μοντέλο και εισήγαγε ένα μαγνητικό πεδίο που μοιάζει με 'μαγνητική φιάλη' μέσα στην οποία η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται. Ο Quenby επέκτεινε το μοντέλο του Gold και τόνισε ότι ένα τέτοιο μοντέλο είχε δυσκολία στο να διατηρήσει την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειωμένη για αρκετές εβδομάδες. Το μοντέλο ωστικού κύματος του Parker απέδωσε το φαινόμενο στη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που συμβαίνει πίσω από το μαγνητικό μέτωπο κρούσης που παράγεται συνήθως από ξαφνικές προς τα έξω εκρήξεις στο στέμμα, οι οποίες συνήθως ακολουθούν ηλιακές εκλάμψεις. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας έχουν υπολογισθεί λεπτομερώς και συμφωνούν με τις πειραματικές παρατηρήσεις (Lockwood, 1971).

Ο Morrison πρώτος πρότεινε ότι διαταραγμένα μαγνητικά νέφη που εκτοξεύονται από ηλιακές ενεργές περιοχές μπορούν να παράγουν τις παρατηρούμενες μειώσεις Forbush. Ο Parker επέκτεινε αυτό το μοντέλο και υπολόγισε τις μεταβολές της πυκνότητας των κοσμικών ακτίνων που προκύπτουν από ένα ταραχώδες νέφος αερίου που κινείται προς τα έξω. Οι Laster et al. (1962), χρησιμοποιώντας την ιδέα του ταραχώδους νέφους αερίου που κινείται από τον Ήλιο προς τα έξω, αξιολόγησαν τα αποτελέσματα της εξάπλωσης του στις κοσμικές ακτίνες που είχαν παγιδευτεί μέσα στο νέφος. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με την παρατηρούμενη χρονική εξάρτηση των μειώσεων Forbush (Lockwood, 1971).

### 2.7.1 Πρότυπο μαγνητικής φιάλης (Μοντέλο Alfvén – Dorman)

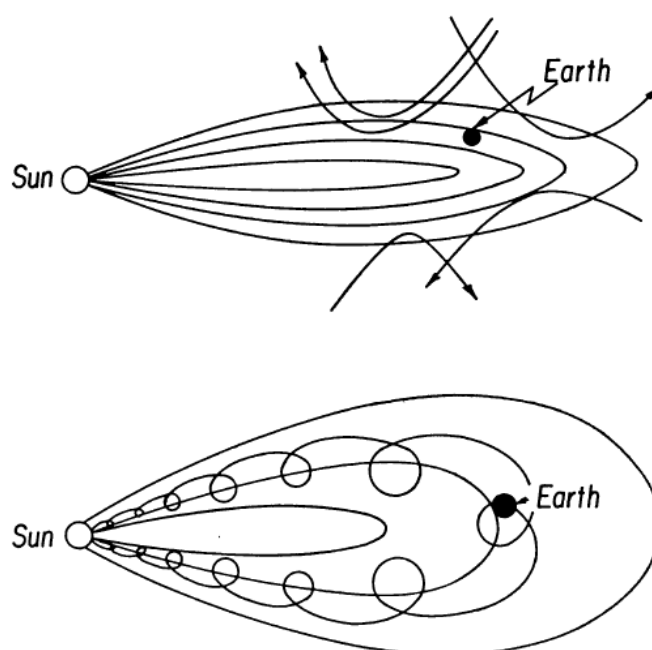
Δέσμη φορτισμένων σωματιδίων εκπέμπεται, συνήθως, από την περιοχή κοντά σε ομάδες μεγάλων ηλιακών κηλίδων. Αυτή η δέσμη πλάσματος φέρει παγωμένο το μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ένταση των κοσμικών ακτίνων στη Γη, όταν αυτή περιβάλλεται από τη δέσμη. Όπως προκύπτει από την ανάλυση των Dorman και Quenby, τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που κινούνται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο μπορούν να φθάσουν στη Γη, υποθέτοντας ότι βρίσκονται στο κέντρο της δέσμης, μόνο αν η δυσκαμψία τους είναι μεγαλύτερη από  $P_{\min} = \frac{300Bl}{4}$ , όπου  $l$  είναι η απόσταση κατά μήκος της δέσμης πλάσματος. Για σωματίδια με δυσκαμψίες λίγο μεγαλύτερες από αυτή την τιμή μόνο ορισμένες διευθύνσεις είναι επιτρεπτές. Το γεγονός ότι σωματίδια με τιμή δυσκαμψίας κοντά στο  $P_{\min}$  δεν μπορούν να φθάσουν στη Γη συνεισφέρει στη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη (Lockwood, 1971).

Σύμφωνα με τον Dorman η διαφορά μεταξύ των προφίλ της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο κατά τον οποίο η Γη βρίσκεται μέσα στη δέσμη του ηλιακού πλάσματος και στη διαφορά των ταχυτήτων του ηλιακού ανέμου που μεταφέρει παγωμένο το μαγνητικό πεδίο. Επειδή η Γη συνήθως δεν βρίσκεται στο κέντρο του ρεύματος, η μεταβολή της έντασης των κοσμικών ακτίνων εξαρτάται από την εκάστοτε μικρότερη απόσταση της Γης από το πλησιέστερο χείλος της δέσμης. Η



φύση του προφίλ της μείωσης Forbush θα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πώς αυτή η απόσταση μεταβάλλεται με τον χρόνο (Lockwood, 1971).

Μία μεταβολή στο μοντέλο της δέσμης του Dorman προτάθηκε από τον Gold. Ο σχηματισμός του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο καθορίζεται από το ηλιακό πεδίο που αρχικά παρουσιάζεται σε ορισμένες ενεργές περιοχές, είναι ένα δίπολο κοντά στη Γη (Σχ. 2.8).



Σχ. 2.8 Πρότυπο φιάλης του Gold (Lockwood, 1971).

Φαίνεται η εκτροπή γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και η παγίδευση ηλιακών σωματιδίων.

Έτσι, ενώ τα σωματίδια ηλιακής προέλευσης παγιδεύονται από τις δυναμικές γραμμές της γλώσσας, τα σωματίδια μικρής μαγνητικής δυσκαμψίας εμποδίζονται να εισέλθουν σε αυτή. Αν οι δυναμικές γραμμές ήταν τελείως κανονικές, σωματίδια μικρής ενέργειας δεν θα περνούσαν καθόλου στο εσωτερικό της φιάλης. Εξαιτίας, όμως, ανωμαλιών του πεδίου, σκεδάζονται και ως αποτέλεσμα μερικά από αυτά εισέρχονται (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Για μεγαλύτερες δυσκαμψίες η διπολική φύση του πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστούν η μέγιστη και η ελάχιστη δυσκαμψία άφιξης στη Γη. Από τη θεωρία Störmer αυτές προκύπτουν αντίστοιχα:

$$P_{\max} = \frac{300M}{R_e^2} \quad \text{και} \quad P_{\min} = \frac{1}{(\sqrt{2} + 1)^2} \frac{300M}{R_e^2} \quad (2.3)$$

όπου  $R_e$  η απόσταση της Γης από το κέντρο του διπόλου (Lockwood, 1971; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

### 2.7.2 Πρότυπο ωστικού κύματος (Μοντέλο Parker)

Ο Parker πρότεινε την παραγωγή ενός μαγνητικού κόμβου ή ‘ωστικού κύματος’ μέσω ενός κρουστικού κύματος ως μηχανισμό για τη μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων στη Γη κατά τη διάρκεια μειώσεων Forbush (Lockwood, 1971).

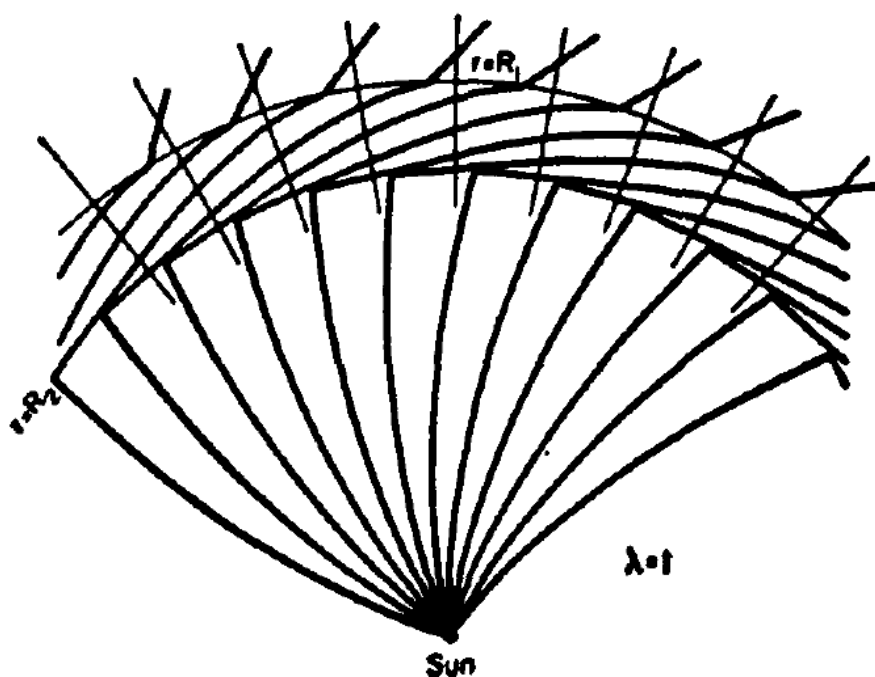
Μετά από μία μεγάλη ηλιακή έκλαμψη, κατά την οποία η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα σε σύντομο χρονικό διάστημα, παρατηρείται μία ξαφνική εκτόνωση του στέμματος. Ως αποτέλεσμα, η ξαφνική έκχυση του γρήγορου ηλιακού ανέμου σπρώχνει τον πιο αργό και σταθερό ηλιακό άνεμο μπροστά δημιουργώντας ένα ωστικό κύμα με ένα μέτωπο κρούσης, το οποίο διαδίδεται ακτινικά στον διαπλανητικό χώρο. Ο σχηματισμός αυτού του κρουστικού κύματος δίνεται στο σχήμα 2.9. Η αύξηση της αζιμουθιακής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου πίσω από το μέτωπο κρούσης δημιουργεί έναν κόμβο σε κάθε δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου. Ένα τόσο ισχυρό μαγνητικό πεδίο απαγορεύει την είσοδο κοσμικών ακτίνων στον χώρο που διογκώνεται πίσω από το κρουστικό κύμα. Πιο συγκεκριμένα, οι δυναμικές γραμμές είναι σχεδόν παράλληλες με την επιφάνεια του μετώπου. Κατά συνέπεια τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας δεν μπορούν να περάσουν κάθετα στις δυναμικές γραμμές και γι’ αυτό ανακλώνται, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της μείωσης Forbush (Lockwood, 1971; Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Το κανονικό σπειροειδές μαγνητικό πεδίο στον αργό ηλιακό άνεμο συμπιέζεται στο ωστικό κύμα κατά ένα παράγοντα 10. Ένα τόσο ισχυρό μαγνητικό πεδίο δεν επιτρέπει την είσοδο κοσμικών ακτίνων στην περιοχή πίσω από το κύμα. Με βάση αυτό το μοντέλο ο Parker υπολόγισε τον λόγο της πυκνότητας των

κοσμικών ακτίνων μέσα στη διογκούμενη περιοχή πίσω από το ωστικό κύμα προς την αντίστοιχη μπροστά από αυτό, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\eta'}{\eta} = 1 - \frac{4fV}{v} \quad (2.4)$$

όπου  $f$  είναι ο παράγοντας για τη συμπίεση του μαγνητικού πεδίου ή αλλιώς ο παράγοντας που απαγορεύει στις κοσμικές ακτίνες να εισέλθουν στην περιοχή πίσω από το μέτωπο κρούσης,  $V$  είναι η ταχύτητα του ωστικού κύματος και  $v$  η ταχύτητα των κοσμικών ακτίνων ( $\sim c$ ). Έτσι για  $f = 10$ ,  $V = 700 \text{ km s}^{-1}$  τότε  $\eta' = 9.90$ .



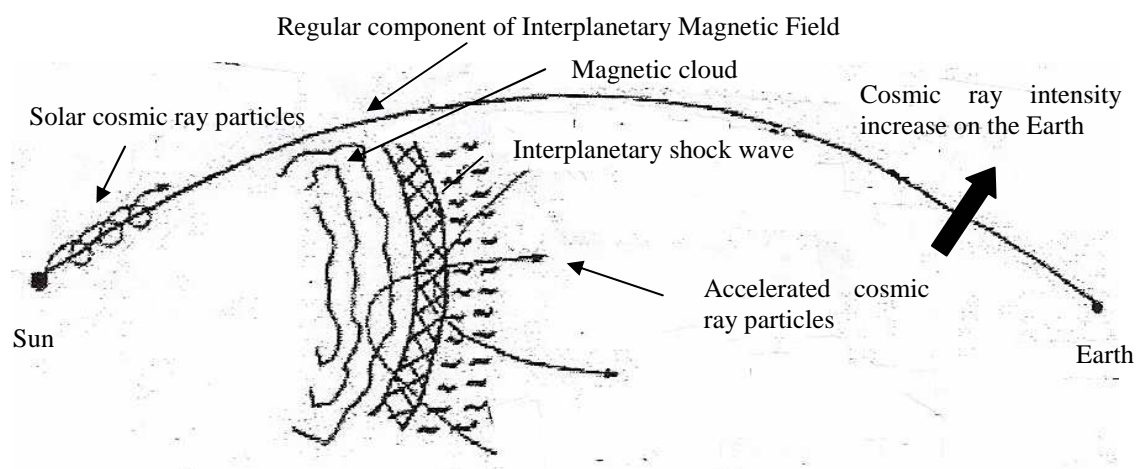
Σχ. 2.9 Μοντέλο Parker (Lockwood, 1971).

Παραμόρφωση του μέσου διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου από ωστικό κύμα για ακτίνα κρουστικού κύματος  $R_1 = \frac{v}{\Omega}$  ( $v$  η ταχύτητα πλάσματος και  $\Omega$  η ηλιακή γωνιακή ταχύτητα). Το

$R_1$  είναι 1 AU για ταχύτητα πλάσματος  $v = 440 \text{ km/s}$ . Η παράμετρος  $\lambda$  δίνει  $\frac{dR_2}{dt} = 4v$  για το πίσω μέρος του ωστικού κύματος.

## 2.8 Προειδοποιητικά σήματα μειώσεων Forbush

Οι μεταβολές των κοσμικών ακτίνων παρέχουν, μέσω των προειδοποιήσεων των μειώσεων Forbush, πληροφορίες σχετικά με τα απομακρυσμένα ηλιοσφαιρικά γεγονότα. Έχει ανακαλυφθεί (Fenton et al., 1959, Bloch et al., 1959) ότι μερικές φορές οι αλλαγές στη συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων ξεκινούν πολύ πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος ή της διαταραχής του ηλιακού ανέμου στη Γη (Papailiou et al., 2012b).



Σχ.2.10 Αναπαράσταση του φαινομένου των προ-αυξήσεων που παρατηρούνται κατά τις μειώσεις Forbush (προσαρμογή από Dorman, 2005).

Όπως είναι σήμερα γνωστό, η επίδραση ενός κρουστικού κύματος που πλησιάζει (precursor, προειδοποιητικό σήμα) είναι ένας περίπλοκος συνδυασμός προ-αυξήσεων (Σχ. 2.10) και προ-μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ο οποίος προϋποθέτει συγκεκριμένη γωνιακή κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που είναι δύσκολο να περιγραφεί από το άθροισμα των πρώτων σφαιρικών αρμονικών. Παρ' όλα αυτά η επίδραση αυτή μπορεί να αντανακλάται στις μεταβολές της μηδενικής ( $A_0$ ) και της πρώτης ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  και  $A_{xy}$ ) σφαιρικής αρμονικής (Belov, 2008; Asipenka et al., 2009c; Papailiou et al., 2013).

Όπως έχει αναφερθεί στον Belov et al. (2003) η παρατηρούμενη κατά μήκος κατανομή των μεταβολών των κοσμικών ακτίνων πριν την άφιξη του κρουστικού

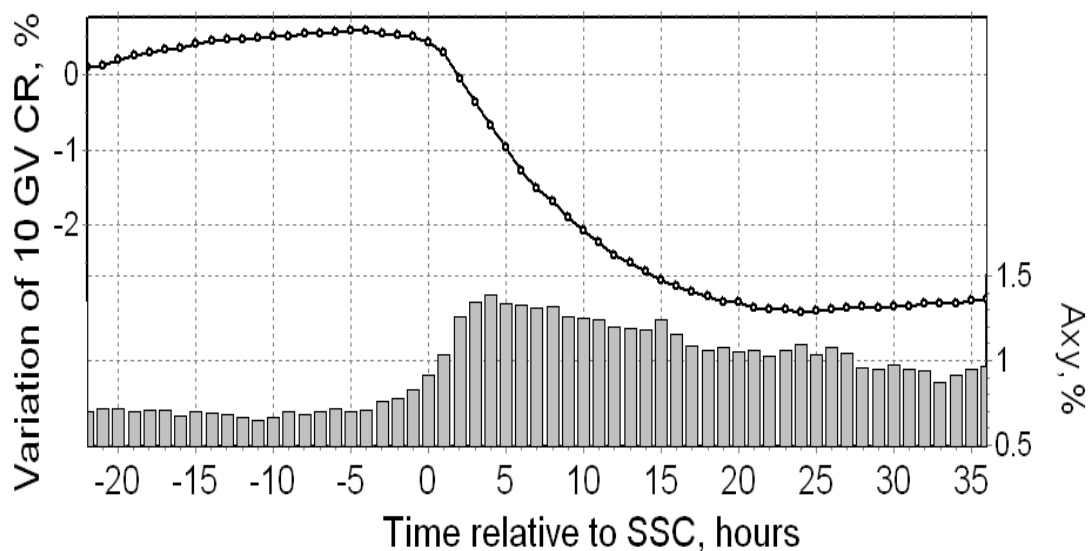
κύματος δεν μπορεί να περιγραφεί από μεταβολές των αρμονικών χαμηλότερης τάξης. Παρ' όλα αυτά είναι φανερό ότι αλλαγές αυτών των αρμονικών σε αυτό το χρονικό διάστημα πρέπει, επίσης, να παρατηρούνται. Σε μία πρόσφατη μελέτη οι Belov et al. (2008b) υπολόγισαν τη μέση τιμή της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας 332 παραδείγματα μειώσεων Forbush και έδειξαν ότι αυξάνεται πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος.

Οι μεταβολές στην ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων είναι δυνατόν να παρατηρηθούν, όχι μόνο ακριβώς πριν το κρουστικό κύμα, αλλά και πιο νωρίς, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Στο συγκεκριμένο σχήμα δίνονται οι μεταβολές της έντασης των κοσμικών ακτίνων και της συνιστώσας  $A_{xy}$  της ανισοτροπίας, όπως προκύπτουν από τη μέθοδο υπερεπίθεσης εποχών (βλ Κεφ. V § 7.4.5), ως προς τη χρονική στιγμή καταγραφής του SSC (Mavromichalaki et al., 2011). Μία ημέρα πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος στη Γη παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση της έντασης των κοσμικών ακτίνων (πρόκειται για τη φάση επαναφοράς μετά την προηγούμενη Forbush). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 12 ωρών πριν από την άφιξη του κρουστικού κύματος, ο ρυθμός αυτής της αύξησης επιβραδύνεται. Την αύξηση αυτή ακολουθεί μία μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων, η οποία παρατηρείται ξεκάθαρα περίπου 5 ώρες πριν το SSC. Κατά τη διάρκεια αυτής της ημέρας η τιμή της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  βρίσκεται κοντά στη μέση τιμή. Τις τελευταίες 5 – 7 ώρες παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση της  $A_{xy}$ , η οποία αυξάνεται σημαντικά κοντά στη χρονική στιγμή καταγραφής του SSC και παραμένει σε υψηλά επίπεδα και μετά από αυτή. Η ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων φτάνει στο μέγιστο 3 – 4 ώρες μετά το SSC (Belov et al., 2008b; Asipenka et al., 2009c).

Μπορεί να υποθεθεί ότι η επίδραση του κρουστικού κύματος στο μεγαλύτερο μέρος των κοσμικών ακτίνων είναι δυνατό να ανιχνευθεί σε απόσταση μίας ακτίνας Larmor  $\rho$  από το μέτωπο του κρουστικού κύματος. Στην προαναφερθείσα περίπτωση των 332 μειώσεων Forbush (Belov et al., 2008b) που σχετίζονταν με κρουστικό κύμα το μέσο μέτρο του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν  $5.1 \pm 0.1$  nT. Συνεπώς, για πρωτόνια δυσκαμψίας 10 GV η ακτίνα Larmor θα είναι  $\cong 0.043$  AU. Ένα κρουστικό κύμα με ταχύτητα  $500 \text{ km s}^{-1}$  θα κάλυπτε την απόσταση αυτή σε

περίπου 3.6 ώρες. Συνεπώς η χρήση της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων για τον προσδιορισμό της έλευσης κρουστικού κύματος μπορεί να αποδειχθεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο (Asipenka et al., 2009a).

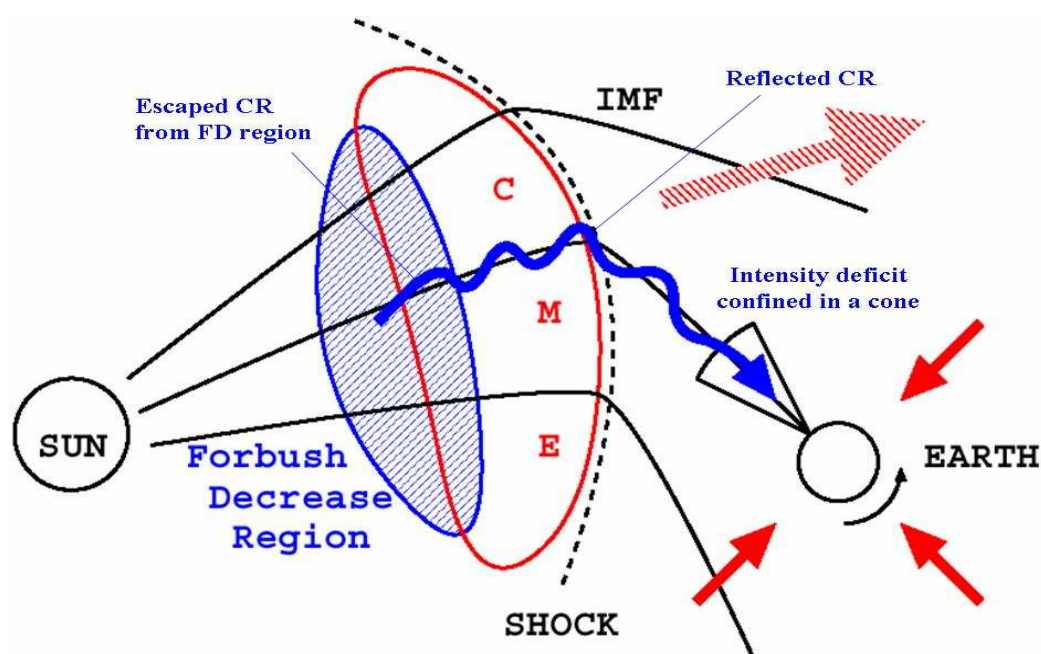
Παρ' ότι η επίδραση του κρουστικού κύματος που πλησιάζει έγινε αντιληπτή μέσω της μέσης συμπεριφοράς της ανισοτροπίας, ωστόσο η επίδραση αυτή είναι σχετικά μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush εμφανίζονται δύο τύποι προειδοποιητικών σημάτων, προ-μειώσεις και προ-αυξήσεις, ο συνδυασμός των οποίων δημιουργεί σχεδόν αντίθετα ανύσματα ανισοτροπίας που στο σύνολό τους μετριάζουν το τελικό καταμετρούμενο πλάτος τη δεδομένη χρονική στιγμή, π.χ. τη συγκεκριμένη ώρα (Belov et al., 2008b).



Σχ.2.11 Μεταβολές της έντασης των κοσμικών ακτίνων (σημεία) και του πλάτους της συνιστώσας  $A_{xy}$  της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας (στήλες) για τις χρονικές περιόδους πριν και μετά την έλευση κρουστικού κύματος, όπως αυτές υπολογίστηκαν σε 332 μειώσεις Forbush. Το 0 υποδηλώνει τον χρόνο καταγραφής του SSC (Belov et al., 2008b; Asipenka et al., 2009c; Mavromichalaki et al., 2011).

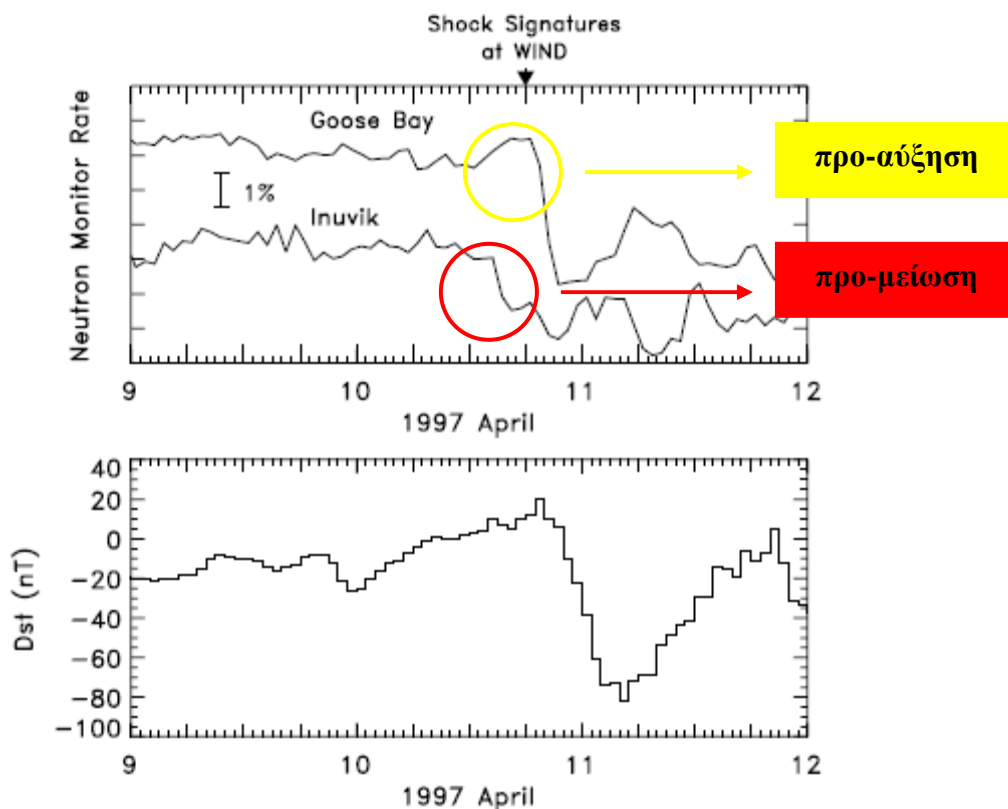
Οι προ-μειώσεις και προ-αυξήσεις μπορούν να εξηγηθούν ως κινηματικές αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων των κοσμικών ακτίνων με το κρουστικό κύμα που πλησιάζει (Ruffolo et al., 1999; Leerungnavarat et al., 2003; Asipenka et al., 2009a). Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.12, οι προ-μειώσεις οφείλονται στο

φαινόμενο του ‘κόνου απώλειας’, κατά το οποίο ο μετρητής νετρονίων συνδέεται μαγνητικά με την απεμπλουτισμένη σε κοσμικές ακτίνες περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα (Belov et al., 1995a; Dorman et al., 2003a; Leerunghnavarat et al., 2003). Από την άλλη, οι προ-αυξήσεις οφείλονται στην επιτάχυνση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων στο μέτωπο της προπορευόμενης διαταραχής, καθώς τα σωματίδια ανακλώνται από το κρουστικό κύμα που πλησιάζει (Belov et al., 1995a; Dorman et al., 1995; 2003).



Σχ. 2.12 Το φαινόμενο ‘κόνου απώλειας’ (Asipenka et al., 2009a).

Ένα σχετικό παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 2.13 στο οποίο απεικονίζονται οι παρατηρήσεις των μετρητών νετρονίων στους σταθμούς Goose Bay και Inuvik στον Καναδά τη χρονική περίοδο της CME του Απριλίου 1997, η οποία ήταν υπεύθυνη για γεωμαγνητική δραστηριότητα με τιμές για τους δείκτες Kp και Dst 7 και -100nT αντίστοιχα. Ο σταθμός του Goose Bay κατέγραψε μία προ-αύξηση 5 περίπου ώρες πριν ο WIND καταγράψει υλικό από το κρουστικό κύμα. Αντίθετα, ο σταθμός του Inuvik κατέγραψε μία προ-μείωση 3 περίπου ώρες πριν το κρουστικό κύμα (Ruffolo et al., 1999). Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής, ο σταθμός του Goose Bay κατέγραψε ανακλώμενα σωματίδια, ενώ ο σταθμός του Inuvik κατέγραψε σωματίδια που διαπερνούσαν από την περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα.



Σχ. 2.13 Τα προειδοποιητικά σήματα στις κοσμικές ακτίνες που σχετίζονται με τη CME του Απριλίου 1997 ήταν διαφορετικά στους δύο καναδικούς σταθμούς μετρητών νετρονίων. Ο σταθμός Goose Bay κατέγραψε μία προ-αύξηση λόγω της πιθανής ανάκλασης των σωματιδίων από το κρουστικό κύμα, ενώ ο σταθμός Inuvik κατέγραψε μία πιθανή περίπτωση φαινομένου του ‘κόνου απώλειας’ (Ruffolo et al., 1999).

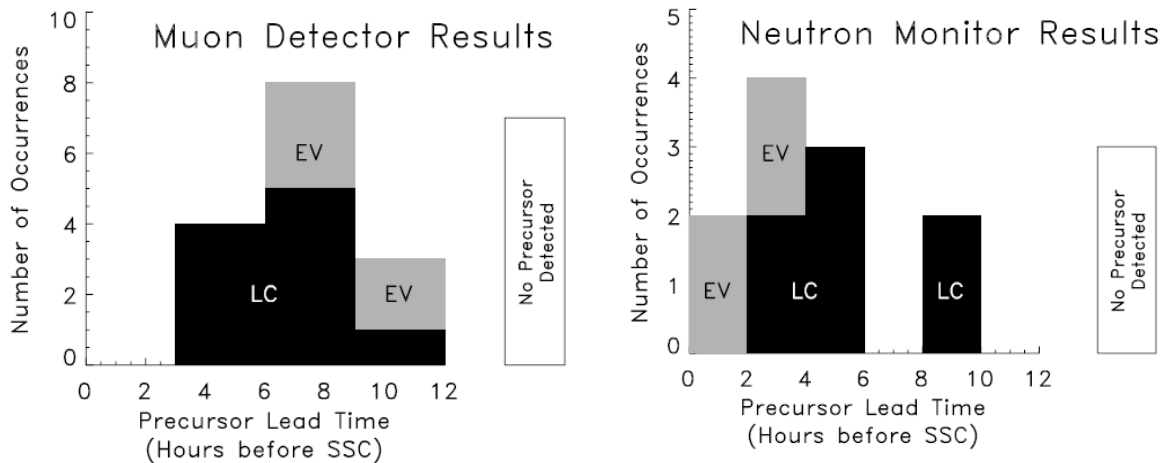
Τα περισσότερα από τα προειδοποιητικά σήματα έχουν μία ιδιόμορφη κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας με το ασυμπτωτικό μήκος ή με τη γωνία ρεύματος (pitch angle). Παρατηρείται μία απότομη αλλαγή από το ελάχιστο στο μέγιστο των κοσμικών ακτίνων, η οποία δεν μπορεί να περιγραφεί από το άθροισμα των δύο πρώτων αρμονικών (Parailiou et al., 2012b; 2013). Αυτές οι μεταβολές παρατηρούνται στον τομέα των μηκών  $140^\circ - 180^\circ$  και  $270^\circ - 310^\circ$ , κοντά στη συνηθισμένη διεύθυνση της γραμμής του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Οι ανωμαλίες αυτές, συχνά, παρατηρούνται τις τελευταίες ώρες πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος, σχεδόν 4 ώρες. Όμως, πολλές φορές καλύπτουν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το δίκτυο μετρητών νετρονίων είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση τέτοιων ανωμαλιών στη γωνία ρεύματος ή στην κατά μήκος κατανομή των μεταβολών των κοσμικών ακτίνων.



Στο Bartol Research Institute (βλ. Κεφ. III § 3.4.2.1.1) το σύστημα για την παρακολούθηση των προειδοποιητικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο έχει δημιουργηθεί με βάση την κατανομή ως προς τη γωνία ρεύματος των κοσμικών ακτίνων (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/>). Χρησιμοποιείται ένας περιορισμένος αριθμός σταθμών, οι οποίοι είναι ομοιογενώς κατανομημένοι με βάση το γεωγραφικό μήκος (Spaceship Earth). Η αποδοτικότητα του συστήματος είναι ικανοποιητική, αλλά εξαρτάται από τη λειτουργική αξιοπιστία του κάθε σταθμού (μία βλάβη σε ένα σταθμό προκαλεί κενό στο σκανάρισμα περίπου 50° της ουράνιας σφαίρας) και τη συνεχή ροή δεδομένων του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, τα οποία χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς της γωνίας ρεύματος (Asipenka et al., 2009a).

Τα τελευταία χρόνια η αναζήτηση για προειδοποιητικά σήματα με τηλεσκόπια μιονίων έχει, επίσης, αναπτυχθεί και μάλιστα σχετικά επιτυχημένα (Munakata et al., 2000; 2005; 2006; Kudela & Storini, 2006). Στο σχήμα 2.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από δύο έρευνες σχετικές με προειδοποιητικά σήματα κοσμικών ακτίνων οι οποίες διεξήχθησαν με επίγειους μετρητές. Κάθε ιστόγραμμα δίνει τον χρόνο που το προειδοποιητικό σήμα προηγείται του SSC. Το δεξιό ιστόγραμμα αναφέρεται σε 14 ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες, οι οποίες μελετήθηκαν με τη βοήθεια του δικτύου μετρητών νετρονίων (Belon et al., 2001). Αυτές οι καταιγίδες είναι όσες περιλαμβάνονται στη λίστα του Gosling et al. (1990) και χαρακτηρίζονται από Kp 8<sup>-</sup> ή και μεγαλύτερο. Το αριστερό ιστόγραμμα αναφέρεται σε 22 μεγάλες γεωμαγνητικές καταιγίδες, οι οποίες μελετήθηκαν με επίγεια τηλεσκόπια μιονίων (Munakata et al., 2000). Ως μεγάλη καταιγίδα ορίζεται εκείνη που χαρακτηρίζεται από Kp 7<sup>-</sup> ή και μεγαλύτερο (Leerungnavarat et al., 2003). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, τόσο οι μετρητές νετρονίων όσο και οι ανιχνευτές μιονίων καταγράφουν την ένταση των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, κυρίως πρωτονίων, με τα άτομα στην ατμόσφαιρα της Γης. Η τυπική ενέργεια των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, οι οποίες θα παράξουν τα δευτερογενή σωματίδια που θα διαμορφωθούν από τη μείωση Forbush, είναι ~10 GeV για τους μετρητές νετρονίων και ~30 GeV για τους ανιχνευτές μιονίων (Leerungnavarat et al., 2003).

Κατ' αρχάς, όπως προκύπτει και από το σχήμα 2.14, η πλειοψηφία των μεγάλων ή ισχυρών γεωμαγνητικών καταιγίδων συνοδεύεται από προειδοποιητικά σήματα. Οι ανιχνευτές μιονίων καταγράφουν προειδοποιητικά σήματα σε 15 από τις 22 μεγάλες καταιγίδες (68%), ενώ οι μετρητές νετρονίων αντίστοιχα σε 11 από τις 14 ισχυρές καταιγίδες (79%). Όπως αναφέρουν οι Munakata et al. (2000) αν η έρευνα με τους ανιχνευτές μιονίων περιοριστεί στις μεγαλύτερες καταιγίδες του δείγματος (με τιμή του  $K_p$  8 ή και μεγαλύτερη) τότε το αντίστοιχο ποσοστό γίνεται 89%. Επίσης, από το σχήμα φαίνεται ότι, το προειδοποιητικό σήμα προηγείται του SSC συνήθως από μερικές έως και 12 ώρες. Αυτή η χρονική διαφορά είναι αρκετή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πρόγνωση του διαστημικού καιρού, αφού παρέχει σημαντικά μεγαλύτερο προβάδισμα προειδοποίησης σε σχέση με τη 0.5 – 1 ώρα που δίνει η άμεση ανίχνευση του κρουστικού κύματος από ένα διαστημόπλοιο τοποθετημένο στη θέση του σημείου Lagrange Ήλιου – Γης (Leerungnavarat et al., 2003). Τέλος, το συγκεκριμένο σχήμα δίνει ξεκάθαρα τη διαφορά μεταξύ των χρόνων καταγραφής των προειδοποιητικών σημάτων από τους μετρητές νετρονίων και τους ανιχνευτές μιονίων. Έτσι, οι χρόνοι καταγραφής του προειδοποιητικού σήματος είναι 8 ώρες για τους ανιχνευτές μιονίων και 4 ώρες για τους μετρητές νετρονίων (Leerungnavarat et al., 2003).

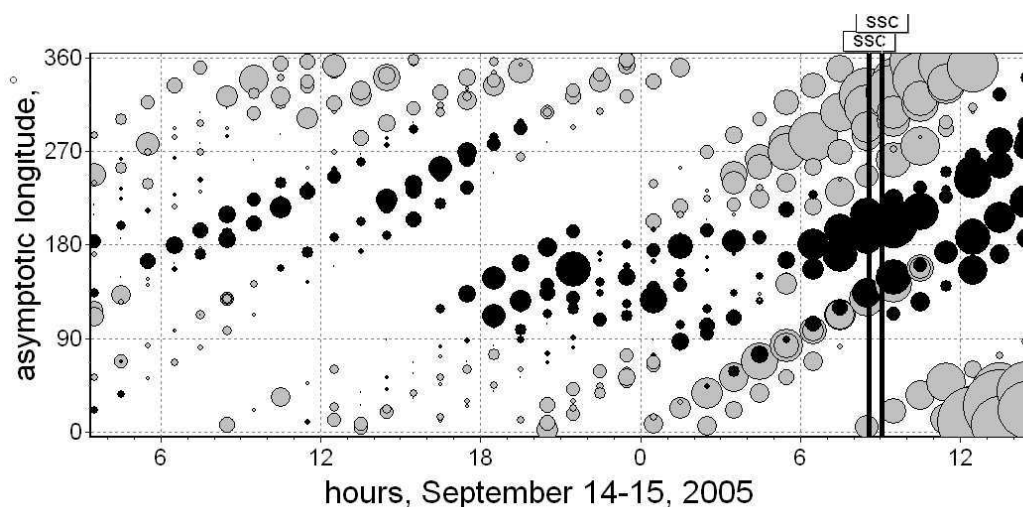


Σχ. 2.14 Ιστογράμματα του χρόνου που παρατηρήθηκε το προειδοποιητικό σήμα ως προς το σχετικό SSC. Τα ιστογράμματα αναφέρονται σε έρευνα που διεξήχθη με ανιχνευτές μιονίων (αριστερά) (Munakata et al., 2000) και με μετρητές νετρονίων (δεξιά) (Belov et al., 2001).

### 2.8.1 Σχετικά παραδείγματα

Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά μερικά παραδείγματα μειώσεων Forbush που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και έχουν εμφανίσει προειδοποιητικά σήματα.

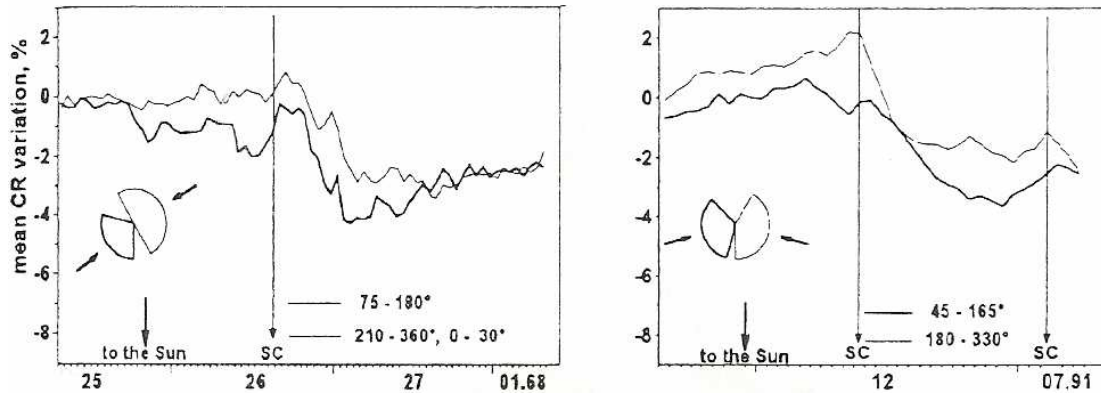
Σύμφωνα με τους Asipenka et al. (2009a) μία προ-μείωση σε μία στενή ζώνη μηκών κατά μήκος της διεύθυνσης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου παρατηρήθηκε 11 ώρες πριν από το κρουστικό κύμα για τη μείωση Forbush της 29<sup>ης</sup> Αυγούστου 1979. Ένα άλλο παράδειγμα αφορά στη μείωση της 15<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2005 (Σχ. 2.15), όπου γύρω στις 03:00 UT στις 15 Σεπτεμβρίου η χαμηλή ένταση κοσμικής ακτινοβολίας στη στενή περιοχή μηκών  $90^{\circ} - 180^{\circ}$  ξεχωρίζει από το υπόβαθρο των αυξήσεων των κοσμικών ακτίνων. Αυτή η ιδιομορφία ήταν αρκετά ξεκάθαρη από τις ~06:00 UT, δηλαδή τρεις ώρες πριν το SSC (Mavromichalaki et al., 2011).



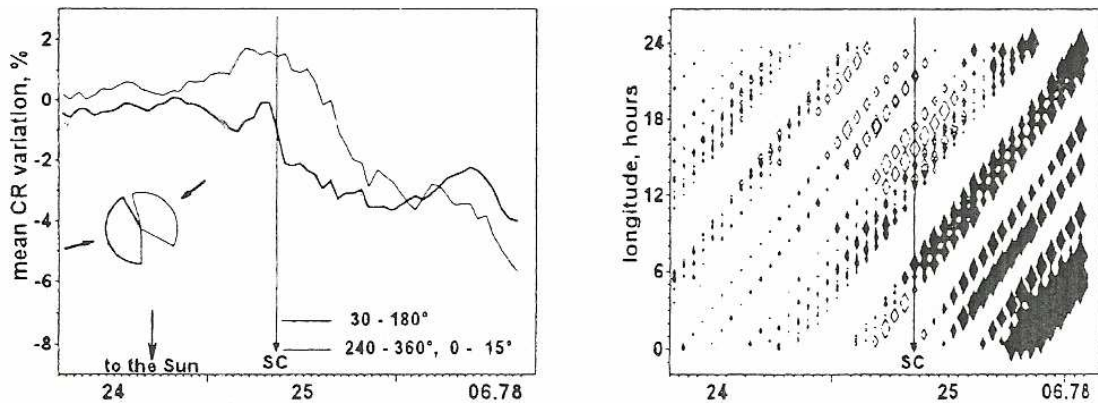
Σχ. 2.15 Η κατανομή ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για το γεγονός στις 15 Σεπτεμβρίου 2005 (Asipenka et al., 2009a).

Επιπλέον μία ξεκάθαρη προ-μείωση παρατηρήθηκε, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16 (αριστερά), στα μήκη  $75^{\circ} - 180^{\circ}$ , η οποία διαρκεί περίπου 20 ώρες μέχρι την αρχή της μείωσης Forbush της 25<sup>ης</sup> – 26<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1968 (Belov et al., 1995a; Kudela et al., 2000). Μία παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για τις μειώσεις

την 11<sup>η</sup> – 12<sup>η</sup> Ιουλίου 1991 (Σχ. 2.16, δεξιά) και 24<sup>η</sup> – 25<sup>η</sup> Ιουνίου 1978 (Σχ. 2.17, αριστερά). Όλα αυτά τα γεγονότα συνδέονται με δυτικές ή κεντρικές ηλιακές εκλάμψεις. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17 (δεξιά), η μείωση της 24<sup>ης</sup> – 25<sup>ης</sup> Ιουνίου 1978 έχει παρασταθεί και σε διάγραμμα ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου και είναι φανερή τόσο η προ-μείωση όσο και η προ-αύξηση λίγες ώρες πριν το SSC.

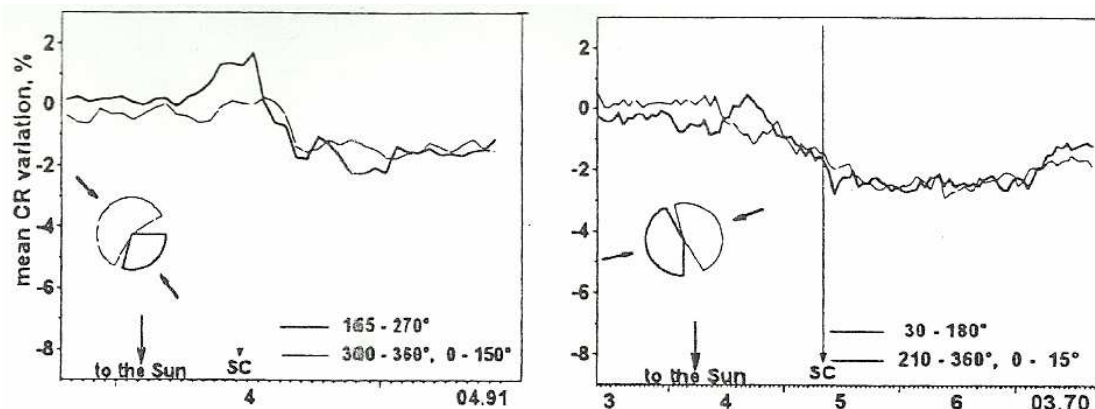


Σχ. 2.16 Η μέση μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (%) για τον Ιανουάριο 1968 (αριστερά) και τον Ιούλιο 1991 (δεξιά) (Belov et al., 1995a).



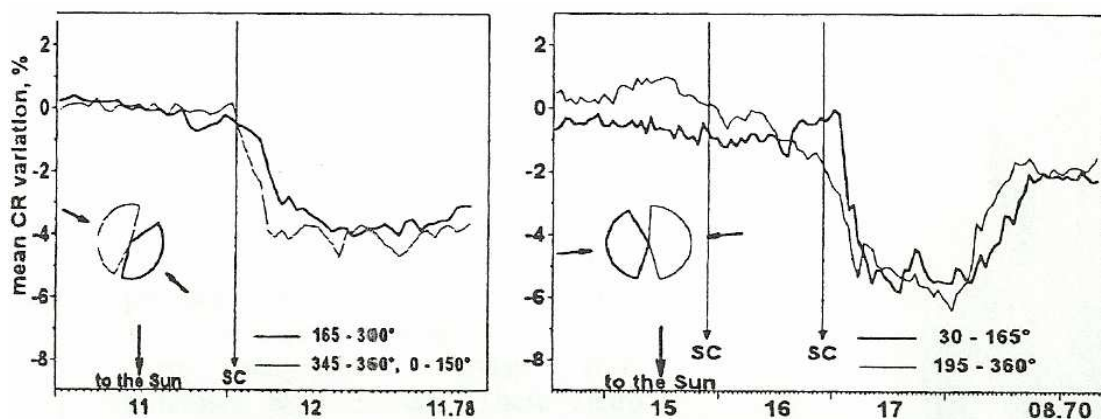
Σχ. 2.17 Η μέση μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (%) για τον Ιούνιο 1978 (αριστερά) και η κατανομή ασυμπτ. μήκους – χρόνου για το ίδιο γεγονός (Belov et al., 1995a).

Για το γεγονός της 4<sup>ης</sup> Απριλίου 1991 (Σχ. 2.18, αριστερά), το οποίο συνδέεται με ανατολική έκλαμψη, μία προ-αύξηση σημειώνεται στην περιοχή μηκών 165° – 270° (Belov et al., 1995a). Μία άλλη περίπτωση είναι το γεγονός του Μαρτίου 1970 (Σχ. 2.18, δεξιά).



Σχ. 2.18 Η μέση μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (%) για τον Απρίλιο 1991 (αριστερά) και τον Μάρτιο 1970 (δεξιά) (Belov et al., 1995a).

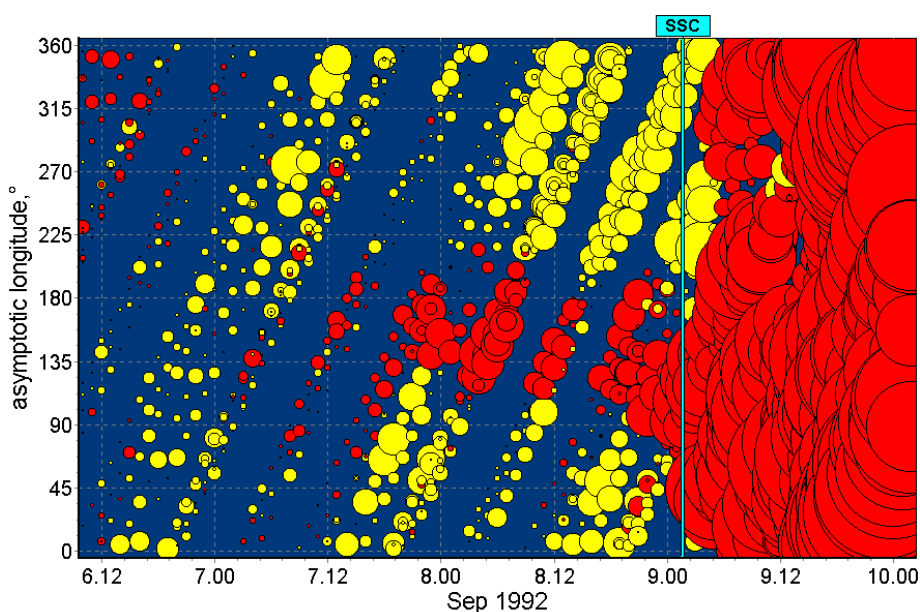
Προ-μείωση, επίσης, παρατηρήθηκε και για το γεγονός του Νοεμβρίου 1978 (Σχ. 2.19, αριστερά), ενώ για τη μείωση Forbush στις 15 – 17 Αυγούστου 1970 (Σχ. 2.19, δεξιά) τα προειδοποιητικά σήματα ήταν εμφανή τόσο πριν από το πρώτο όσο και πριν από το δεύτερο SSC και το γεγονός ότι μοιάζουν διαφορετικά μάλλον υποδηλώνει τα διαφορετικά ηλιογραφικά μήκη των εκλάμψεων (Belov et al., 1995a).



Σχ. 2.19 Η μέση μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (%) για τον Νοέμβριο 1978 (αριστερά) και τον Αύγουστο 1970 (δεξιά) (Belov et al., 1995a).

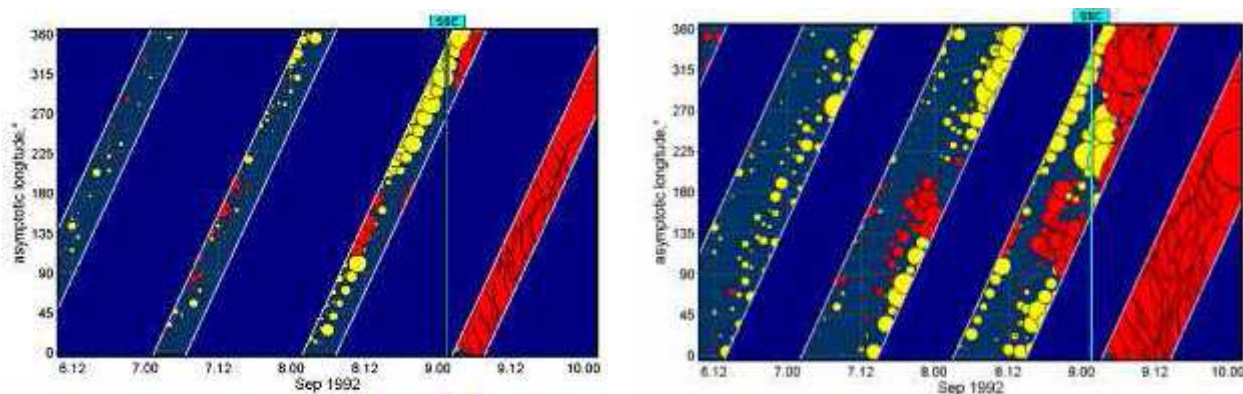
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το γεγονός της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992, μία μείωση η οποία έχει αναλύθει και παρουσιαστεί σε πολλά επιστημονικά άρθρα και μελέτες σχετικά με την πρόγνωση του διαστημικού καιρού (Munakata et al., 2000; Belov et al., 2003; Dorman et al., 2003a; Dorman, 2005; Asipenka et al., 2009a). Ένα έντονο

και μεγάλης διάρκειας προειδοποιητικό σήμα πρώτα ανιχνεύθηκε στα δεδομένα των τηλεσκοπίων μιονίων (Nagashima et al., 1993; Munakata et al., 2000). Παρόμοιο, όμως, προειδοποιητικό σήμα εμφανίστηκε και στα δεδομένα των μετρητών νετρονίων, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.20. Παρατηρήθηκε αλλαγή στην κατανομή των κοσμικών ακτίνων μία ημέρα πριν την άφιξη της διαταραχής του ηλιακού ανέμου με τη μορφή μίας απότομης (πάνω από 1%) μείωσης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κοντά στη διεύθυνση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Belov et al., 2003). Συγκεκριμένα, η προ-αύξηση όπως και η προ-μείωση ήταν ορατές περίπου 15 – 20 ώρες πριν το SSC (Dorman et al., 2003a; Dorman, 2005).



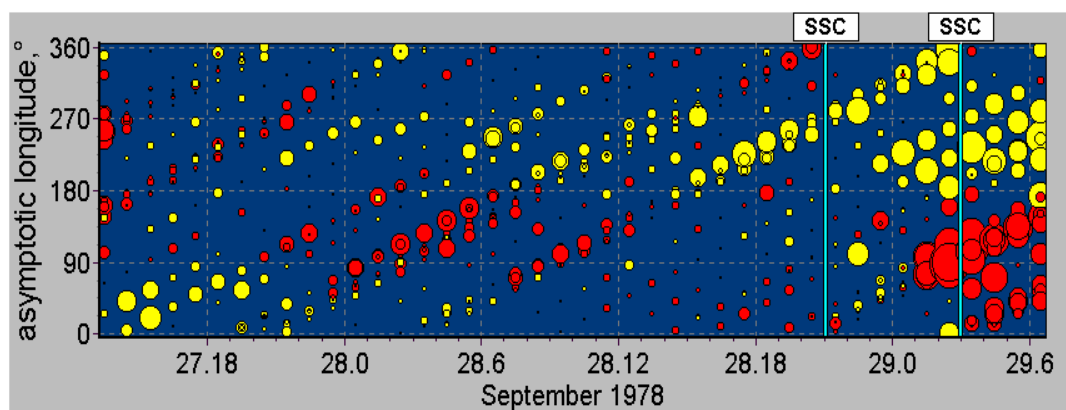
Σχ. 2.20 Η κατανομή ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για το γεγονός στις 9 Σεπτεμβρίου 1992 (Dorman, 2005; Asipenka et al., 2009a; <http://www.nmdb.eu>).

Ακόμη πρέπει να σημειωθεί η μεγάλη σημασία που έχει σε αυτές τις μελέτες ο αριθμός των μετρητών νετρονίων οι οποίοι μπορούν να παρέχουν δεδομένα. Στο σχήμα 2.21 δίνεται η κατανομή για το γεγονός της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992 χρησιμοποιώντας δεδομένα μόνο από ευρωπαϊκούς σταθμούς (αριστερά) και ευρωπαϊκούς και ρώσικους (δεξιά). Όπως παρατηρείται αν μειωθεί ο αριθμός των σταθμών που διαθέτουν δεδομένα χάνονται πολύ ισχυρά προειδοποιητικά σήματα (Asipenka et al., 2009a).



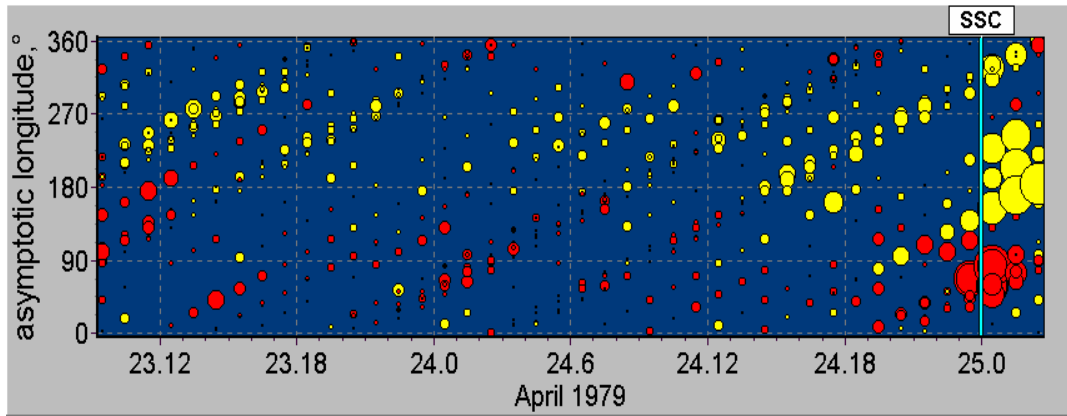
Σχ. 2.21 Η κατανομή ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για το γεγονός στις 9 Σεπτεμβρίου 1992 με δεδομένα από ευρωπαϊκούς σταθμούς (αριστερά) και από ευρωπαϊκούς και ρώσικους σταθμούς (δεξιά) (Asipenka et al., 2009a; <http://www.nmdb.eu>).

Για τις δύο γεωμαγνητικές καταιγίδες στις 28 Σεπτεμβρίου 1978 (το SSC καταγράφηκε στις 21:00 UT) και 29 Σεπτεμβρίου 1978 (το SSC καταγράφηκε στις 03:00 UT) σημειώθηκαν ξεκάθαρες μεταβολές στην ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων και μία προ-αύξηση πριν το πρώτο SSC και μία ευρεία προ-μείωση και προ-αύξηση πριν το δεύτερο SSC, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22 (Dorman et al., 2003b).



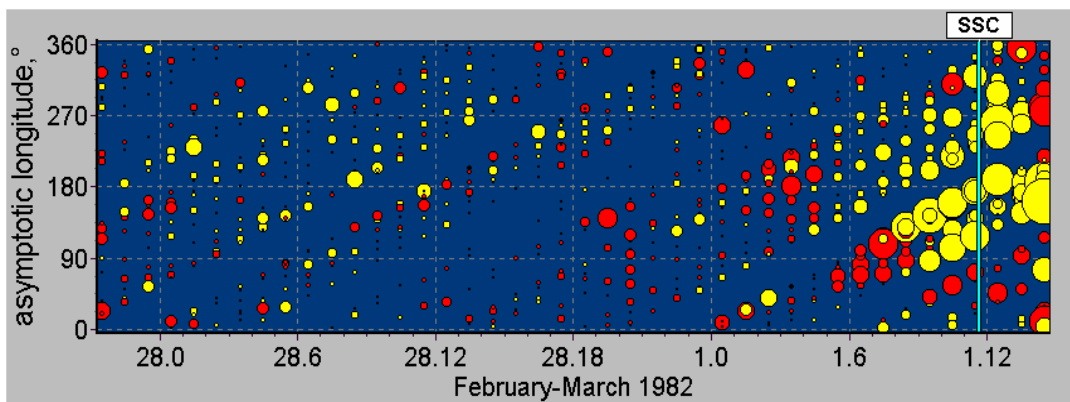
Σχ. 2.22 Η κατανομή ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για το γεγονός στις 28 – 29 Σεπτεμβρίου 1978 (Dorman et al., 2003b).

Για το γεγονός της 24<sup>ης</sup> Απριλίου 1979 (το SSC καταγράφηκε στις 23:58 UT) οι μεταβολές στην ανισοτροπία παρατηρήθηκαν 10 ώρες περίπου πριν το κρουστικό κύμα και τις τελευταίες ώρες πριν το SSC σημειώθηκε μία ξεκάθαρη προ-μείωση, όπως δείχνει το σχήμα 2.23 (Dorman et al., 2003b).



Σχ. 2.23 Η κατανομή ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για το γεγονός στις 24 Απριλίου 1979 (Dorman et al., 2003b).

Για τη γεωμαγνητική καταιγίδα της 1<sup>ης</sup> Μαρτίου 1982 (το SSC καταγράφηκε στις 11:38 UT) τα προειδοποιητικά σήματα (προ-αύξηση και προ-μείωση) παρατηρήθηκαν σχεδόν 5 ώρες πριν το SSC, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24 (Dorman et al., 2003b).



Σχ. 2.24 Η κατανομή ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για το γεγονός την 1 Μαρτίου 1982 (Dorman et al., 2003b).

## 2.8.2 Θεωρητική προσέγγιση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν ο μετρητής νετρονίων συνδέεται μαγνητικά με την απεμπλουτισμένη σε κοσμικές ακτίνες περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα σημειώνεται προ-μείωση (Belov et al., 1995a; Dorman et al., 2003a; Leerungnavarat et al., 2003), ενώ όταν οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες επιταχύνονται στο μέτωπο της



προπορευόμενης διαταραχής, καθώς τα σωματίδια ανακλώνται από το κρουστικό κύμα που πλησιάζει, σημειώνεται προ-αύξηση (Belov et al., 1995a; Dorman et al., 1995; 2003).

Πιο συγκεκριμένα, καθώς μία στεμματική εκτίναξη μάζας διαδίδεται στον διαπλανητικό χώρο και πριν ακόμη φθάσει στη Γη, συναντά τον αργό ηλιακό άνεμο δημιουργώντας μπροστά της κρουστικό κύμα. Επειδή το κρουστικό κύμα είναι μία ασυνέχεια δημιουργείται στην περιοχή μεταξύ του κρουστικού κύματος και της εκροής μάζας μία περιοχή στην οποία υπάρχουν σωματίδια γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας. Καθώς η διαταραχή κινείται, διαστέλλεται και ως αποτέλεσμα ελαττώνεται η πυκνότητα των σωματιδίων και χάνουν μέρος της ενέργειάς τους.

Όσο η Γη δεν βρίσκεται μέσα στη διαταραχή, ο μετρητής νετρονίων είναι δυνατόν να συνδεθεί μαγνητικά είτε με την περιοχή μπροστά από το κρουστικό κύμα, όπου σωματίδια γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας ανακλώνται από αυτό, επιταχύνονται και τελικά καταγράφονται από τον μετρητή ως προ-αύξηση, είτε με την απεμπλουτισμένη σε κοσμικές ακτίνες περιοχή πίσω από το κρουστικό κύμα, οπότε στην περίπτωση αυτή αισθάνεται την προ-μείωση. Όταν τελικά η Γη βρεθεί μέσα στη διαταραχή, τότε θα καταγραφεί η κύρια φάση της μείωσης Forbush.

Προκειμένου να περιγραφεί η ‘καλή σύνδεση’ μεταξύ της Γης και της περιοχής μέσα στη διαταραχή και το φαινόμενο της προ-μείωσης, δίνεται, στη συνέχεια, μία λεπτομερής περιγραφή του μηχανισμού του ‘κώνου απώλειας’. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του μαγνητικού καθρέπτη (magnetic mirror) και της μαγνητικής φιάλης (magnetic bottle).

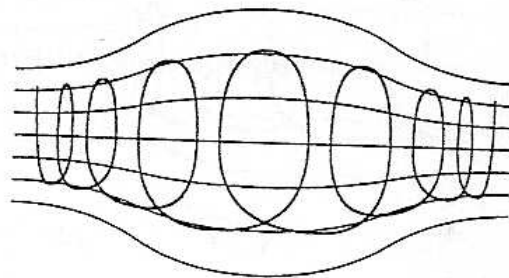
Πιο αναλυτικά, για ένα φορτισμένο σωματίδιο το οποίο κινείται με ταχύτητα  $\vec{v}$  μέσα σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο (η τιμή της έντασης αυξάνεται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών), οι κινήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται εξαιτίας των δύο συνιστωσών της ταχύτητας ( $v_{\perp}$  και  $v_{\parallel}$ ) είναι οι εξής (Πρέκα κ.α., 2009):

α) μία κίνηση εγκάρσια προς τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Η κίνηση αυτή είναι σπειροειδής και όχι ακριβώς κυκλική, γιατί όσο αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου τόσο μειώνεται η ακτίνα.

β) μία κίνηση παράλληλη προς τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Η κίνηση αυτή είναι επιβραδυνόμενη, αφού η παράλληλη προς το μαγνητικό πεδίο συνιστώσα της ταχύτητας μειώνεται με την αύξηση της έντασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το βήμα της έλικας να μειώνεται όσο το σωματίδιο μετακινείται προς τιμές αυξανόμενης έντασης.

Το αποτέλεσμα αυτών των δύο κινήσεων είναι μία ελικοειδής κίνηση κατά την οποία η ακτίνα αλλά και το βήμα μειώνονται όσο αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Όταν το μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, σε κάποιο οριακό σημείο της κίνησης, το μέτρο της παράλληλης συνιστώσας της ταχύτητας  $v_{||}$  μηδενίζεται. Στο σημείο αυτό το σωματίδιο σταματά στιγμιαία και στη συνέχεια ανακλάται προς τα πίσω. Πρόκειται για τον μαγνητικό καθρέπτη (Πρέκα, κ.α., 2009).

Εφαρμογή του μαγνητικού καθρέπτη αποτελεί η μαγνητική φιάλη, αφού δύο μαγνητικοί καθρέπτες μπορούν να συνδυαστούν και να δημιουργήσουν μία μαγνητική φιάλη, όπου σωματίδια περιορίζονται μέσα σε αυτή λόγω επαναλαμβανόμενων ανακλάσεων μεταξύ των δύο καθρεπτών (Kallenrode, 1998). Το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές και διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.25.



Σχ. 2.25 Μαγνητική φιάλη (Kallenrode, 1998).

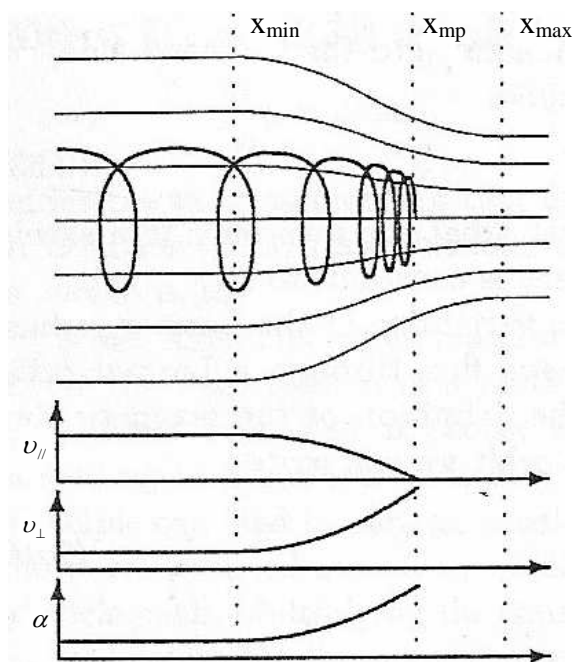
Γι' αυτή την περίπτωση έχουν θεωρηθεί τα εξής (Πρέκα, κ.α., 2009):

α) υπάρχει κυλινδρική συμμετρία

β) η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών (ή αλλιώς η τιμή της έντασης) είναι μέγιστη στα άκρα του σχηματισμού, μειώνεται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών όπου και γίνεται ελάχιστη στο κεντρικό τμήμα.

γ) η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου κάθετα προς τον άξονα συμμετρίας θεωρείται αμελητέα

Στο σχήμα 2.26 (άνω διάγραμμα) δίνεται η δομή ενός μαγνητικού καθρέπτη, καθώς επίσης και η τροχιά ενός σωματιδίου μέσα σε αυτόν, ενώ στο ίδιο σχήμα (κάτω διάγραμμα) απεικονίζονται οι μεταβολές των συνιστωσών της ταχύτητας του σωματιδίου,  $v_{\parallel}$  και  $v_{\perp}$ , αλλά και η γωνία ρεύματος (η γωνία της ταχύτητας του σωματιδίου με το μαγνητικό πεδίο)  $\alpha$  συναρτήσει της θέσης του σωματιδίου μέσα στη φιάλη.



Σχ. 2.26 Μαγνητικός καθρέπτης (Kallenrode, 1998). Ο σχηματισμός (άνω διάγραμμα) και οι μεταβολές της παράλληλης και κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας του σωματιδίου και της γωνίας ρεύματος συναρτήσει της θέσης (κάτω διάγραμμα).

Αφού το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενικό, η κινητική ενέργεια του σωματιδίου είναι σταθερή,  $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2) = \text{σταθ}$ . Η κινητική ενέργεια κάθετα προς το

μαγνητικό πεδίο μπορεί να εκφραστεί μέσω της μαγνητικής ροπής  $\mu$  (Kallenrode, 1998):

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2 + \mu B \quad (2.5)$$

Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης (2.5) περιγράφει την ενέργεια ολίσθησης ή την κινητική ενέργεια του οδηγούντος κέντρου, ενώ ο δεύτερος όρος  $\mu B$  είναι η ενέργεια της γυροκίνησης (περιστροφική κίνηση). Αφού η  $\mu$  είναι σταθερή, μία αύξηση του μαγνητικού πεδίου  $B$  πρέπει να αντισταθμιστεί από μία μείωση στην ενέργεια ολίσθησης μέχρις ότου η  $v_{\parallel}$  μηδενιστεί. Σε αυτό το κατοπτρικό σημείο (mirror point) η διατήρηση της ενέργειας γράφεται ως εξής (Kallenrode, 1998):

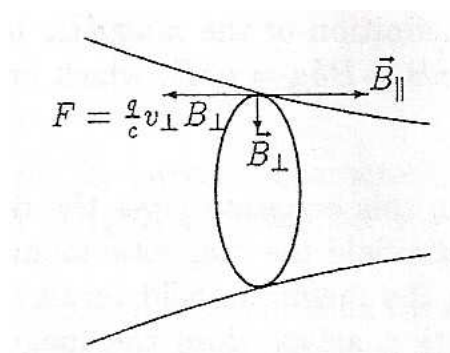
$$\mu B_{mp} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_{\perp mp}^2 \quad (2.6)$$

Έτσι στο κατοπτρικό σημείο η ενέργεια ολίσθησης έχει μετατραπεί εντελώς σε ενέργεια γυροκίνησης, η οποία αποτελεί την κινητική ενέργεια του σωματιδίου. Στο κατοπτρικό σημείο το οδηγούν κέντρο ακινητοποιείται, όμως δεν θα παραμείνει εκεί. Αντιθέτως θα ανακλαστεί προς τα πίσω προς το αποκλίνον πεδίο. Το σχήμα 2.27 απεικονίζει την προέλευση της δύναμης επαναφοράς. Στο κατοπτρικό σημείο το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές. Έτσι το επίπεδο της γυροκίνησης δεν είναι κάθετο στο μαγνητικό πεδίο και το  $\vec{B}$  έχει μία συνιστώσα  $B_{\perp}$  σε αυτό το επίπεδο, η οποία οδηγεί στη δύναμη επαναφοράς:

$$\vec{F}_r = q \frac{\vec{v} \times \vec{B}}{c} = q \frac{v_{\perp} B_{\perp}}{c} e_x \quad (2.7)$$

Το σωματίδιο σπρώχνεται πίσω σε περιοχές με μειωμένη ένταση πεδίου και η γωνία ρεύματός του μειώνεται, καθώς η ενέργεια γυροκίνησης μετατρέπεται σε ενέργεια ολίσθησης.

Η θέση του κατοπτρικού σημείου  $B_{mp}$  εξαρτάται από την αρχική γωνία ρεύματος  $\alpha_1$  του σωματιδίου. Αν η  $\alpha_1$  είναι μηδενική, τότε η μαγνητική ροπή είναι, επίσης, μηδενική και η συνολική κινητική ενέργεια του σωματιδίου είναι η ενέργεια ολίσθησης. Μία αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου δεν μετατρέπει την ενέργεια γυροκίνησης σε ενέργεια ολίσθησης και το σωματίδιο διασχίζει τον μαγνητικό καθρέπτη. Αν, από την άλλη, η  $\alpha_1$  είναι  $90^\circ$ , όλη η ενέργεια του σωματιδίου περικλείεται στη γυροκίνηση και το οδηγόν κέντρο βρίσκεται ήδη ακινητοποιημένο. Για τιμές της  $\alpha_1$  μεταξύ αυτών των δύο ακραίων περιπτώσεων, που αναφέρθηκαν, είτε το σωματίδιο ανακλάται στο σημείο  $x_{mp}(\alpha_1)$  είτε το σωματίδιο διαφεύγει, αν η αύξηση στην ένταση του μαγνητικού πεδίου δεν είναι αρκετή ώστε να μετατρέψει όλη την ενέργεια ολίσθησης (Kallenrode, 1998).



Σχ. 2.27 Η δύναμη επαναφοράς στο κατοπτρικό σημείο (Kallenrode, 1998).

Στη συνέχεια θα καθοριστεί αν ένα σωματίδιο τελικά θα ανακλαστεί ή θα διαφύγει από τον μαγνητικό καθρέπτη. Στην περίπτωση ενός αργά μεταβαλλόμενου με τον χρόνο μαγνητικού πεδίου ισχύει ότι η μαγνητική ροπή διατηρείται (Kallenrode, 1998), το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος της ενέργειας της γυροκίνησης προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι σταθερός. Έτσι, για οποιαδήποτε δύο σημεία στο μαγνητικό πεδίο ισχύει ότι:

$$\mu = \frac{m v_{\perp \min}^2}{2 B_{\min}} = \frac{m v_{\perp mp}^2}{2 B_{mp}} \quad (2.8)$$

ή αν ληφθεί υπόψη η γωνία ρεύματος:

$$\frac{v_{\min}^2 \sin^2 \alpha_1}{B_{\min}} = \frac{v_{mp}^2 \sin^2 \alpha_{mp}}{B_{mp}} \quad (2.9)$$

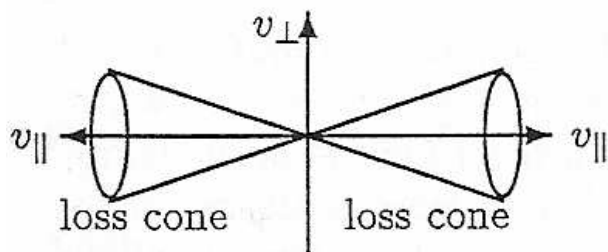
Η κινητική ενέργεια είναι σταθερή, οπότε  $v_{\min} = v_{mp}$  και η  $\frac{2\mu}{v^2} = \frac{\sin^2 \alpha_1}{B_{\min}} = \frac{\sin^2 \alpha_{mp}}{B_{mp}}$  είναι μία σταθερά της κίνησης. Στο κατοπτρικό σημείο η γωνία ρεύματος  $\alpha_{mp}$  του σωματιδίου είναι  $90^\circ$ . Έτσι, για να ανακλαστεί στη θέση  $B_{\max}$  με μέγιστη ένταση μαγνητικού πεδίου, η αρχική γωνία ρεύματος στο  $B_{\min}$  πρέπει να είναι:

$$\sin^2 \alpha_1^r = \frac{B_{\min}}{B_{\max}} = \frac{1}{R_m} \quad (2.10)$$

όπου το  $R_m$  είναι ο λόγος του μαγνητικού καθρέπτη (Parks, 1991; Kallenrode, 1998; Τσίγκανος, 2010). Σωματίδια με αρχική γωνία ρεύματος  $\alpha_1^r$  ανακλώνται ακριβώς στη θέση με  $B_{\max}$ . Σωματίδια με μεγαλύτερες  $\alpha_1$  ανακλώνται νωρίτερα και σωματίδια με μικρότερες  $\alpha_1$  περνούν μέσω του κατοπτρικού σημείου. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κατοπτρικά σημεία αυτών των σωματιδίων βρίσκονται πιο έξω από τους μαγνητικούς καθρέπτες της φιάλης, με αποτέλεσμα να βγαίνουν έξω από αυτήν πριν προλάβουν να ανακλαστούν (Πρέκα, κ.α., 2009). Η εξίσωση (2.10) καθορίζει το όριο μίας περιοχής στον χώρο ταχύτητας, η οποία έχει σχήμα κώνου και καλείται ‘κώνος απώλειας’ (Σχ. 2.28). Τα σωματίδια τα οποία βρίσκονται μέσα σ’ αυτό τον κώνο δεν περιορίζονται από τον μαγνητικό καθρέπτη. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ο ‘κώνος απώλειας’ εξαρτάται μόνο από τη γωνία ρεύματος και όχι άλλες παραμέτρους του σωματιδίου, όπως μάζα, ταχύτητα ή φορτίο (Parks, 1991; Kallenrode, 1998).

Για την επιτάχυνση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων ο Fermi πρότεινε έναν σχηματισμό δύο συγκλινόντων μαγνητικών καθρεπτών (μηχανισμός επιτάχυνσης Fermi 1<sup>ης</sup> τάξης). Σε μία μαγνητική φιάλη με δύο καθορισμένους καθρέπτες το σωματίδιο ταλαντώνεται μεταξύ αυτών των καθρεπτών χωρίς μεταβολές στη συνολική ενέργεια. Κατά την αλληλεπίδραση, όμως, με έναν κινούμενο μαγνητικό καθρέπτη σημειώνεται κέρδος ή απώλεια ενέργειας ανάλογα με τη σχετική ταχύτητα

σωματιδίου και καθρέπτη. Πιο συγκεκριμένα, οι κατά μέτωπο συγκρούσεις οδηγούν σε ενεργειακό κέρδος, ενώ, αν σωματίδιο και καθρέπτης κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση σημειώνεται απώλεια ενέργειας.



Σχ. 2.28 Ορισμός του 'κώνου απώλειας' (Kallenrode, 1998).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

### ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται εν συντομία τα υπάρχοντα συστήματα για την καταγραφή των κοσμικών ακτίνων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο επίγειο ανιχνευτικό σύστημα των μετρητών νετρονίων. Αναλύεται η αρχή λειτουργίας τους και αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά του Σταθμού Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Επίσης, γίνεται αναφορά στο Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων αλλά και στην Υψηλής Ανάλυσης Βάση Μετρητών Νετρονίων σε πραγματικό χρόνο (NMDB), που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή των δεδομένων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

#### 3.2 Συστήματα καταγραφής σωματιδίων

Οι κοσμικές ακτίνες καταγράφονται σε διάφορα σημεία χρησιμοποιώντας από υπόγειους, υποθαλάσσιους, επίγειους ή υπέργειους ανιχνευτές έως και διαστημικούς ανιχνευτές στις άκρες του ηλιακού συστήματος. Τα σωματίδια των κοσμικών ακτίνων μπορούν να παρατηρηθούν μέσω των παρακάτω αλληλεπιδράσεων (Usoskin & Mursula, 2001):

- ❖ ανελαστική σκέδαση των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας από τα τροχιακά ηλεκτρόνια του υλικού του ανιχνευτή λόγω της δύναμης Coulomb
- ❖ ελαστική σκέδαση των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες των ατόμων του ανιχνευτή
- ❖ εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov από τα σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας
- ❖ εκπομπή ακτινοβολίας μετάβασης (transition radiation), η οποία παράγεται όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται μέσω της διαχωριστικής επιφάνειας δύο μέσων με διαφορετικές διηλεκτρικές ιδιότητες. Ένα φορτισμένο σωματίδιο που πλησιάζει τη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων αποτελεί, μαζί με το κατοπτρικό



του φορτίου, ένα ηλεκτρικό δίπολο, του οποίου η ένταση μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου καθώς το φορτίο κινείται και μηδενίζεται όταν το σωματίδιο εισέλθει στο δεύτερο μέσο. Έτσι παράγεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία καλείται ακτινοβολία μετάβασης.

- ❖ πυρηνικές αντιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας και των πυρήνων του ανιχνευτή
- ❖ ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung) λόγω της επιταχυνόμενης κίνησης των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στο υλικό του ανιχνευτή. Για πρωτόνια και άλλα βαρύτερα σωματίδια κοσμικών ακτίνων το ποσό αυτής της ακτινοβολίας είναι σχετικά μικρό.

Με βάση τα παραπάνω μεταξύ των ανιχνευτών οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση των κοσμικών ακτίνων είναι οι θάλαμοι ιονισμού, οι αναλογικοί απαριθμητές, οι ανιχνευτές Geiger – Müller, οι σπινθηριστές, οι ανιχνευτές Cherenkov, οι θάλαμοι φυσαλίδων και τα φωτογραφικά γαλακτώματα (Μαυρομιχαλάκη, 1989; Παπαϊωάννου, 2007).

Οι ποικίλοι ανιχνευτές της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους συνδυασμούς ώστε να δημιουργήσουν σύνθετα ανιχνευτικά συστήματα και πειραματικές διατάξεις (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Στη συνέχεια δίνονται μερικές πληροφορίες σχετικά με τα πιο βασικά συστήματα καταγραφής διαστημικά, υπέργεια, επίγεια ή υπόγεια.

#### **α) Διαστημικοί ανιχνευτές**

Οι διαστημικοί ανιχνευτές μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη θέση τους. Η μία ομάδα αφορά σε ανιχνευτές πάνω σε δορυφόρους οι οποίοι ακολουθούν μία καθορισμένη τροχιά κοντά στη Γη, όπως π.χ. οι αποστολές IMP, GOES, SOHO, AMS κτλ. Η άλλη ομάδα αναφέρεται σε διαστημικές αποστολές οι οποίες εξερευνούν διαφορετικές περιοχές του ηλιακού συστήματος, όπως π.χ. οι αποστολές Pioneer, Voyager και Ulysses (Usoskin & Mursula, 2001).

## **β) Ανιχνευτές προσαρτημένοι σε μπαλόνια**

Τα σύγχρονα μπαλόνια επιτρέπουν τη μεταφορά ανιχνευτών σε ύψη 40 – 70 km. Συνήθως οι ανιχνευτές οι οποίοι μεταφέρονται με τα μπαλόνια είναι σχετικά μικροί και απλοί. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου αρκετά μεγάλα και πολύπλοκα τηλεσκόπια, όπως το BESS (Balloon Borne Experiment with Superconducting Solenoidal Spectrometer), πετάνε με τα μπαλόνια. Σε αυτά τα ύψη, η μάζα της υπερκείμενης ατμόσφαιρας θεωρείται αμελητέα και γι' αυτό οι ανιχνευτές αυτοί μπορούν να καταγράψουν σωμάτια της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι μοιάζουν με τους δορυφόρους χαμηλής τροχιάς, αλλά είναι πολύ πιο φτηνοί και πιο εύκολος ο χειρισμός τους (Usoskin & Mursula, 2001; <http://www.nmdb.eu>).

Ένας σημαντικός παράγοντας που επιδρά στις παρατηρήσεις με μπαλόνια είναι το κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας. Επιπλέον, από τους ανιχνευτές που είναι προσαρτημένοι σε μπαλόνια μετρώνται, επίσης και τα σωματίδια που ανακλώνται ή σκεδάζονται προς το διάστημα από την ατμόσφαιρα (ατμοσφαιρική λευκαύγεια, albedo) και επομένως πρέπει να ληφθούν υπόψη (<http://www.nmdb.eu>).

## **γ) Επίγειοι ανιχνευτές**

Οι επίγειοι ανιχνευτές κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το ποια συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταιγισμού καταμετρούν (βλ. Κεφ. III § 3.3). Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω (Usoskin & Mursula, 2001):

### **1) Σειρές ανιχνευτών εκτεταμένου καταιγισμού**

Κοσμικά σωματίδια πολύ υψηλής ενέργειας μπορούν να δημιουργήσουν εκτεταμένους καταιγισμούς. Τα σωματίδια αυτά εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αλληλεπιδρούν με τα μόριά της και παράγουν προϊόντα που φθάνουν στην επιφάνεια

της Γης χωρίς να έχουν χάσει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους (Παπαϊωάννου, 2007).

Προκειμένου να ανιχνευθούν εκτεταμένοι καταιγισμοί είναι αναγκαία η σύμπτωση αρκετών ανιχνευτών σωματιδίων που συνθέτουν μία σειρά από δεκάδες ή εκατοντάδες ανιχνευτές και διαχωρίζονται σε απόσταση 10 – 30 m. Οι ανιχνευτές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τους πολύ μεγάλους καταιγισμούς δισεκατομμυρίων σωματιδίων, πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε ένα δίκτυο του οποίου το μέγεθος του πλέγματος είναι της τάξης του 1 km (<http://www.nmdb.eu>). Κατά συνέπεια, το μέγεθος μίας σειράς ανιχνευτών καταιγισμού ποικίλει από εκατοντάδες μέτρα μέχρι δεκάδες χιλιόμετρα (Usoskin & Mursula, 2001). Τέτοια δίκτυα ανιχνευτών επιτρέπουν την καταμέτρηση της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργειες εύρους  $10^{12} - 10^{21}$  eV (<http://www.nmdb.eu>; Usoskin & Mursula, 2001).

Το πιο σημαντικό πείραμα που πραγματοποιείται και θα βοηθήσει στην κατανόηση του ενεργειακού φάσματος, της σύνθεσης και της ισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων υψηλών ενεργειών είναι το πείραμα Auger (<http://www.auger.org/>) (Παπαϊωάννου, 2007).

## 2) Ανιχνευτές Cherenkov

Τα σχετικιστικά ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια που παράγονται στον ατμοσφαιρικό καταιγισμό προκαλούν εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov στο ορατό όταν διαδίδονται μέσα σε μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός. Οι σειρές ανιχνευτών Cherenkov συλλέγουν αυτούς τους παλμούς φωτός από ένα πολύ μεγάλο όγκο (χιλιάδες κυβικά χιλιόμετρα). Μία παρόμοια τεχνική χρησιμοποιείται, επίσης, προκειμένου να μελετηθούν τα νετρίνα, μόνο που σε αυτή την περίπτωση οι παλμοί φωτός Cherenkov παράγονται και ανιχνεύονται στο νερό (π.χ. Deep Underwater Muon And Neutrino Detector – DUMAND) ή στον πάγο (π.χ. IceCube Neutrino Observatory or Antarctic Muon and Neutrino Detector Array – AMANDA) (Usoskin & Mursula, 2001; <http://www.nmdb.eu>).

### **3) Ανιχνευτές Μιονίων**

Οι ανιχνευτές μιονίων μετρούν την σκληρή ή μεσονική συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Τα τηλεσκόπια αυτά βασίζονται σε διπλές ή και τριπλές συστοιχίες ανιχνευτών Geiger – Müller, αναλογικών απαριθμητών ή σπινθηριστών (Παπαιωάννου, 2007; <http://www.nmdb.eu>).

Ο απαριθμητής Geiger – Müller είναι ευαίσθητος σε σωματίδια που έρχονται από οποιαδήποτε κατεύθυνση, για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατή η επιλογή ούτε κάποιου συγκεκριμένου προσανατολισμού ούτε του είδους του σωματιδίου. Η χρήση δύο ή περισσότερων ανιχνευτών Geiger – Müller με την εφαρμογή της μεθόδου της σύμπτωσης (όπου λαμβάνεται σήμα ταυτόχρονα από δύο ή περισσότερους μετρητικούς σωλήνες) προσφέρει τη δυνατότητα πραγματοποίησης πιο πολύπλοκων πειραμάτων, όπως π.χ. τη διάκριση μιονίων και τον προσδιορισμό της διεύθυνσης πρόσπτωσης. Επιτρέπει, επίσης, τον αποκλεισμό ανίχνευσης της γήινης ακτινοβολίας (<http://www.nmdb.eu>). Μειονεκτεί, όμως, στο ότι η απόδοση των ανιχνευτών μειώνεται λόγω του μειωμένου ρυθμού καταγραφής.

### **4) Μετρητές Νετρονίων**

Η αρχή λειτουργίας, η περιγραφή και τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος καταγραφής δίνονται λεπτομερώς στη συνέχεια (βλ. Κεφ. III § 3.3).

#### **δ) Υπόγεια πειράματα μιονίων**

Οι υπόγειοι ανιχνευτές μελετούν το κομμάτι εκείνο της συνιστώσας των μιονίων της κοσμικής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε υψηλές ενέργειες. Προκειμένου να διαχωρίσουν τα μόνια από άλλες συνιστώσες της κοσμικής ακτινοβολίας (εκτός από τα νετρίνα), οι ανιχνευτές αυτοί κάνουν χρήση της ικανότητας των μιονίων να διεισδύουν στην ύλη. Ο υπόγειος ανιχνευτής μιονίων μπορεί να είναι ή ένας ανιχνευτής ή να αποτελείται από μία μικρή σειρά ανιχνευτών.

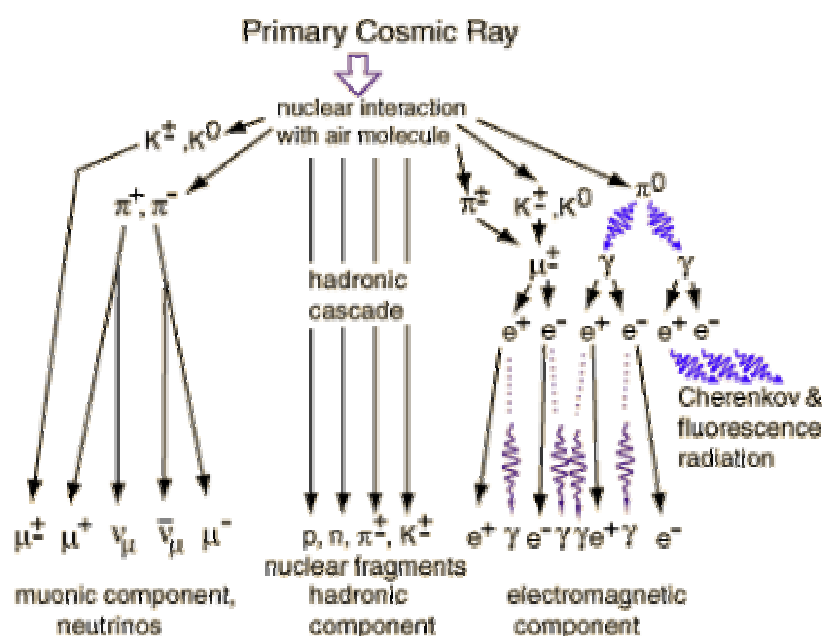
Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι τα ατμοσφαιρικά, τα ηλιακά και τα κοσμικά νετρίνα μπορούν να μελετηθούν υπογείως σε μεγάλα βάθη. Ωστόσο, το μέγεθος του ανιχνευτή πρέπει να είναι πολύ μεγάλο προκειμένου να αντισταθμίσει τη μικρή ενεργό διατομή των νετρίνων (Usoskin & Mursula, 2001; <http://www.nmdb.eu>). Αξίζει να αναφερθεί το KM3NeT, μία ευρωπαϊκή συνεργασία Γαλλίας, Ιταλίας και Ελλάδας, σύμφωνα με την οποία ένα τηλεσκόπιο νετρίνων τοποθετημένο στον βυθό της Μεσογείου θάλασσας θα δώσει νέες προοπτικές σε αυτού του είδους τις μελέτες (<http://www.km3net.org>).

### 3.3 Μετρητές νετρονίων

Η Γη επηρεάζεται από τις κοσμικές ακτίνες, δηλαδή τα φορτισμένα σωματίδια υψηλών ενεργειών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα περισσότερα σωματίδια έρχονται στο ηλιακό σύστημα από τον Γαλαξία, όπου ηλιακές εκλάμψεις και άλλες διαταραχές κινούμενες με τον ηλιακό άνεμο ενεργοποιούν σωματίδια στη διαδρομή τους (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Κοντά στη Γη η κύρια συνεισφορά οφείλεται στις κοσμικές ακτίνες που παράγονται από το ηλιακό σύστημα. Παρ' ότι όλα τα γρήγορα σωματίδια ανακλώνται από το γήινο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δρα σαν ένας θώρακας, τελικά σε μεγάλα πλάτη στις πολικές περιοχές (Baker, 1998), όπου το γήινο μαγνητικό πεδίο ενώνεται με το διαπλανητικό, φθάνουν ακόμη και σωματίδια χαμηλών ενεργειών. Τα πλέον ενεργητικά σωματίδια φθάνουν στο επίπεδο των νεφών (10km ύψος), ενώ μερικά άλλα φθάνουν και στο έδαφος ή δημιουργούν δευτερογενή σωματίδια μέσα στην ατμόσφαιρα.

Κατά τη διάρκεια ενός καταιγισμού στην ατμόσφαιρα της Γης παράγονται οι διαφορετικές συνιστώσες της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας (<http://www.nmdb.eu>). Αυτές είναι οι εξής: νουκλεονική (πρωτόνια και νετρόνια), μεσονική (μιόνια) και ηλεκτρομαγνητική (φωτόνια, ηλεκτρόνια) συνιστώσα (Σχ. 3.1). Για την καταγραφή και καταμέτρηση της δευτερογενούς συνιστώσας των κοσμικών ακτίνων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιούνται οι επίγειοι ανιχνευτές κοσμικής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υποκατηγορία των επίγειων ανιχνευτών οι οποίοι καταγράφουν τις μεταβολές της νουκλεονικής συνιστώσας της κοσμικής ακτινοβολίας, γνωστοί και ως μετρητές νετρονίων (neutron monitors, NMs).

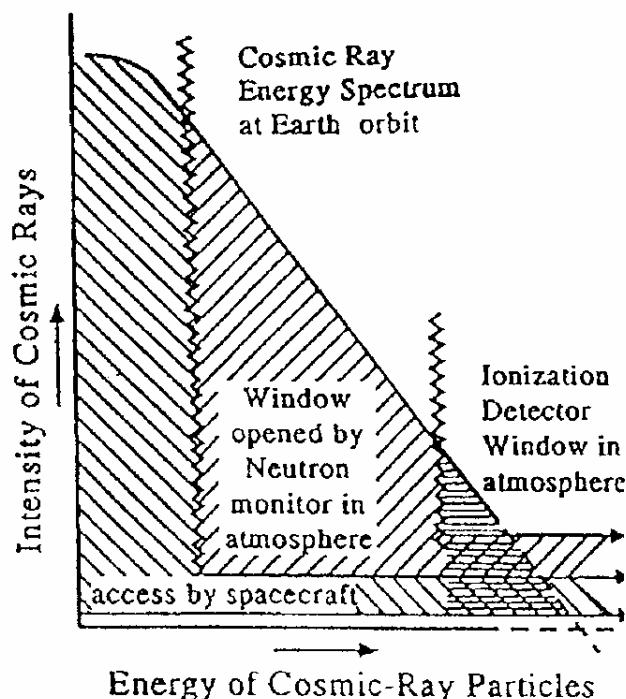
Οι μετρητές νετρονίων είναι σύγχρονα όργανα τοποθετημένα σε διαφορετικά σημεία πάνω στη Γη, τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας στην περιοχή του πρωτογενούς φάσματος των κοσμικών ακτίνων από 500 MeV μέχρι 20 GeV (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Σημαντικό είναι το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο μετρητής νετρονίων, αφού σε μεγάλα ύψη τα συγκεκριμένα όργανα καταγραφής έχουν μεγαλύτερο ρυθμό καταμέτρησης, διότι η ατμοσφαιρική απορρόφηση είναι μικρότερη (Παπαϊωάννου, 2007). Οι ενέργειες των σωματιδίων τα οποία καταγράφονται από τους μετρητές νετρονίων ξεκινούν από το άνω όριο της ενέργειας των ανιχνευτών κοσμικής ακτινοβολίας που υπάρχουν στους δορυφόρους (Σχ. 3.2) (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 3.1 Παράδειγμα ατμοσφαιρικού καταγισμού.

Ήδη από το 1953 (τύπος μετρητή νετρονίων του Simpson με ενεργό επιφάνεια περίπου  $2m^2$ ) και κυρίως κατά τη διάρκεια και μετά το International Geophysical Year 1957/1958, οι μετρητές νετρονίων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Αμέσως μετά το International Quiet Sun Year (1964/1965) έγινε ευρεία χρήση των μετρητών νετρονίων με μεγάλη ενεργό επιφάνεια (περίπου  $18m^2$  για 12 σωλήνες) σε πολλές περιοχές της Γης (Μανρομιχαλάκη et al., 2011). Μετά από σχεδόν πενήντα χρόνια λειτουργίας οι

μετρητές νετρονίων παραμένουν ένα σημαντικότατο εργαλείο για τη μέτρηση των μεταβολών της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας με δυσκαμψία μεγαλύτερη του ~1 GV στους μαγνητικούς πόλους και 15 GV στις ισημερινές περιοχές (Moraal et al., 2000; Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 3.2 Ενεργειακή περιοχή των μετρητών νετρονίων για την καταγραφή κοσμικής ακτινοβολίας (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Σχετικά με τα πλεονεκτήματα των μετρητών νετρονίων έναντι των δορυφόρων (Belon et al., 2004) πρέπει να αναφερθούν τα παρακάτω:

- α) ο υψηλός ρυθμός καταμέτρησης, συγκριτικά με τους ανιχνευτές στο διάστημα (Μαυρομιχαλάκη, 2005),
- β) η μεγάλη ενεργός επιφάνεια (μερικά τετραγωνικά μέτρα). Έτσι καθίσταται δυνατή η παρατήρηση πολλών μικρών και βραχυπρόθεσμων αλλαγών στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (μεγέθους 0.5% περίπου), οι οποίες δεν καταγράφονται από τους ανιχνευτές στο διάστημα (Μαυρομιχαλάκη, 2005; <http://www.nmdb.eu>),
- γ) το γεγονός ότι οι μετρητές νετρονίων δεν μπορούν να επηρεαστούν από έντονες εκρήξεις ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων, σε αντίθεση με τους ανιχνευτές που βρίσκονται στο διάστημα (McDonald, 2000; <http://www.nmdb.eu>),

δ) η μακρόχρονη αξιοπιστία τους (η οποία εγγυάται μεγάλες χρονοσειρές δεδομένων) και η αυτόματη απόκτηση των δεδομένων (Mavromichalaki et al., 2009a; 2011; <http://www.nmdb.eu>).

ε) το γεγονός ότι είναι τοποθετημένοι στο έδαφος, το οποίο καθιστά σχετικά εύκολη και οικονομική τη συντήρηση καθώς και την αναβάθμιση των συστημάτων τους (Παπαϊωάννου, 2007; Πλαϊνάκη, 2007)

στ) το χαμηλό κόστος (Mavromichalaki et al., 2009a)

### 3.3.1 Αρχή λειτουργίας μετρητών νετρονίων

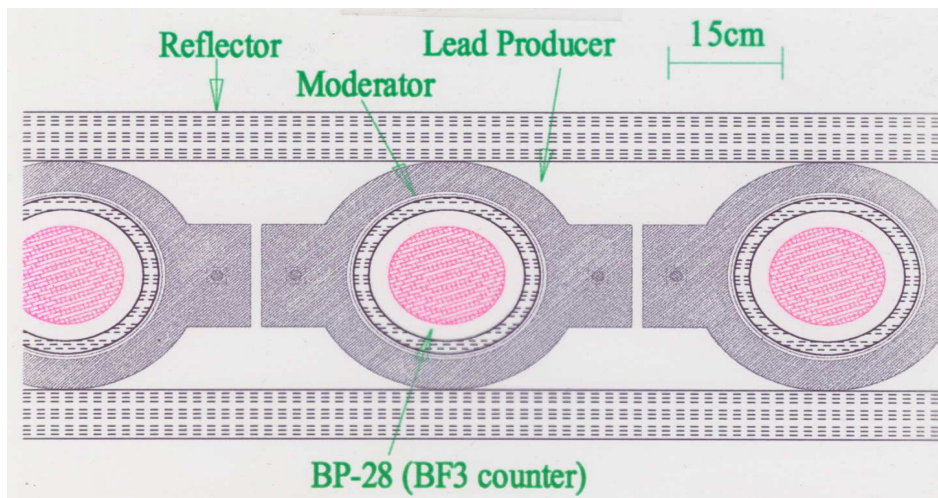
Υπάρχουν δύο τύποι μετρητών νετρονίων, ο IGY και ο NM64, των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 3.1. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 ο Simpson (1958) σχεδίασε τον IGY μετρητή νετρονίων. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε, κατά τη διάρκεια του International Geophysical Year (IGY) 1957/1958, για τη μελέτη των χρονικών μεταβολών της έντασης της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας για ενέργειες της τάξης των GeV κοντά στη Γη. Περίπου 10 χρόνια αργότερα, ο Carmichael (1964) σχεδίασε τον NM64 μετρητή νετρονίων. Πρόκειται για έναν μεγαλύτερο μετρητή με αυξημένο ρυθμό καταμέτρησης, ο οποίος ήταν και ο επίσημος επίγειος ανιχνευτής κοσμικών ακτίνων για το International Quiet Sun Year (IQSY) το 1964 (<http://www.nmdb.eu>).

*Πίνακας 3.1 Τα χαρακτηριστικά των μετρητών νετρονίων.*

<b>ΜΕΤΡΗΤΕΣ</b>	<b>IGY</b>	<b>NM64</b>
Ενεργό μήκος (cm)	86.4	191
Διάμετρος (cm)	3.8	14.8
Πίεση (bar)	0.60	0.27
<b>Επιβραδυντής</b>		
Υλικό	παραφίνη	πολυαιθυλένιο
Μέσο πάχος (cm)	3.2	2.0
<b>Παραγωγός σωματίων</b>		
Υλικό	μόλυβδος	μόλυβδος
Μέσο βάθος (g cm <sup>-2</sup> )	153	156
<b>Ανακλαστήρας</b>		
Υλικό	παραφίνη	πολυαιθυλένιο
Μέσο πάχος (cm)	28	7.5



Τα μέρη ενός μετρητή νετρονίων είναι τα ακόλουθα (<http://www.nmdb.eu>): α) αναλογικός μετρητής νετρονίων (gas – filled proportional counter), β) επιβραδυντής νετρονίων (moderator), γ) παραγωγός σωματίων (lead producer) και δ) ανακλαστήρας (reflector) σωματίων (Σχ. 3.3). Συνοπτικά, στους μετρητές νετρονίων οι ειδικοί αναλογικοί μετρητές αερίου περιβάλλονται από έναν επιβραδυντή, έναν παραγωγό (μόλυβδος) και τον ανακλαστήρα. Η προσπίπτουσα νουκλεονική συνιστώσα (πρωτόνια και νετρόνια) της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας προκαλεί πυρηνικές αντιδράσεις στον μόλυβδο, όπου παρατηρείται ‘εξάτμιση’ και παράγονται νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Αυτά τα νετρόνια με ενέργειες της τάξης των MeV επιβραδύνονται σε θερμικές ενέργειες από τον επιβραδυντή και στους μετρητές τύπου NM64 περίπου το 6% αυτών των νετρονίων τελικά καταγράφεται από τον αναλογικό μετρητή. Στο γεγονός ότι τελικά αυτά που καταγράφονται είναι τα νετρόνια οφείλεται και το όνομα αυτού του ανιχνευτή κοσμικών ακτίνων (<http://www.nmdb.eu>).



Σχ. 3.3 Σχηματική αναπαράσταση της δομής ενός μετρητή νετρονίων.

Παρακάτω ακολουθεί μία πιο αναλυτική περιγραφή κάθε τμήματος ενός μετρητή νετρονίων.

**α) Αναλογικός μετρητής αερίου**

Οι μετρητές νετρονίων πρέπει να είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να ανιχνεύουν ως επί το πλείστον νετρόνια. Τα ελεύθερα νετρόνια, όμως, δεν είναι δυνατόν να ionίσουν ή να διεγείρουν τα άτομα. Αλληλεπιδρούν με την ύλη, κυρίως, διαμέσου των συγκρούσεων τους με τα άτομα ή τους πυρήνες. Τα προϊόντα των πυρηνικών αντιδράσεων που πραγματοποιούν τα νετρόνια μέσω της διάχυσης (scattering) ή της απορρόφησης (absorption) είναι αυτά που έχουν φορτίο και έτσι μπορούν να ανιχνευτούν και να καταγραφούν. Καθοριστικής σημασίας για τους μετρητές αυτούς είναι η μικροσκοπική ενεργός διατομή ( $\sigma$ ) των πυρήνων, η οποία αποτελεί την ενεργό επιφάνεια ενός πυρήνα τη στιγμή που βομβαρδίζεται από το νετρόνιο κατά τη συγκεκριμένη αντίδραση. Εξαρτάται από το είδος του πυρήνα, όπως επίσης, και από την ενέργεια του προσπίπτοντος νετρονίου και εκφράζει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης των δύο τους.

Στην περίπτωση των αναλογικών μετρητών νετρονίων, προκειμένου να παρατηρήσει κανείς παλμούς πρέπει να πραγματοποιηθεί σημαντική ενίσχυση του σήματος. Κατά τη διάρκεια αύξησης της τάσης, τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια μπορούν να πραγματοποιήσουν ανελαστικές συγκρούσεις και να ionίσουν τα ουδέτερα άτομα της ύλης. Η ταχεία ενίσχυση διαμέσου των δευτερογενών ionισμών ονομάζεται χιονοστιβάδα (avalanche). Παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δευτερογενών γεγονότων που αντιστοιχούν σε κάθε πρωτογενές ion, ο αναλογικός μετρητής λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να θεωρεί ότι ο αριθμός των δευτερογενών γεγονότων είναι ανάλογος με τον αριθμό των πρωτογενών γεγονότων. Το ύψος του εξαγόμενου παλμού είναι ανάλογο της ενέργειας που εναποτίθεται διαμέσου της ακτινοβολίας που εκπέμπεται μετά τον πρωτογενή ionισμό. Η ενεργός αποδοτικότητα καταγραφής των νετρονίων (effective efficiency) εξαρτάται από την ενέργεια τους. Συγκεκριμένα, η αποδοτικότητα για την καταγραφή νετρονίων ενέργειας  $E$  σε έναν μετρητή πάχους  $d$ , ο οποίος περιέχει  $N$  άτομα ανά μονάδα όγκου υλικού απορροφητή ενεργού διατομής  $\sigma(E)$  είναι (Πλαϊνάκη, 2007):

$$Efficiency = f[1 - \exp(-N\sigma d)] \quad (3.1)$$

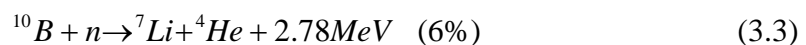
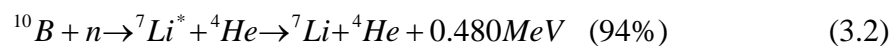
όπου ο όρος  $1 - \exp(-N\sigma d)$  δίνει το ποσοστό των πρωτογενών νετρονίων το οποίο απορροφάται από τον μετρητή, ενώ ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας  $f$  δίνει το ποσοστό αυτών των σωματιών που συνεισφέρει στον παλμό που εξέρχεται από τον ανιχνευτή. Στους μετρητές αερίου ο παράγοντας  $f$  είναι πολύ κοντά στην 1, με αποτέλεσμα η αποδοτικότητα τους να καθορίζεται αποκλειστικά από τον αριθμό των πυρήνων που απορροφούν τα νετρόνια στο πέρασμά τους μέσα από τον ανιχνευτή. Με κριτήριο την ενέργεια τους τα νετρόνια κατατάσσονται σε 6 κατηγορίες: ψυχρά, θερμικά, επιθερμικά, βραδέα, ενδιάμεσα και ταχέως κινούμενα νετρόνια, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2 (Kruger, 2006).

**Πίνακας 3.2** Κατηγοριοποίηση νετρονίων με κριτήριο την ενέργεια τους.

<b>Νετρόνια</b>	<b>Ενέργεια</b>
Ψυχρά	$< 0.025 \text{ eV}$
Θερμικά	$\approx 0.025 \text{ eV}$
Επιθερμικά	$\sim 1 \text{ eV}$
Βραδέα	$\sim 1 \text{ keV}$
Ενδιάμεσα	$\approx 100 - 500 \text{ keV}$
Ταχέα νετρόνια	$> 500 \text{ keV}$

Τα ψυχρά, τα θερμικά και τα επιθερμικά νετρόνια έχουν ενεργό διατομή πυρηνικής αλληλεπίδρασης ανάλογη της ποσότητας  $1/E^{1/2}$  ή  $1/v$ , όπου  $E$ ,  $v$  η ενέργεια και η ταχύτητα τους αντίστοιχα. Όταν τα νετρόνια υψηλής ενέργειας διαδίδονται μέσα από την ύλη, η ενέργεια τους ελαττώνεται εξαιτίας των συγκρούσεων που λαμβάνουν χώρα. Ύστερα από έναν αριθμό συγκρούσεων με πυρήνες, οι ενέργειες των νετρονίων γίνονται θερμικές, δηλαδή περίπου  $0.025 \text{ eV}$  στους  $20^\circ \text{ C}$ .

Για την ανίχνευση των νετρονίων χρησιμοποιείται το ισότοπο  $^{10}\text{B}$ . Οι ανιχνευτές των βραδέων και των θερμικών νετρονίων περιέχουν  $\text{BF}_3$  και η λειτουργία τους στηρίζεται στις αντιδράσεις (Hatton, 1971):



Όπως φαίνεται από την πρώτη αντίδραση το Li παράγεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό του σε διεγερμένη κατάσταση και κατόπιν αποδιεγείρεται εκλύοντας στο περιβάλλον ενέργεια 0.48 MeV. Το φυσικό βόριο ( $B$ ) αποτελείται κατά 20% από  $^{10}B$  και κατά 80% από  $^{11}B$ . Το  $^{10}B$  έχει μεγάλη ενεργό διατομή (3820 barns για θερμικά νετρόνια) συγκριτικά με το φυσικό βόριο, για το οποίο η αντίστοιχη τιμή είναι 755 barns ( $1 \text{ barns} \sim 10^{-24} \text{ cm}^2$ ). Επομένως, το να εμπλουτίσει κανείς το αέριο με ισότοπα  $^{10}B$  έχει ουσιαστική επίδραση στην αύξηση της αποδοτικότητας του ανιχνευτή. Οι μετρητές νετρονίων χρησιμοποιούν αναλογικούς μετρητές γεμισμένους με  $^{10}BF_3$  εμπλουτισμένο με  $^{10}B$  κατά 96% σε πίεση 0.25 atm, οι οποίοι ονομάζονται BP28 Chalk River Neutron Counters επειδή κατασκευάστηκαν στο Chalk River του Καναδά το 1959 (Hatton & Carmichael, 1964).

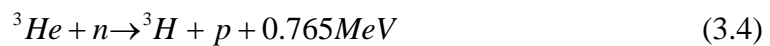
Η ενεργός διάμετρος για τους μετρητές IGY είναι μόλις το 0.225 της μέσης ελεύθερης διαδρομής των θερμικών νετρονίων μέσα στο βόριο. Αντιθέτως, για τους μετρητές Super NM-64 η ενεργός διάμετρος είναι το 0.375 της μέσης ελεύθερης διαδρομής των θερμικών νετρονίων μέσα στο βόριο. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά οι Hatton και Carmichael υπολόγισαν ότι οι μετρητές Super NM-64 είναι 1.37 πιο αποδοτικοί από τους μετρητές IGY (Hatton & Carmichael, 1964).

Καθώς ένα νετρόνιο αντιδρά με έναν πυρήνα  $^{10}B$ , παράγονται ενεργητικά ιόντα  $^4He$  και  $^7Li$ , τα οποία απορροφούν ηλεκτρόνια από τα ουδέτερα άτομα του μετρητή, παράγοντας φορτίο. Ένα λεπτό καλώδιο τοποθετημένο κατά μήκος του κεντρικού άξονα του μετρητή συνδέεται με έναν ενισχυτή και έναν διευκρινιστή (discriminator). Το φορτίο ανιχνεύεται από τον ενισχυτή και καταγράφεται ως μία μέτρηση.

Στους αναλογικούς ανιχνευτές το πλάτος των παραγόμενων παλμών ακτινοβολίας  $\gamma$  είναι σχετικά μικρό αν συγκριθεί με το πλάτος των παλμών που παράγεται από την ανίχνευση των νετρονίων. Περίπου το 6% των νετρονίων συλλαμβάνεται από τα άτομα του  $^{10}B$ . Εκ κατασκευής ο μετρητής νετρονίων επιβάλλει ένα όριο για την επίτευξη καταγραφής. Συγκεκριμένα, επιτυχής είναι η καταγραφή εκείνη για την οποία τα νετρόνια που εισέρχονται στον μετρητή έχουν ενέργεια που κυμαίνεται από 0.84 MeV μέχρι και 2.5 MeV (Παπαϊωάννου, 2007).

Υπάρχουν, επίσης, γεγονότα κατά τα οποία περισσότερα από ένα νετρόνια συλλαμβάνονται από τους μετρητές. Αν ο νεκρός χρόνος μεταξύ των καταγραφών είναι πολύ μικρότερος από τον μέσο χρόνο ζωής ενός νετρονίου τότε ένα σημαντικό ποσοστό της εισερχόμενης στον ανιχνευτή κοσμικής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει περισσότερα από ένα γεγονότα. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος ζωής ενός νετρονίου είναι 300  $\mu\text{s}$  ενώ ο νεκρός χρόνος καταγραφής είναι περίπου 20  $\mu\text{s}$ . Έτσι, κάθε γεγονός μπορεί και καταγράφεται χωριστά. Ο ρυθμός καταγραφής στους μετρητές νετρονίων προκύπτει ότι είναι μεγαλύτερος από την εμφάνιση στατιστικά ανεξάρτητων γεγονότων κοσμικής ακτινοβολίας (Hatton & Carmichael, 1964).

Μετά το 1990 στους αναλογικούς μετρητές αερίου κάποιων μετρητών νετρονίων έχει χρησιμοποιηθεί το  ${}^3\text{He}$ . Το αέριο αυτό δεν είχε χρησιμοποιηθεί νωρίτερα εξαιτίας του υψηλού οικονομικού του κόστους (Stoker et al., 2000). Η αντίστοιχη εξώθερμη αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι:



Η θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον είναι μικρότερη από αυτή στην περίπτωση των μετρητών  ${}^{10}\text{B}$ , όμως η ενεργός διατομή είναι μεγαλύτερη (~5330 barns για θερμικά νετρόνια). Το ήλιο μπορεί να βρίσκεται σε μεγάλη πίεση και η ηλεκτρική τάση να είναι αρκετά μικρή (μικρότερη από 1500 V στο ηλεκτρόδιο). Η απορρόφηση των νετρονίων σε έναν μετρητή ηλίου είναι μεγαλύτερη από ότι στην περίπτωση ενός μετρητή  ${}^{10}\text{BF}_3$  ίδιου μήκους σε ίδια πίεση, π.χ. για μετρητή μήκους 10 cm, σε πίεση 1 atm, η απορρόφηση είναι 75% για το  ${}^3\text{He}$  και 62% για το  ${}^{10}\text{BF}_3$  (Παπαϊωάννου, 2007). Πρόσφατα, η προσπάθεια εγκατάστασης μετρητών που χρησιμοποιούν  ${}^3\text{He}$  στην Ανταρκτική (Storini et al., 2009), αποδείχθηκε επιτυχής αφού κατάφεραν να καταγράψουν την ιδιαίτερη διακύμανση της έντασης των κοσμικών ακτίνων τον Ιούλιο 2005.

Οι αναλογικοί μετρητές αερίου είναι πιο αποδοτικοί για την περίπτωση θερμικών νετρονίων. Μπορούν, όμως, να σηματοδοτήσουν και την ύπαρξη ενεργητικών νετρονίων, αν περιβληθούν από ένα στρώμα υλικού που περιέχει

υδρογόνο, όπως παραφίνη (paraffin wax) ή πολυαιθυλένιο. Σε αυτή την περίπτωση οι ελαστικές κρούσεις των ενεργητικών νετρονίων με τους πυρήνες του υδρογόνου προκαλούν την επιβράδυνση τους μέχρι το όριο των θερμικών ενεργειών. Κατόπιν είναι δυνατόν να καταγραφούν, αποδοτικά, από τους μετρητές.

## β) Επιβραδυντής

Η διαδικασία με την οποία η ενέργεια ενός νετρονίου μειώνεται μέχρι να γίνει θερμική ονομάζεται θερμαλισμός (thermalisation) ή μετριασμός (moderation) (Πλαϊνάκη, 2007). Ένας καλός επιβραδυντής (moderator) ελαττώνει την ταχύτητα των νετρονίων μετά από έναν μικρό αριθμό συγκρούσεων και δεν τα απορροφά σε μεγάλο ποσοστό. Κάθε μετρητής αερίου σε έναν μετρητή νετρονίων περιβάλλεται από έναν εσωτερικό επιβραδυντή.

Ως επιβραδυντές χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά με χαμηλό ατομικό αριθμό  $A$  (συνήθως περιέχουν υδρογόνο ή παραφίνη ή νερό και πολυαιθυλένιο). Το ποσοστό ενεργειακής απώλειας ανά ελαστική κρούση νετρονίου – ατόμου ελαττώνεται καθώς αυξάνεται ο ατομικός αριθμός του υλικού:

$$\frac{dE}{E} = 4 \cos^2 \theta \frac{A}{(1+A)^2} \quad (3.5)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία ανάκρουσης του πυρήνα. Η αλληλεπίδραση κατά την κρούση μεταφέρει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του νετρονίου στον πυρήνα. Το μήκος της ελεύθερης διαδρομής μεταξύ δύο διαδοχικών ελαστικών κρούσεων ενός νετρονίου κινούμενου ανάμεσα σε πυρήνες υδρογόνου είναι  $\sim 1\text{cm}$  όταν η ενέργεια του είναι  $\leq 1\text{ MeV}$ . Ο μέσος αριθμός κρούσεων που απαιτείται για να θερμαλιστεί ένα νετρόνιο αρχικής κινητικής ενέργειας  $4\text{ MeV}$ , κινούμενο μέσα σε παραφίνη είναι 20. Το πάχος του επιβραδυντή παραφίνης, στην περίπτωση ενός μετρητή IGY, είναι  $3.7\text{cm}$ , ενώ του επιβραδυντή πολυαιθυλενίου, στην περίπτωση ενός μετρητή Super NM-64,  $2\text{cm}$ .

Προκειμένου να καταγράφονται από τον ανιχνευτή μεγάλες εντάσεις, είναι απαραίτητο να είναι αυξημένο το πλήθος των νετρονίων που φθάνει στον

επιβραδυντή και κατόπιν στον μετρητή αερίου. Για τον λόγο αυτό ο επιβραδυντής περιβάλλεται από ένα στρώμα το οποίο δρα ως παραγωγός σωματίων.

### γ) Παραγωγός σωματίων

Όταν υποατομικά σωματία, όπως πρωτόνια και νετρόνια, συγκρούονται ή αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα ενός ατόμου, π.χ. μολύβδου, τότε λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του θρυμματισμού (spallation). Ο πυρήνας του ατόμου εκπέμπει διάφορα δευτερογενή σωματία ανάμεσα στα οποία και πολλά νετρόνια. Η διαδικασία εκπομπής των νετρονίων πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά στάδια: α) σύγκρουση νουκλεονίου – νουκλεονίου μεταξύ των πρωτογενών σωματίων και των νουκλεονίων των πυρήνων – στόχων (target nuclei) και β) αποδιέγερση των θυγατρικών διεγερμένων πυρήνων.

Στην περίπτωση ενός μετρητή IGY ο παραγωγός σωματίων αποτελείται από κατακόρυφα τούβλα μολύβδου. Στην περίπτωση ενός μετρητή NM-64 μολύβδινοι σωλήνες περιβάλλουν τον μετρητή, ενώ μολύβι υπάρχει και μεταξύ των διαφορετικών μετρητών. Το υλικό αυτό επιλέχθηκε διότι έχει μεγάλο ατομικό αριθμό με αποτέλεσμα οι πυρήνες – στόχοι να είναι μεγάλοι προκαλώντας έτσι την παραγωγή πολλών νουκλεονίων εξάτμισης. Ο αριθμός παραγωγής των σωματίων είναι  $\sim A^{0.7}$  για νουκλεόνια αρχικής ενέργειας 100 – 700 MeV και ελαττώνεται για μεγαλύτερες ενέργειες (Clem & Dorman, 2000). Το μολύβι έχει, επίσης, σχετικά μικρή ενεργό διατομή θερμικής απορρόφησης ( $\sim 0.17$  barn).

Ο μέσος αριθμός νετρονίων με ενέργεια μέσα στο εύρος στο οποίο είναι ευαίσθητος ο ανιχνευτής τα οποία παράγονται ταυτόχρονα από τον θρυμματισμό ενός πυρήνα – στόχου από ένα νετρόνιο ονομάζεται πολλαπλότητα  $\nu$  (multiplicity). Σύμφωνα με τους Bieber et al. (2001) η πολλαπλότητα ακολουθεί νόμο δύναμης ως προς την ενέργεια του αρχικού νετρονίου:

$$\nu = 25E^{0.4}(\text{GeV}) \quad (3.6)$$

#### **δ) Ανακλαστήρας σωματίων**

Ένας μετρητής νετρονίων είναι απαραίτητο να προστατεύεται από το περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό ο παραγωγός σωματίων περικλείεται από έναν ανακλαστήρα ο οποίος απορροφά και ανακλά τα ανεπιθύμητα νετρόνια χαμηλής ενέργειας του περιβάλλοντος. Σκοπός του ανακλαστήρα είναι, επίσης, να μετριάξει τις ενέργειες των νετρονίων που ανακλά. Έτσι κατασκευάζεται από ένα υλικό που να περιέχει υδρογόνο, π.χ. παραφίνη ή πολυαιθυλένιο.

Ο ανακλαστήρας έχει σχήμα ορθογωνίου κουτιού, το οποίο περικλείει τα υπόλοιπα τμήματα του μετρητή. Στους μετρητές NM-64 χρησιμοποιείται το πολυαιθυλένιο, ενώ στους IGY η παραφίνη (Πίνακας 3.1)

#### **3.3.2 Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών**

Ο πρώτος Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας στην Αθήνα λειτούργησε για πρώτη φορά το 1970 με ένα μετρητικό σύστημα 3-NM64. Ήταν εγκατεστημένος στην οροφή του παλιού κτηρίου Φυσικής στο κέντρο της Αθήνας σε ύψος 40m. Ο σταθμός έπαψε να λειτουργεί το 1977, εξαιτίας διάφορων προβλημάτων που ανέκυψαν (<http://cosray.phys.uoa.gr>; Παπαϊωάννου, 2007).

Στις 10 Νοεμβρίου 2000 και μετά από πολλά χρόνια διακοπής, ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών μπήκε ξανά σε λειτουργία, παρέχοντας στο Τμήμα Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών έναν σύγχρονο σταθμό συνεχούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας (<http://cosray.phys.uoa.gr>). Ο νέος σταθμός (6-NM64) εγκαταστάθηκε στην Πανεπιστημιούπολη της Αθήνας και επεκτάθηκε σε έξι κανάλια. Η λειτουργία του, σύμφωνα με την πιο σύγχρονη τεχνολογία, οφείλεται στις συντονισμένες προσπάθειες των Ομάδων Κοσμικής Ακτινοβολίας του Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών (Επιστημονική Υπεύθυνος Καθ. Ε. Μαυρομιχαλάκη) και του Ινστιτούτου Γήινου Μαγνητισμού, Ιονόσφαιρας και Ραδιοκυμάτων της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών (Drs V. Yanke, A. Belon και E. Eroshenko).

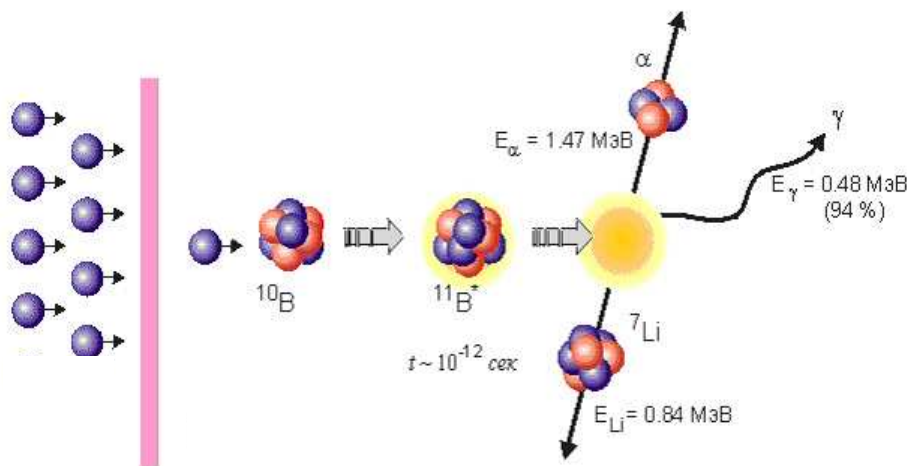




Σχ. 3.4 Ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (αριστερά) και η ανιχνευτική διάταξη (δεξιά).

Ο νέος σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας είναι τοποθετημένος σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτιρίου Φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη (Σχ. 3.4, αριστερά) σε ύψος 260 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Είναι μοναδικός στην περιοχή των Βαλκανίων και της Ανατολικής Μεσογείου. Έχει κατακόρυφο κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 8.53 GV, καλύπτοντας ένα μεγάλο ενεργειακό κενό από τον σταθμό της Ρώμης (6.32 GV) μέχρι τον σταθμό του ESOI (10.80 GV) (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Η λειτουργία του σταθμού είναι 24ωρη, οι μετρήσεις του έχουν ανάλυση 1hr, 1min και 1sec με το στατιστικό λάθος να είναι μικρότερο από 0.3% σε ωριαία δεδομένα, ενώ τα δεδομένα παρέχονται σε πραγματικό χρόνο στο διαδίκτυο (Mavromichalaki et al., 2001; Mavromichalaki et al., 2005b; <http://cosray.phys.uoa.gr>).

Το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από έξι αναλογικούς απαριθμητές τύπου BP28 Chalk River Canada (Σχ. 3.4, δεξιά) που περιέχουν  $^{10}\text{BF}_3$  εμπλουτισμένο με το ισότοπο  $^{10}\text{B}$ . Τα νετρόνια περνούν από πλάκες πολυαιθυλενίου και ειδική μολύβδινη θωράκιση που μετριάζει τις ενέργειές τους. Στη συνέχεια αντιδρούν με το τριφθοριούχο βόριο, δίνοντας διηγεργμένο λίθιο και σωματία  $\alpha$ . Η καταγραφή των σωματίων  $\alpha$  από τους απαριθμητές δίνει τη ροή των νετρονίων (Σχ. 3.5), αφού τα υπόλοιπα σωματίδια αποκόπτονται από τον διευκρινιστή του καταγραφικού συστήματος.

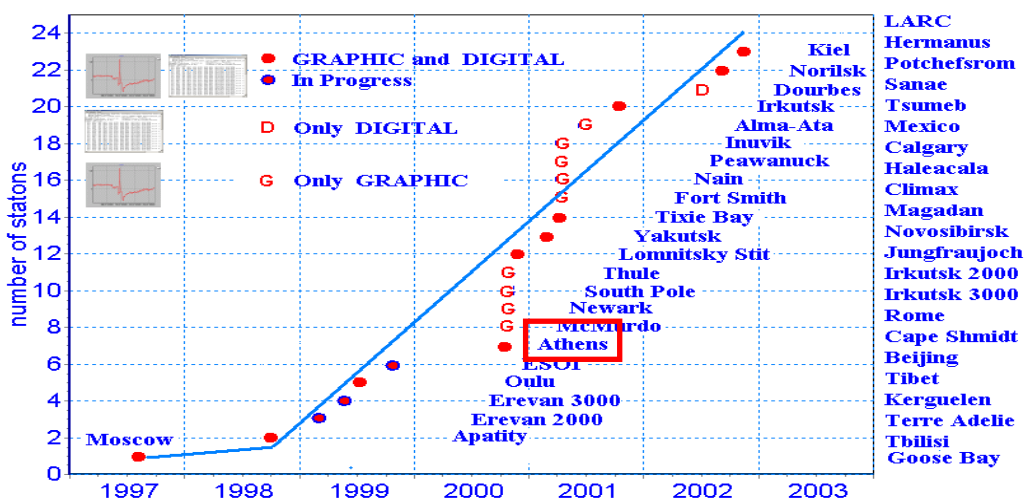


Σχ. 3.5 Αντίδραση καταγραφής των νετρονίων στους απαριθμητές του σταθμού  
(Μαυρομιχαλάκη, 2005).

Η παρουσίαση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η ταυτόχρονη επεξεργασία τους παρέχει την ευκαιρία για (Μαυρομιχαλάκη, 2005; Παπαϊωάννου, 2007):

- ❖ έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων
- ❖ απευθείας σύγκριση με άλλους σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας
- ❖ έλεγχο και διόρθωση των μεταβολών των οργάνων
- ❖ διόρθωση για μετεωρολογικούς παράγοντες
- ❖ αυτόματο έλεγχο όλων των καναλιών

Η σύγκριση των δεδομένων που προέρχονται από έναν ικανοποιητικό αριθμό σταθμών μεγάλης δυσκαμψίας, οι οποίοι μπορούν να παρέχουν εξαιρετικής ποιότητας δεδομένα, είναι απαραίτητη στη λεπτομερή μελέτη των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας αλλά και των συνθηκών του Διαστημικού καιρού. Ο σταθμός της Αθήνας είναι ο πρώτος μικρού πλάτους και ο έκτος ανάμεσα στο Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων (βλ. Κεφ. III § 3.4.2) που παρείχε δεδομένα πραγματικού χρόνου (Μανρομιχαλάκη et al., 2001) (Σχ. 3.6). Καθώς ο σταθμός αυτός συνδέθηκε με το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων με παροχή δεδομένων πραγματικού χρόνου, εκπληρώνει πλέον όλες τις σύγχρονες απαιτήσεις παρουσίασης δεδομένων και καθιστά εύκολη και άμεση τη χρήση τους στους διάφορους κλάδους της Διαστημικής έρευνας (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



Σχ. 3.6 Ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας είναι από τους πρώτους παγκοσμίως με τεχνολογία πραγματικού χρόνου (Μαυρομιχαλάκη, 2005).

### 3.4 Δίκτυα μετρητών νετρονίων

Κάθε μετρητής νετρονίων, ανάλογα με τη θέση του πάνω στη Γη, καταμετρά πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (μαγνητική δυσκαμψία και διεύθυνση). Πιο συγκεκριμένα το γεωμαγνητικό πεδίο καθορίζει (<http://www.nmdb.eu>):

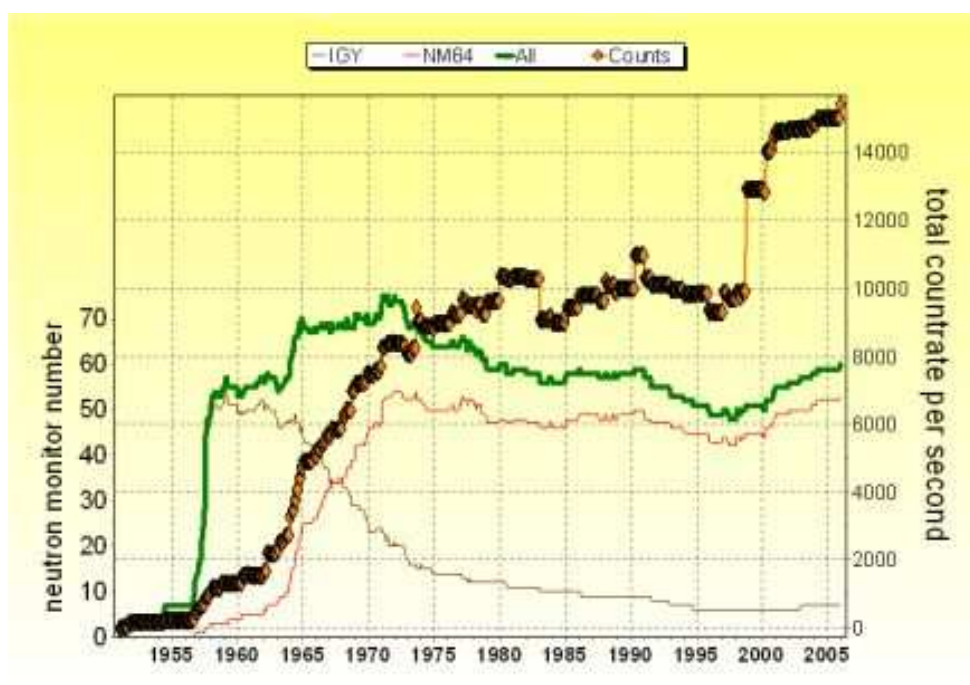
- ❖ έναν στενό κώνο διευθύνσεων, μέσα στον οποίο οι πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες πρέπει να προσκρούσουν πάνω στη μαγνητόσφαιρα ώστε να φθάσουν στον μετρητή νετρονίων και
- ❖ ένα χαμηλό κατώφλι δυσκαμψίας (βλ. Κεφ. IV § 4.2), κάτω από το οποίο τα σωματίδια που έρχονται από το διάστημα δεν μπορούν να φθάσουν στην ατμόσφαιρα πάνω από τον μετρητή νετρονίων (από ~1 GV στους μαγνητικούς πόλους έως 15 GV στις ισημερινές περιοχές).

Λόγω των παραπάνω γίνεται σαφές ότι, προκειμένου να προκύψει η ροή των φορτισμένων σωματιδίων που φθάνουν στη μαγνητόσφαιρα συναρτήσει της διεύθυνσης άφιξης και της δυσκαμψίας (ή της ενέργειας) είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός δικτύου σταθμών μετρητών νετρονίων που να είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικές τοποθεσίες, δηλαδή, ενός παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν και την ατμόσφαιρα της Γης και τη μαγνητόσφαιρα

προκύπτει ένα μοναδικό όργανο με ανάλυση ως προς τις διευθύνσεις και τις ενέργειες. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός σύμφωνα με τον οποίο οι μετρητές νετρονίων έχουν ιστορικά κατασκευαστεί, αποσκοπεί στη χρήση όλων των σταθμών σαν έναν πολυκατευθυντήριο ανιχνευτή, γεγονός που κάνει την ακρίβεια πιο υψηλή (< 0.1% για ωριαία δεδομένα) σε σχέση με ένα απλό όργανο (<http://www.nmdb.eu>).

### 3.4.1 Ιστορική αναδρομή

Τα παγκόσμια κέντρα δεδομένων (World Data Centers, WDCs) σε ΗΠΑ, Ρωσία και Ιαπωνία αποτελούν μία από τις πρώτες προσπάθειες δημιουργίας ενός δικτύου μετρητών νετρονίων (Παπαϊωάννου, 2007; Mavromichalaki et al., 2011). Συγκεκριμένα το World Data Center (WDC-B) δημιουργήθηκε στο IZMIRAN (Μόσχα) στις 15 Σεπτεμβρίου 1957. Εκεί, μέσω της ανταλλαγής δεδομένων, συγκεντρώνονταν τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων από όλο τον κόσμο. Ταυτόχρονα πραγματοποιούνταν προώθηση δεδομένων, τα οποία προέρχονταν από Σοβιετικούς σταθμούς και περιοχές στην Ευρώπη και την Ασία, σε βάσεις δεδομένων στην Αμερική (WDC-A) και την Ιαπωνία (WDC-C) (<http://www.nmdb.eu>).

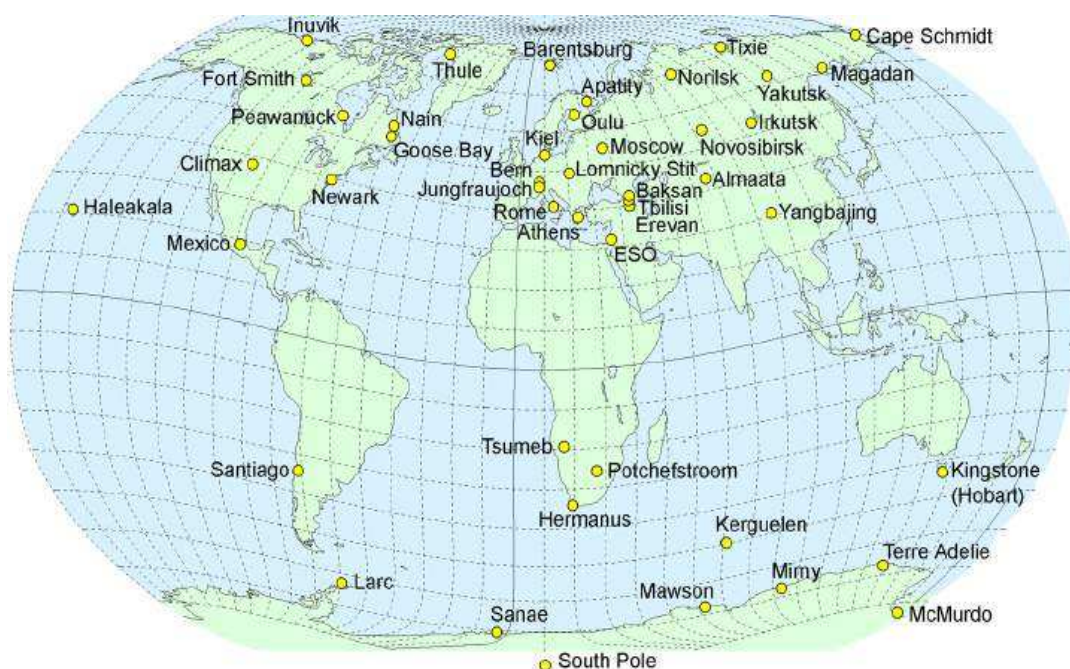


Σχ. 3.7 Χρονική εξέλιξη του αριθμού των σταθμών που εξοπλίστηκαν με μετρητές νετρονίων τύπου IGY ή NM64 και η εξέλιξη του ρυθμού καταμέτρησης (<http://www.nmdb.eu>).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. Κεφ. ΙΙΙ § 3.3.1) ο Carmichael (1964) κατασκεύασε έναν νέο τύπο μετρητή νετρονίων (NM64) με μεγαλύτερους μετρητές ώστε να αυξηθεί και η στατιστική ακρίβεια. Ως αποτέλεσμα, οι παλιοί σταθμοί εξοπλίστηκαν εκ νέου, ενώ νέοι μετρητές εγκαταστάθηκαν και σε νέους σταθμούς. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των σταθμών που εξοπλίστηκαν με μετρητές νετρονίων τύπου IGY ή NM64 και η εξέλιξη του ρυθμού καταμέτρησης.

### 3.4.2 Παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων

Το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων (Σχ. 3.8) απαρτίζεται από περίπου 60 σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται κατανεμημένοι σε όλη τη Γη. Θεωρείται ένα ισχυρό διαγνωστικό εργαλείο του φάσματος των κοσμικών ακτίνων στις χαμηλές πρωτογενείς ενέργειες, το οποίο χρησιμοποιεί το γήινο μαγνητικό πεδίο σαν φασματόμετρο (Μαυρομιχαλάκη, 2005; Παπαϊωάννου, 2007). Μετρητές με μεγάλο κατακόρυφο κατώφλι δυσκαμψίας, όπως ο μετρητής νετρονίων του Πανεπιστημίου Αθηνών, είναι λίγοι και πολύ χρήσιμοι για τη μελέτη του Διαστημικού Καιρού (Μαυρομιχαλάκη, 2005).



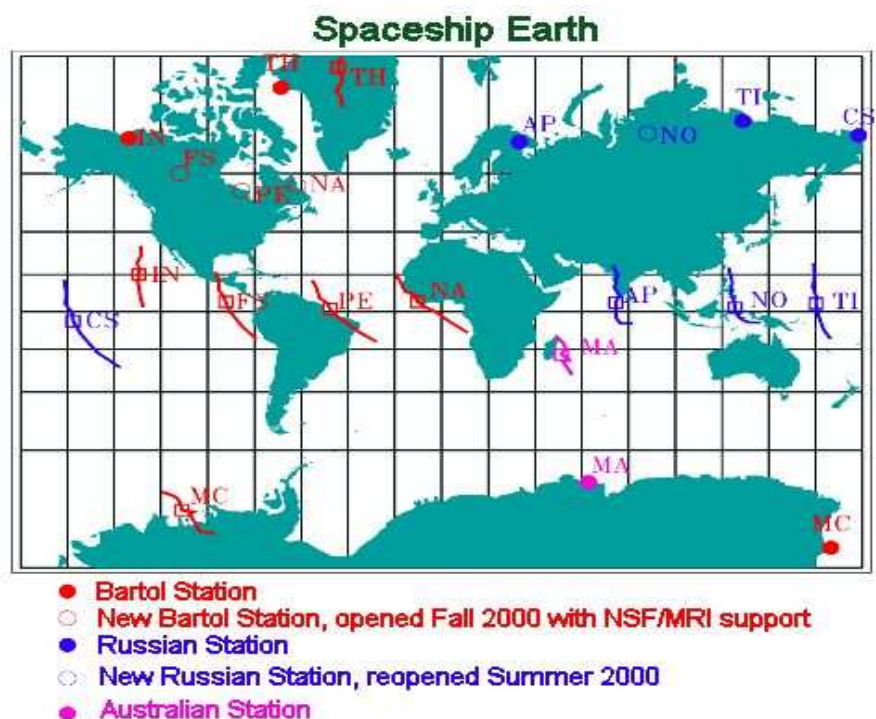
Σχ. 3.8 Παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων (<http://www.nmdb.eu>).

Μετά την ανάπτυξη της τεχνολογίας πραγματικού χρόνου στους μετρητές νετρονίων έγιναν προσπάθειες να συλλεχθούν και να γίνουν διαθέσιμα τα υψηλής ανάλυσης δεδομένα των μετρητών νετρονίων σε έναν διακομιστή. Ο Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας της Μόσχας ήταν ο πρώτος που έδωσε δεδομένα στο διαδίκτυο (Manromichalaki et al., 2011). Ένα νέο σύστημα συλλογής δεδομένων πραγματικού χρόνου αναπτύχθηκε από την ίδια ομάδα χρησιμοποιώντας μεθόδους τελευταίας τεχνολογίας (Belon et al., 2005a).

### 3.4.2.1 Παραδείγματα παγκοσμίων δικτύων μετρητών νετρονίων

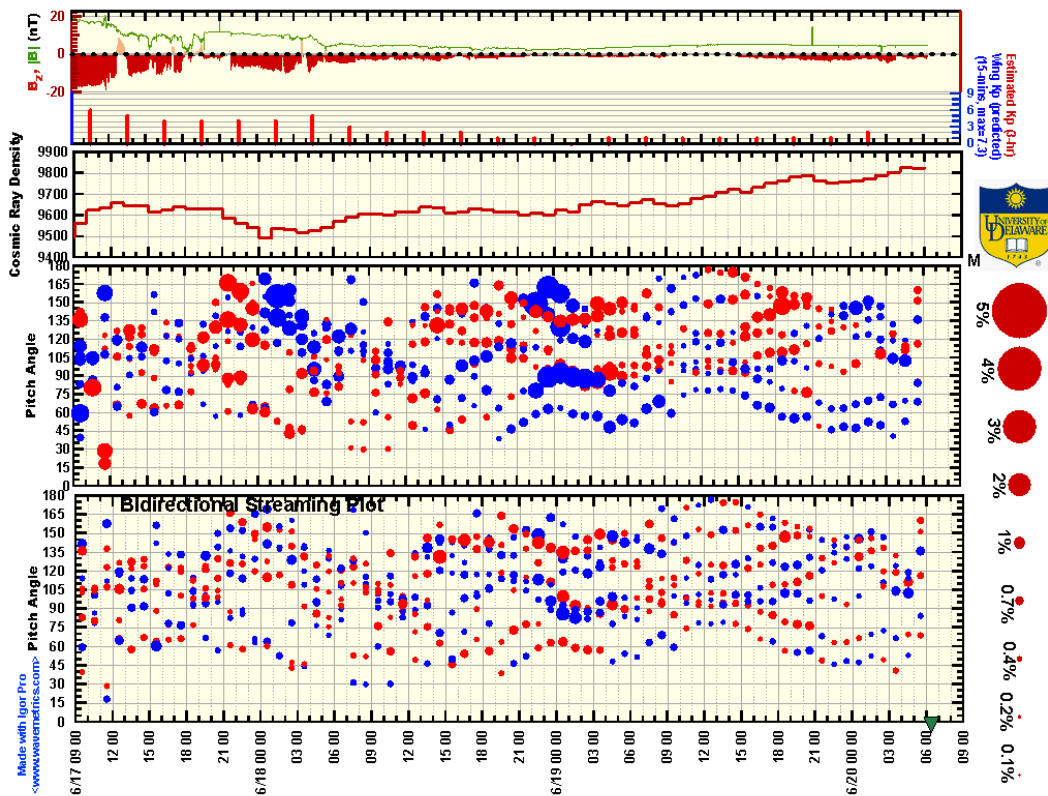
#### 3.4.2.1.1 Spaceship Earth

Τα πρώτα βήματα στη διαδικασία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων από έναν αριθμό σταθμών σε πραγματικό χρόνο έγιναν από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Bartol στα πλαίσια του προγράμματος Spaceship Earth (<http://neutronm.bartol.udel.edu/>).



Σχ. 3.9 Η γεωγραφική κατανομή των σταθμών του δικτύου Spaceship Earth (<http://neutronm.bartol.udel.edu/>).

Επειδή οι σταθμοί κοσμικής ακτινοβολίας που βρίσκονται σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη προσφέρουν μία εξαιρετική δυνατότητα μελέτης των γεγονότων της κοσμικής ακτινοβολίας, γι' αυτό και οι Bieber και Evenson (1995) πρότειναν την ιδέα κατασκευής ενός δικτύου μετρητών νετρονίων με την ονομασία 'Spaceship Earth'. Το συγκεκριμένο παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων αριθμεί 11 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9 (Inuvik – Canada, Fort Smith – Canada, Peawanuck – Canada, Nain – Canada, Mawson – Antarctica, Apatity – Russia, Norilsk – Russia, Tixie Bay – Russia, Cape Schmidt – Russia, Thule – Greenland, McMurdo – Antarctica) οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη σε 4 διαφορετικές χώρες και διακρίνονται από την ευνοϊκότερη κατευθυντική ευαισθησία (Σχ. 3.10).



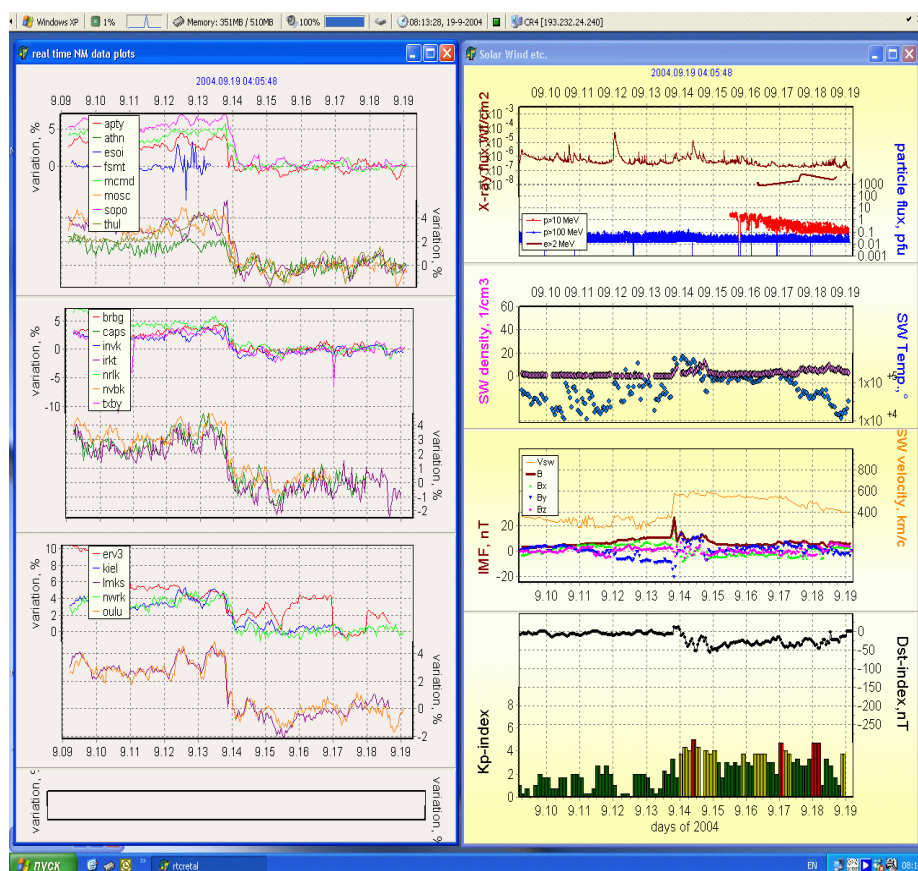
Σχ. 3.10 Γραφική απεικόνιση από το δίκτυο Spaceship Earth (<http://neutronm.bartol.udel.edu/>).

Το παρόν δίκτυο αποτελεί μία συνεργασία (Πλαϊνάκη, 2007) μεταξύ των ΗΠΑ (Bartol Research Institute, University of Delaware), της Ρωσίας (IZMIRAN,

Polar Geophysical Institute, Institute Solar – Terrestrial Physics, Institute Cosmophysical Research and Aeronomy, Institute Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation), της Αυστραλίας (Australian Antarctic Division) και του Καναδά (Aurora College).

### 3.4.2.1.2 Athens Neutron MOnitor DAta Processing Center

Στην Αθήνα δημιουργήθηκε το Cosmic Ray Data Processing Center (ANMODAP) με σκοπό να παρέχει δεδομένα των μεταβολών της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας πραγματικού χρόνου από μετρητές νετρονίων ευρέως καταναμημένους σε όλη τη Γη (Mavromichalaki et al., 2005a; 2009a). Το συγκεκριμένο δίκτυο περιελάμβανε 21 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας πραγματικού χρόνου, με διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και δυσκαμψίες, όπως επίσης και δορυφορικές μετρήσεις από μετρητικές συσκευές (Σχ. 3.11), όπως ο ACE και οι GOES (Mavromichalaki et al., 2005a; b).



Σχ. 3.11 Γραφική απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων του ANMODAP Center (αριστερά) και των δορυφορικών δεδομένων (δεξιά) (<http://www.cosray.phys.uoa.gr>).



Αυτό το κέντρο επιτρέπει την πρόσβαση στα δεδομένα του δικτύου μετρητών νετρονίων σε πραγματικό χρόνο και τη χρήση του λογισμικού το οποίο παρακολουθεί τις επιπτώσεις της ηλιακής δραστηριότητας στο γήινο περιβάλλον σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (Mavromichalaki et al., 2004; Dorman et al., 2004). Έκανε για πρώτη φορά δυνατή τη χρήση δεδομένων των μετρητών νετρονίων στην εξερεύνηση του διαστημικού περιβάλλοντος (Παπαϊωάννου, 2007).

Η έξοδος ενός τέτοιου συστήματος που συγκεντρώνει και αναλύει ταυτόχρονα δεδομένα μετρητών νετρονίων από όλο τον κόσμο πρέπει να παρέχει (Μαυρομιχαλάκη, 2005):

- α) Τα κύρια χαρακτηριστικά των μεταβολών των κοσμικών ακτίνων (ένταση, διακύμανση, ενεργειακό φάσμα και ανισοτροπία).
- β) Πρόγνωση μερικών ωρών των αλλαγών των χαρακτηριστικών των κύριων γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων.
- γ) Πρόγνωση για την άφιξη στη Γη πιθανών κρουστικών κυμάτων και διαταραχών του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.
- δ) Εκτίμηση της αλλαγής του καταφλίου της μαγνητικής δυσκαμψίας σε διαφορετικούς σταθμούς κατά τη διάρκεια μεγάλης γεωμαγνητικής καταιγίδας για την αποτίμηση καταστροφών στα ύψη που κινούνται οι δορυφόροι.
- ε) Εντοπισμό μη φυσιολογικών διακυμάνσεων της κοσμικής ακτινοβολίας που καταγράφηκαν από ανιχνευτές επιφανείας.
- στ) Παραγωγή σήματος συναγερμού για τα GLEs, αποτίμηση του φάσματος των κοσμικών ακτίνων και υπολογισμό των κύριων παραμέτρων πρόγνωσης.

#### **3.4.2.1.3 Βάση δεδομένων NMDB**

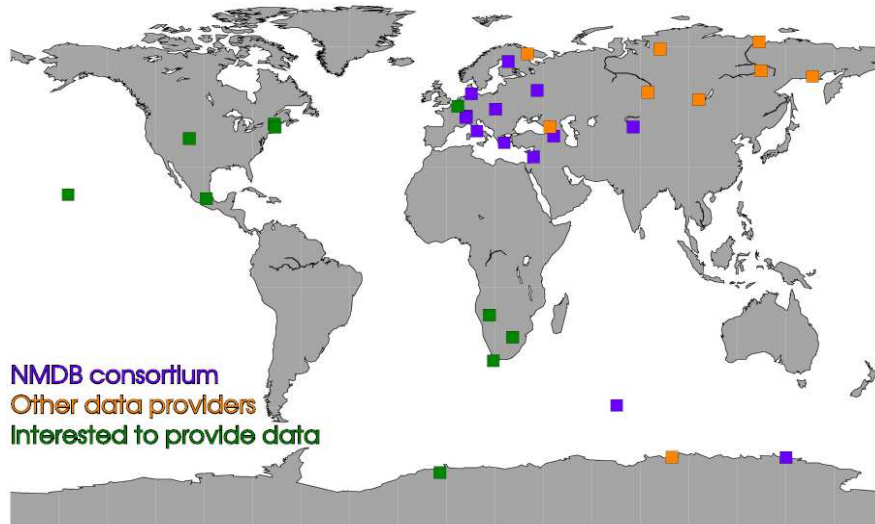
Πρόσφατα στα πλαίσια του FP7 της Ευρωπαϊκής Ένωσης πραγματοποιήθηκε η Υψηλής Ανάλυσης Βάση Μετρητών Νετρονίων σε πραγματικό χρόνο, High Resolution Real Time Neutron Monitor Database – NMDB (Σχ. 3.12), με τη συνεργασία 12 (Γερμανία, Σλοβακία, Φιλανδία, Ελβετία, Ισπανία, Ρωσία, Γαλλία, Ελλάδα, Αρμενία, Ιταλία, Καζακστάν, Ισραήλ) διαφορετικών χωρών (Steigies et al., 2008a; b; Mavromichalaki et al., 2011). Η βάση δεδομένων περιέχει δεδομένα από 18 μετρητές νετρονίων, οι οποίοι είναι κατανομημένοι σε όλο τον κόσμο και λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο (Σχ. 3.13, 3.14).



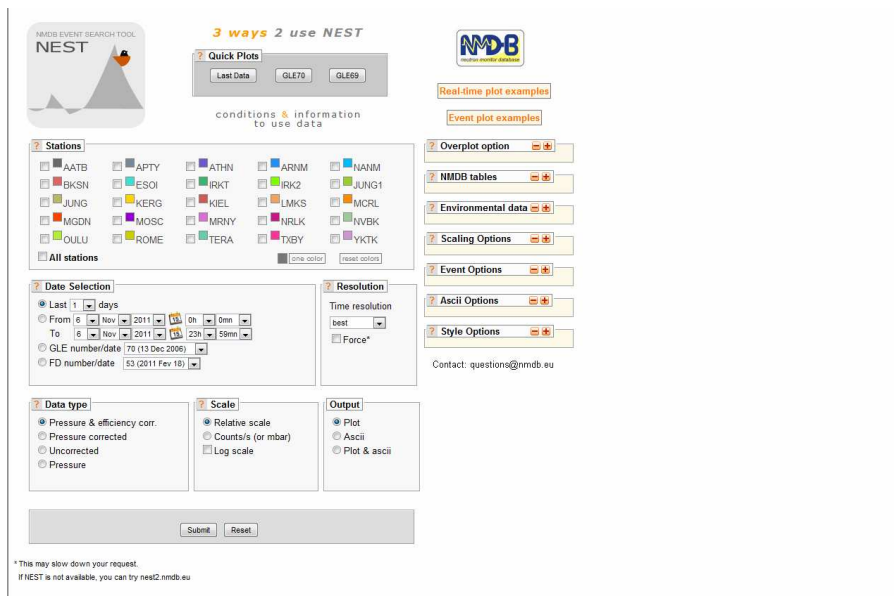
Σχ. 3.12 Η ιστοσελίδα του NMDB.

Ο κύριος σκοπός αυτού του εγχειρήματος είναι η ανάπτυξη μίας ευέλικτης βάσης δεδομένων που μπορεί να αξιοποιηθεί εύκολα στη χρήση εφαρμογών. Το NMDB έπρεπε να ξεπεράσει τέσσερις σημαντικές προκλήσεις (Manromichalaki et al., 2011):

- α) ο σχεδιασμός μίας βάσης που θα μπορούσε να φιλοξενήσει δεδομένα ανάλυσης 1min και 1hr σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με παλαιότερα δεδομένα, ώστε να αποτελεί ένα χρήσιμο και ολοκληρωμένο εργαλείο.
- β) ο συντονισμός μεταξύ όλων των προμηθευτών δεδομένων, αφού οι περισσότεροι μετρητές νετρονίων δεν ήταν συγχρονισμένοι.
- γ) η ανάπτυξη εργαλείων χρήστη ώστε τα δεδομένα από κάθε μετρητή νετρονίων να φορτώνονται στη βάση δεδομένων και στη συνέχεια οι χρήστες να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα του NMDB.
- δ) ο υπολογισμός παραμέτρων από τα δεδομένα μετρητών νετρονίων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (χαρακτηριστικά κοσμικών ακτίνων στο διάστημα κοντά στη Γη, ρυθμός ιονισμού της ατμόσφαιρας, ρυθμός ραδιενεργής δόσης) για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών.



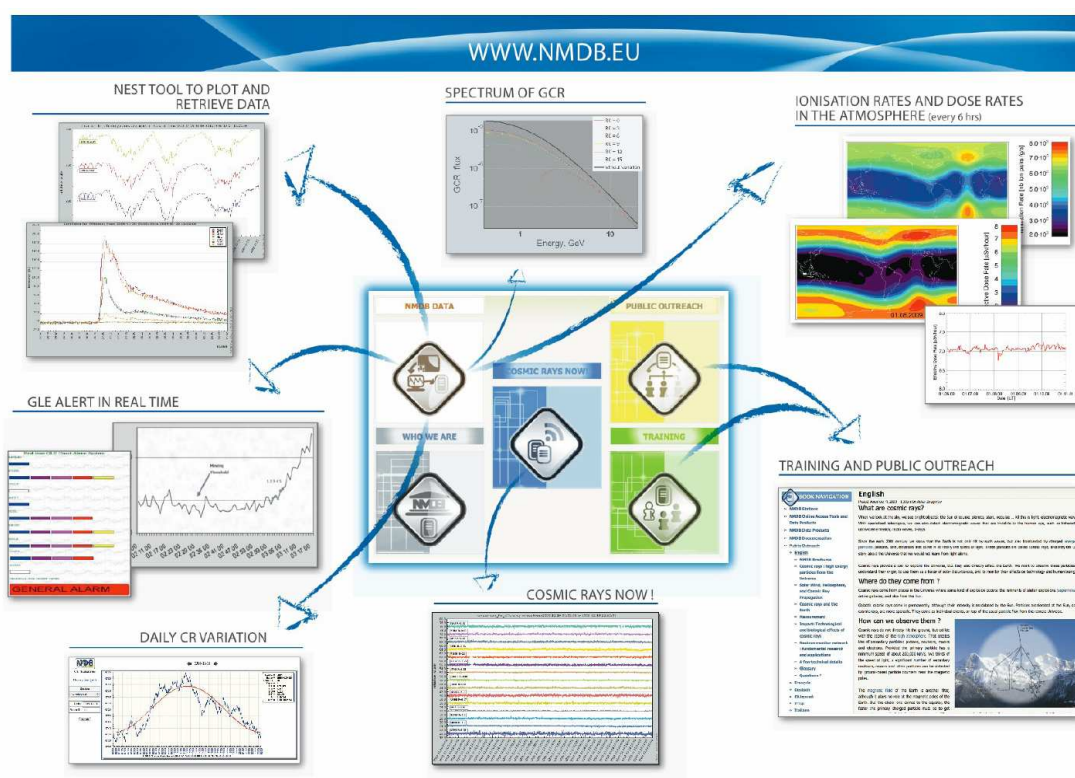
Σχ. 3.13 Η χωρική κατανομή των μετρητών νετρονίων του NMDB (Klein et al., 2009).



Σχ. 3.14 Η ιστοσελίδα του NMDB για την ηλεκτρονική αναζήτηση μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από διάφορους σταθμούς (<http://www.nmdb.eu>).

Η δημιουργία αυτής της βάσης παρέχει τη δυνατότητα να εκτελεστούν πολλές επιστημονικές εφαρμογές και αρκετές από αυτές σε πραγματικό χρόνο (Σχ. 3.15). Μεταξύ αυτών ιδιαίτερης σημασίας είναι η εφαρμογή ALERT, όταν επικίνδυνα ηλιακά κοσμικά σωματίδια κατευθύνονται προς τη Γη και δημιουργούν επίγειες

επαυξήσεις κοσμικής ακτινοβολίας (GLEs), όπως καταγράφονται από τους μετρητές νετρονίων. Επιπλέον, η χαρτογράφηση όλων των χαρακτηριστικών των επίγειων επαυξήσεων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο θα παράσχει μία ολοκληρωμένη εικόνα αυτών των φαινομένων και θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του ιονισμού της ατμόσφαιρας. Το τελευταίο μαζί με άλλους υπολογισμούς σχετικά με δόσεις ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα σε διάφορα ύψη θα αποτελέσουν τη βάση για τον υπολογισμό της απορροφούμενης δόσης κατά τη διάρκεια πτήσεων. Ακόμη, ειδικοί αλγόριθμοι για την ανισοτροπία και τη γωνιακή κατανομή των ηλιακών κοσμικών ακτίνων, οι οποίοι αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια, παρέχονται στο διαδίκτυο με το πλεονέκτημα ότι παρέχουν πληροφορίες για τις συνθήκες που επικρατούν στον διαπλανητικό χώρο (Mavromichalaki et al., 2011).



Σχ. 3.15 Οι δυνατότητες που παρέχει η βάση NMDB  
 ([http://www.nmdb.eu/sites/default/files/NMDB\\_Brochure\\_4.pdf](http://www.nmdb.eu/sites/default/files/NMDB_Brochure_4.pdf)).

Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης των μειώσεων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, μειώσεις Forbush, όπως επίσης και ένας σημαντικός αριθμός

παραμέτρων, όπως η ανισοτροπία των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (Mavromichalaki et al., 2011).

### **3.4.3 Δίκτυα μετρητών νετρονίων και έρευνα**

Στη συνέχεια περιγράφονται οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους χρειάζεται να εγκατασταθούν μετρητές νετρονίων σε διαφορετικά σημεία πάνω στη Γη και να δημιουργηθούν δίκτυα.

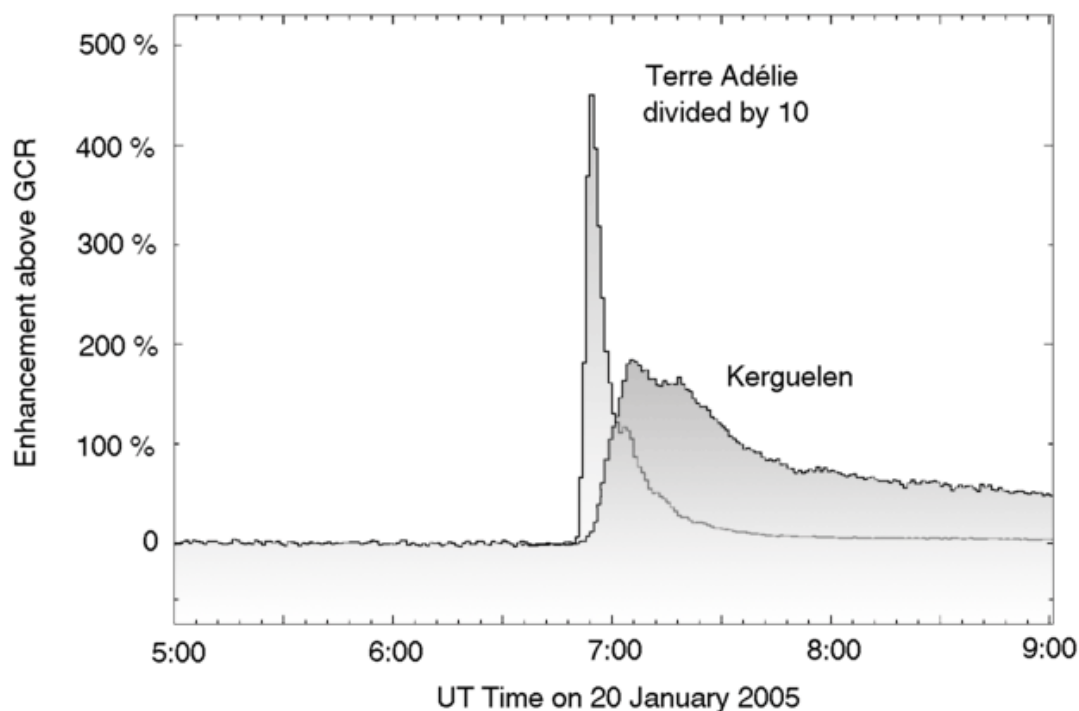
#### **α) Μελέτη της μακρόχρονης διαμόρφωσης**

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες διαμορφώνονται από την ηλιακή δραστηριότητα και σαν αποτέλεσμα σημειώνεται το φαινόμενο του 11ετούς ηλιακού κύκλου. Έχει παρατηρηθεί ότι ο ρυθμός καταμέτρησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε κάθε σταθμό ποικίλει ανάλογα με τον ηλιακό κύκλο και την θέση του πάνω στη Γη. Συνεπώς, η έρευνα για την προέλευση αυτού του φαινομένου δεν είναι δυνατόν να βασιστεί στον ρυθμό καταμέτρησης ενός μόνο μετρητή νετρονίων, αφού κάθε μετρητής είναι ευαίσθητος στις πρωτογενείς κοσμικές ακτίνες πάνω από ένα χαμηλό κατώφλι δυσκαμψίας (ή ενέργειας), το οποίο εξαρτάται από τη θέση του πάνω στη Γη και κυρίως το πλάτος στο οποίο βρίσκεται. Αντιθέτως, πρέπει να συνδυαστούν δεδομένα από σταθμούς σε διαφορετικά πλάτη, από τους πολικούς μέχρι αυτούς που βρίσκονται στον ισημερινό (<http://www.nmdb.eu>). Στο σχήμα 2.2 (βλ. Κεφ. II § 2.3), δίνεται η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για δυσκαμψία 10 GV (κινητική ενέργεια 9 GeV) που έχει υπολογιστεί στο όριο της τμόσφαιρας από το σύνολο των μετρητών νετρονίων και συγκρίνεται με την εξέλιξη του αριθμού των κηλίδων κατά τη διάρκεια αρκετών δεκαετιών.

#### **β) Διεύθυνση άφιξης κοσμικών σωματιδίων**

Προκειμένου να μελετηθούν οι ανισοτροπίες που σχετίζονται με παροδικά γεγονότα κοσμικών ακτίνων, όπως γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων ή γεγονότα Forbush, είναι απαραίτητο ένα δίκτυο μετρητών νετρονίων, οι οποίοι να είναι τοποθετημένοι σε υψηλά πλάτη. Σε περίπτωση που οι σταθμοί είναι

τοποθετημένοι σε συγκρίσιμα γεωμαγνητικά πλάτη, οι ενδεχόμενες διαφορές που παρουσιάζουν στον ρυθμό καταμέτρησης θα οφείλονται στη διαφορετική διεύθυνση άφιξης των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων και όχι στο κατώφλι δυσκαμψίας τους, το οποίο θα είναι, επίσης, παρόμοιο.

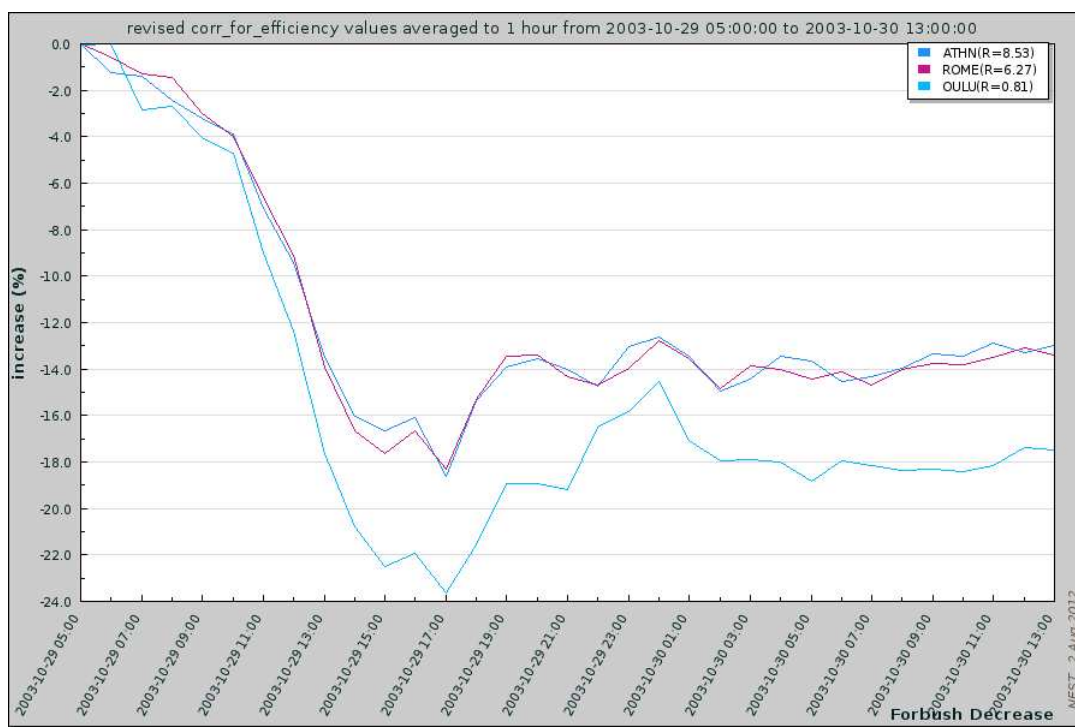


Σχ. 3.16 Το GLE69, όπως έχει καταγραφεί από τους σταθμούς Terre Adélie και Kerguelen Island (<http://www.nmdb.eu>).

Κάτι τέτοιο παρατηρείται και στο γεγονός της επίγειας επαύξησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της 20<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005 (GLE69) όπως καταγράφηκε από 2 μετρητές νετρονίων με παρόμοιες δυσκαμψίες κατωφλίου. Η αρχική κορυφή είναι πολύ πιο έντονη (~ 4500%) στον σταθμό Terre Adélie (TERA), παρά στον σταθμό στο Kerguelen Island (KERG) (~ 200%), γιατί κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου γεγονότος τα πρώτα ενεργητικά σωματίδια προσέκρουσαν στη γήινη μαγνητόσφαιρα νότια, λόγω ενός ασυνήθιστου προσανατολισμού του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (<http://www.nmdb.eu>).

Ένα άλλο παράδειγμα αφορά στη μείωση Forbush της 29<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2003 από τους μετρητές νετρονίων σε Αθήνα (ATHN), Ρώμη (ROME) και Oulu (OULU).

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.17, το γεγονός παρουσιάζει μέγιστο πλάτος (24%) στον σταθμό OULU, που βρίσκεται σε υψηλό γεωγραφικό πλάτος (65.05°N), ενώ προοδευτικά μειώνεται, 19% και 18%, στους σταθμούς ATHN (37.58° N) και ROME (41.86°N) αντίστοιχα, δηλαδή σε σταθμούς που βρίσκονται σε μέσα γεωγραφικά πλάτη (Παπαιωάννου, 2012).



Σχ. 3.17 Η Μείωση Forbush της 29<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2003,

όπως έχει καταγραφεί από τους σταθμούς ATHN, ROME και OULU (<http://www.nmdb.eu>).

### 3.4.4 Δίκτυα μετρητών νετρονίων και εφαρμογές

Μία σημαντική εφαρμογή των δικτύων μετρητών νετρονίων είναι η χρήση τους στην εξαγωγή των συναγερμών διαστημικού καιρού, αφού συνδέονται με ηλιακά ενεργητικά σωματίδια ή στεμματικές εκτινάξεις μάζας που κατευθύνονται προς τη Γη.

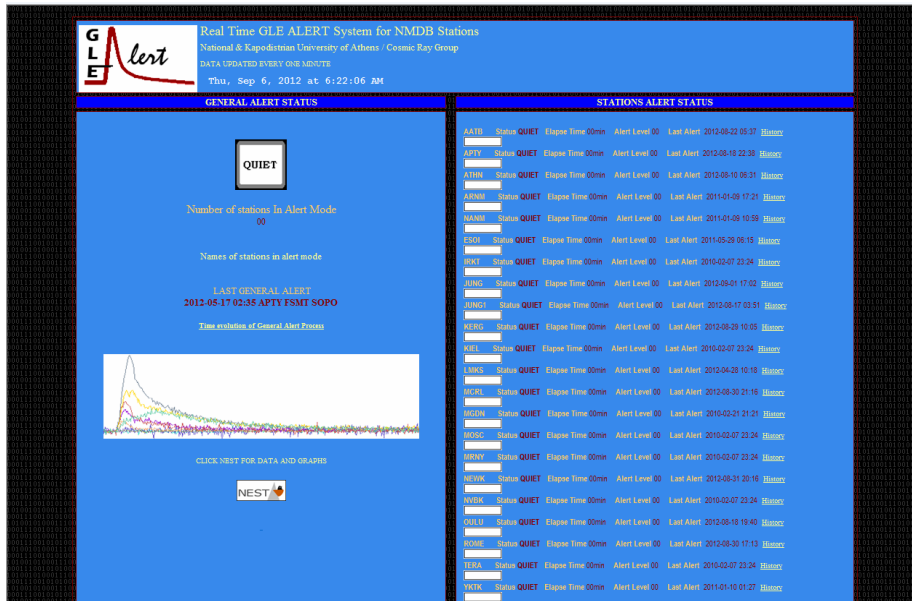
### **α) Συναγερμοί ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων**

Αποτέλεσμα των εκρηκτικών γεγονότων στον Ήλιο είναι η παραγωγή ενεργητικών σωματιδίων (solar energetic particles, SEP). Εκτός από τα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας, τα πιο γρήγορα σωματίδια που θα φθάσουν στη Γη κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος είναι τα ηλιακά πρωτόνια κοσμικών ακτίνων και πιθανώς τα νετρόνια. Αυτά από μόνα τους δεν αποτελούν σημαντική απειλή, αφού ο αριθμός τους είναι σχετικά μικρός. Σηματοδοτούν, όμως, την άφιξη ενός μεγάλου αριθμού πρωτονίων και ιόντων χαμηλής ενέργειας, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό πρόβλημα στα μικροηλεκτρονικά συστήματα δορυφόρων, διαστημοπλοίων και αεροπλάνων, όπως επίσης και παρεμβολές σε ραδιοεπικοινωνίες στις πολικές περιοχές καθώς και βιολογικές επιδράσεις σε επανδρωμένες διαστημικές πτήσεις και αεροπορικά ταξίδια που εκτελούνται σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη (βλ. Κεφ. VII § 8.2). Και αφού η παραγωγή των ηλιακών κοσμικών ακτίνων συνδέεται πάντα με μεγάλα γεγονότα, όπου ο αριθμός πρωτονίων και ιόντων χαμηλών ενεργειών είναι από τους πλέον αυξημένους, είναι δυνατή η χρήση των δικτύων μετρητών νετρονίων για την ανάπτυξη προειδοποιητικών συστημάτων πραγματικού χρόνου (<http://www.nmdb.eu>).

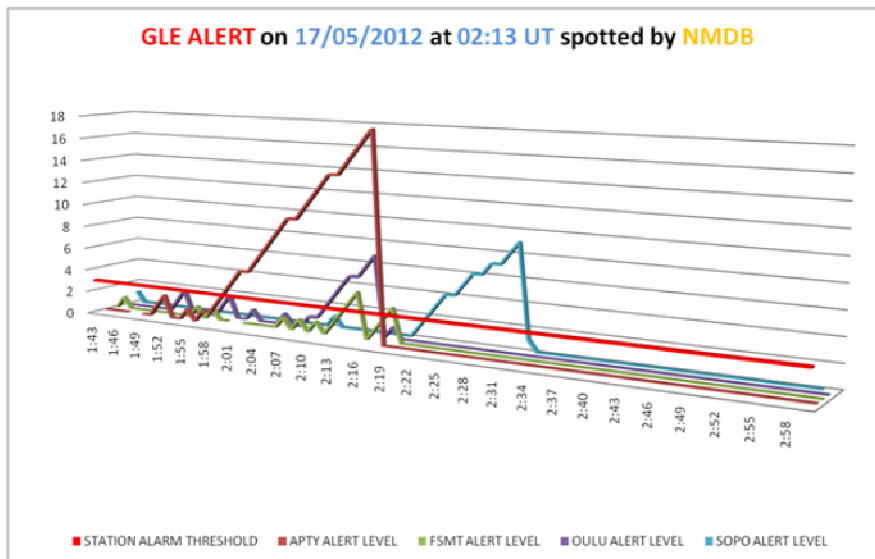
Ένα λειτουργικό σύστημα που παρέχει συναγερμό για επικείμενο GLE έχει αναπτυχθεί από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (Souvatzoglou et al., 2009) και πλέον λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο (Mavromichalaki et al., 2010) στα πλαίσια του προγράμματος NMDB, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.18.

Το πρώτο GLE του 24ου ηλιακού κύκλου (GLE71), το οποίο καταγράφηκε με βάση τον παραπάνω αλγόριθμο σε πραγματικό χρόνο, σημειώθηκε στις 17 Μαΐου 2012. Ο συναγερμός από το NMDB δόθηκε στις 02:13 UT (Σχ. 3.19), ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι ο σχετικός συναγερμός από τους GOES, βασιζόμενος στη ροή των > 100MeV πρωτονίων που ξεπερνούσε το 1 pfu, εξεδόθη στις 02:52 UT (<http://www.nmdb.eu>).





Σχ. 3.18 Το πρόγραμμα GLE Alert της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο (<http://www.nmdb.eu>).



Σχ. 3.19 GLE Alert για την επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE71) που σημειώθηκε στις 17 Μαΐου 2012 (<http://www.nmdb.eu>).

## **β) Προειδοποιητικά σήματα στεμματικών εκτινάξεων μάζας**

Πρόκειται για το θέμα που εξετάζεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Η κίνηση μίας γρήγορης στεμματικής εκτίναξης μάζας στο διαπλανητικό διάστημα (ICME), η οποία δημιουργεί μπροστά της ένα κρουστικό κύμα, επιδρά στη διάδοση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και στις διευθύνσεις άφιξής τους στη Γη. Σύμφωνα με τον Belov (2008) η πλειοψηφία των φαινομένων Forbush οφείλονται στις ICMEs. Σε αυτή την περίπτωση η μείωση της κοσμικής ακτινοβολίας δημιουργείται από τη διόγκωση μίας διαταραγμένης περιοχής ηλιακού ανέμου.

Η αρχική φάση του φαινομένου Forbush παρατηρείται πριν την άφιξη της διαπλανητικής διαταραχής στη Γη σαν μία προ-αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, η οποία δημιουργείται λόγω της επιτάχυνσης των υψηλής ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων στο εξωτερικό σύνορο της ICME και σαν μία προ-μείωση λόγω της μαγνητικής επανασύνδεσης μεταξύ της Γης και της περιοχής της μείωσης Forbush μέσα στην ICME. Όταν το κρουστικό κύμα, που δημιουργείται από την κίνηση της ICME και/ή η εκτίναξη μάζας φτάνουν στη Γη ξεκινάει η κύρια φάση του φαινομένου Forbush (η μείωση Forbush). Τέλος, στο τελικό στάδιο, όταν η ICME διαδίδεται πέρα από την τροχιά της Γης, παρατηρείται η φάση επαναφοράς του γεγονότος (Belov, 2008).

Επειδή οι κοσμικές ακτίνες διαδίδονται πολύ πιο γρήγορα από την ICME, η παρακολούθησή τους μπορεί να αξιοποιηθεί στην ενημέρωση σχετικά με την επερχόμενη διαταραγμένη περιοχή πολύ πριν αυτή φθάσει στη Γη. Προειδοποιητικά σήματα των ICMEs αναγνωρίστηκαν στα δεδομένα μετρητών νετρονίων πριν την έναρξη ισχυρών μαγνητικών καταιγίδων και μεγάλων μειώσεων Forbush. Λεπτομερής ανάλυση αυτών των φαινομένων έδειξε ότι τα προειδοποιητικά σήματα μπορεί να είναι μία μείωση ή μία αύξηση στον ρυθμό καταμέτρησης των κοσμικών ακτίνων (<http://www.nmdb.eu>).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

#### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά σε σημαντικές θεωρητικές έννοιες σχετικές με τη μαγνητική δυσκαμψία και τη δυναμική φορτισμένων σωματιδίων σε διπολικό μαγνητικό πεδίο. Παράλληλα παρουσιάζεται η θεωρία Störmer και προσδιορίζονται οι τροχιές Störmer των σωματιδίων, τα οποία κινούνται μέσα σε διπολικό μαγνητικό πεδίο και ορίζονται οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις αυτών. Τέλος, δίνεται μία αναλυτική περιγραφή των δύο μεθόδων ανάλυσης των δεδομένων, της μεθόδου ‘Ring of Stations’ και της ‘Global Survey Method’, που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη συγκεκριμένη ανάλυση και παρουσιάζεται η βάση των μειώσεων Forbush της ερευνητικής ομάδας του IZMIRAN και της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

#### 4.2 Μαγνητική δυσκαμψία $R$

Η εξίσωση κίνησης ενός φορτισμένου σωματιδίου με μάζα ηρεμίας  $m_o$ , φορτίο  $Ze$  και παράγοντα Lorentz  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  το οποίο κινείται σε ένα στατικό και ομογενές μαγνητικό πεδίο έντασης  $\vec{B}$  είναι η εξής (Longair, 1981; Μαυρομιχαλάκη 1989):

$$\frac{d}{dt} \left( \gamma m_o \vec{v} \right) = Ze \left( \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (4.1)$$

Ένα τέτοιο σωματίδιο εκτελεί ελικοειδή κίνηση με γυροακτίνα που δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{m_o \gamma v_{\perp}}{ZeB} \quad (4.2)$$

όπου  $v_{\perp}$  η κάθετη στο μαγνητικό πεδίο συνιστώσα της ταχύτητας. Αν  $\theta$  είναι η γωνία ρεύματος του σωματιδίου, τότε  $\tan \theta = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}}$  και η παραπάνω σχέση γίνεται (Longair, 1981):

$$r = \frac{m\gamma v \sin \theta}{ZeB} = \frac{p \sin \theta}{ZeB} = \frac{pc \sin \theta}{ZecB} \quad \eta$$

$$r = \frac{pc \sin \theta}{Ze Bc} \quad (4.3)$$

Το μέγεθος  $R = \frac{pc}{Ze}$  ορίζεται ως μαγνητική δυσκαμψία (rigidity) με μονάδες μέτρησης τα GV (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση σωματίδια με την ίδια τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας  $R$  που εισέρχονται σε μαγνητικό πεδίο και με την ίδια γωνία  $\theta$  θα ακολουθήσουν τις ίδιες τροχιές ανεξάρτητα από τη μάζα και το φορτίο τους (Longair, 1981).

Εκτός από το μέγεθος της μαγνητικής δυσκαμψίας ορίζεται και το μέγεθος του κατώφλιου γεωμαγνητικής δυσκαμψίας (cut – off rigidity) για συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή της Γης. Πρόκειται για την ελάχιστη δυσκαμψία που πρέπει να έχει ένα σωματίδιο για να φθάσει στο σημείο αυτό (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Το ίδιο το γεωμαγνητικό πεδίο επιβάλλει αυτόν τον περιορισμό, αφού δρα σαν ασπίδα που εμποδίζει τη διείσδυση σε αυτό σωματιδίων με χαμηλότερη ενέργεια (Παπαϊωάννου, 2007). Το κατώφλι γεωμαγνητικής δυσκαμψίας είναι συνάρτηση της γωνίας άφιξης του σωματιδίου (Μαυρομιχαλάκη, 1989) και παίρνει τιμές από ~1 GV στους γεωμαγνητικούς πόλους έως 15 – 17 GV κοντά στον ισημερινό (Παπαϊωάννου, 2007; Ανδριοπούλου, 2010).

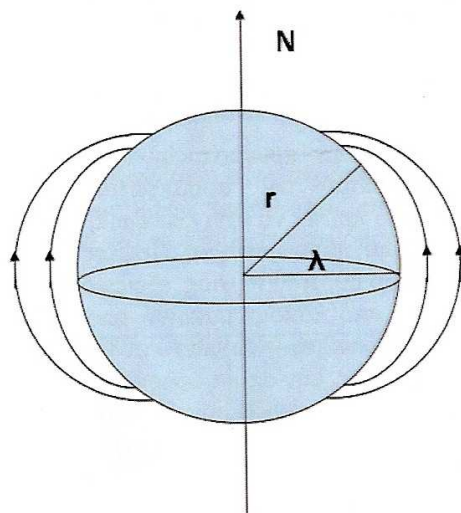
Επίσης μεγάλη σημασία έχει και το κατακόρυφο κατώφλι δυσκαμψίας (vertical cut – off rigidity), δηλαδή η ελάχιστη δυσκαμψία που πρέπει να έχει το

σωματίδιο για να φθάσει κατακόρυφα σε δεδομένο τόπο (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Αυτό εξαρτάται από το γεωμαγνητικό πλάτος και μάλιστα από το  $\cos^4 \lambda$ , όπου  $\lambda$  το γεωμαγνητικό πλάτος του σταθμού (βλ. Κεφ. IV § 4.3).

### 4.3 Δυναμική φορτισμένων σωματιδίων σε διπολικό μαγνητικό πεδίο

Ο Störmer μελέτησε το πρόβλημα της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε διπολικό μαγνητικό πεδίο και του προσδιορισμού των τροχιών τους. Γι' αυτό τον λόγο η θεωρία αυτή είναι γνωστή ως θεωρία Störmer και οι τροχιές των σωματιδίων ως τροχιές Störmer (Kallenrode, 1998).

Έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. IV § 4.2) η εξίσωση κίνησης για ένα φορτισμένο σωματίδιο μάζας ηρεμίας  $m_0$  και φορτίου  $Ze$  που κινείται με ταχύτητα  $\vec{v}$  μέσα σε στατικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  (Μαυρομιχαλάκη 1989).



Σχ. 4.1 Ορισμός του γεωμαγνητικού πλάτους  $\lambda$  ως προς τον μαγνητικό βόρειο πόλο  $N$ .

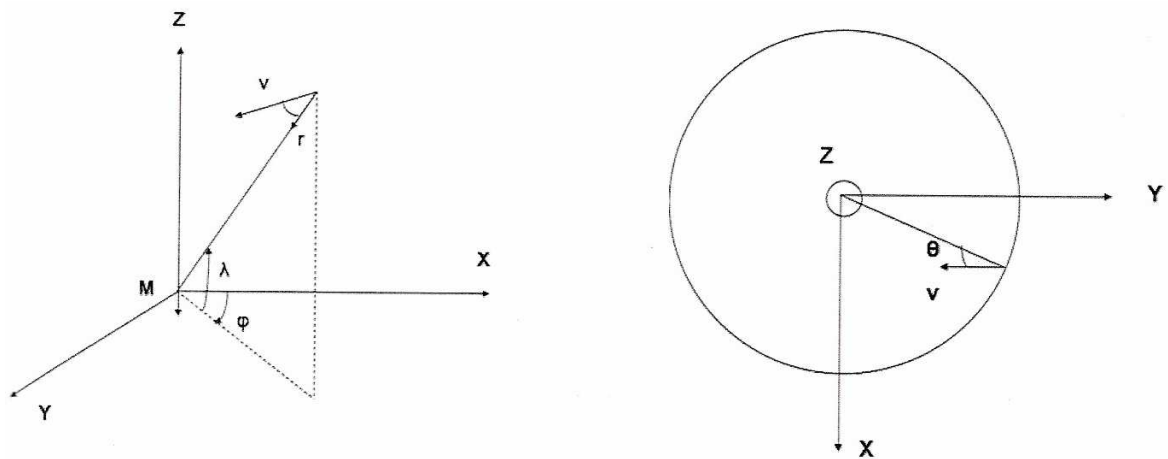
Με βάση τη διπολική προσέγγιση οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου της Γης σε ένα γεωμαγνητικό πλάτος  $\lambda$  (Σχ. 4.1) είναι (Longair, 1981; Μαυρομιχαλάκη, 1989):

$$B_r = -\frac{2\mu_o M \sin \lambda}{4\pi r^3} \quad (4.4)$$

$$B_\lambda = -\frac{\mu_o M \cos \lambda}{4\pi r^3} \quad (4.5)$$

όπου  $r$  η απόσταση από το κέντρο του διπόλου και  $M$  η μαγνητική ροπή του διπόλου.

Το πρόβλημα εύρεσης της τροχιάς ενός φορτισμένου σωματιδίου που από το άπειρο πλησιάζει ένα διπολικό μαγνητικό πεδίο δεν έχει αναλυτική λύση. Ωστόσο, κάποια όρια σχετικά με τις περιοχές του μαγνητικού πεδίου στις οποίες μπορούν να εισέλθουν τα φορτισμένα σωματίδια δίνονται από τη θεωρία Störmer. Με αυτό τον τρόπο υποδεικνύονται επιτρεπτές και απαγορευμένες ζώνες για οποιοδήποτε σωματίδιο έρχεται από άπειρη απόσταση (Longair, 1981).



Σχ. 4.2 Το σύστημα συντεταγμένων για τον ορισμό της δυναμικής φορτισμένου σωματιδίου σε ένα δίπολο μαγνητικό πεδίο (αριστερά) και το σύστημα συντεταγμένων για τον ορισμό της γωνίας  $\theta$  (δεξιά).

Για την προσέγγιση αυτή θα πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα (Longair, 1981):

- α) η μέτρηση των αποστάσεων σε μονάδες Störmer και
- β) η έκφραση της εξίσωσης κίνησης του σωματιδίου στο σύστημα συντεταγμένων που ορίζεται από τα  $r$ ,  $\lambda$ ,  $\varphi$  (Σχ. 4.2, αριστερά) καθώς και ο ορισμός της γωνίας  $\theta$

(Σχ. 4.2, δεξιά) ανάμεσα στη στιγμιαία ταχύτητα του σωματιδίου  $v$  και στο μεσημβρινό επίπεδο που ακολουθεί το σωματίδιο κατά την κίνησή του (Μαυρομιχαλάκη, 1989; Παπαϊωάννου, 2007).

Σε ότι αφορά στο πρώτο βήμα, υπάρχει μία κυκλική τροχιά στο ισημερινό επίπεδο ενός διπόλου για ένα σωματίδιο ορμής  $p = \gamma m_o v$ . Εξισώνοντας τη φυγόκεντρη και τη μαγνητική δύναμη κατά την ακτινική διεύθυνση προκύπτει ότι:

$$\frac{\gamma m_o v^2}{r} = Ze(v \times B) \quad (4.6)$$

όπου  $r$  η απόσταση από το κέντρο του διπόλου. Οπότε προκύπτει:

$$\frac{\gamma m_o v^2}{r} = \frac{Ze v \mu_o M}{4\pi r^3} \quad (4.7)$$

από όπου επιλύοντας ως προς  $r$  προκύπτει η ακτίνα Störmer (Longair, 1981):

$$r_s = \sqrt{\frac{Ze \mu_o M}{4\pi}} \quad (4.8)$$

Στο δεύτερο βήμα εκφράζεται η εξίσωση κίνησης συναρτήσει του συστήματος συντεταγμένων που ορίζεται από τα  $r$ ,  $\lambda$ ,  $\varphi$  καθώς και από τη γωνία  $\theta$  (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Με δεδομένα τα παραπάνω οι εξισώσεις κίνησης επιλύονται (Longair, 1981) και προκύπτει:

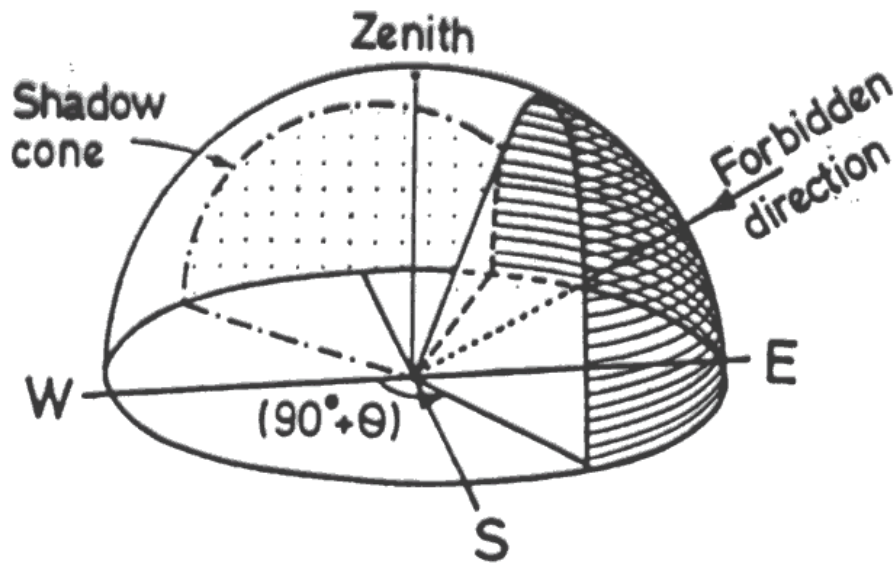
$$2b = -r \sin \theta \cos \lambda - \frac{\cos^2 \lambda}{r} \quad (4.9)$$

όπου ο παράγοντας  $b$  είναι σταθερά της κίνησης (Longair, 1981; Μαυρομιχαλάκη, 1989). Το  $b$  και  $r$  μετριοούνται σε μονάδες Störmer.

Αποδεικνύεται ότι οι τροχιές των σωματιδίων υπόκεινται σε περιορισμούς, οι οποίοι καθορίζονται από την τιμή της παραμέτρου  $b$ . Συγκεκριμένα, υπάρχουν τροχιές οι οποίες είναι επιτρεπτές για ένα σωματίδιο που εισέρχεται στο γήινο μαγνητικό πεδίο έχοντας ορμή  $p$  και τροχιές οι οποίες είναι απαγορευμένες. Εφόσον  $-1 \leq \sin \theta \leq 1$ , τότε:

$$\sin \theta \leq \frac{2}{r \cos \lambda} - \frac{\cos \lambda}{r^2} \quad (4.10)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει το συμπέρασμα ότι όλες οι τροχιές των σωματιδίων που φτάνουν σε έναν παρατηρητή σε γεωμαγνητικό πλάτος  $\lambda$  βρίσκονται σε κώνο ανοίγματος  $90^\circ + \theta$  πάνω από τη γραμμή του ορίζοντα που κοιτάει δυτικά για θετικά φορτισμένα σωματίδια ή ανατολικά για αρνητικά (Σχ. 4.3). Αυτός είναι ο επιτρεπτός κώνος Störmer.

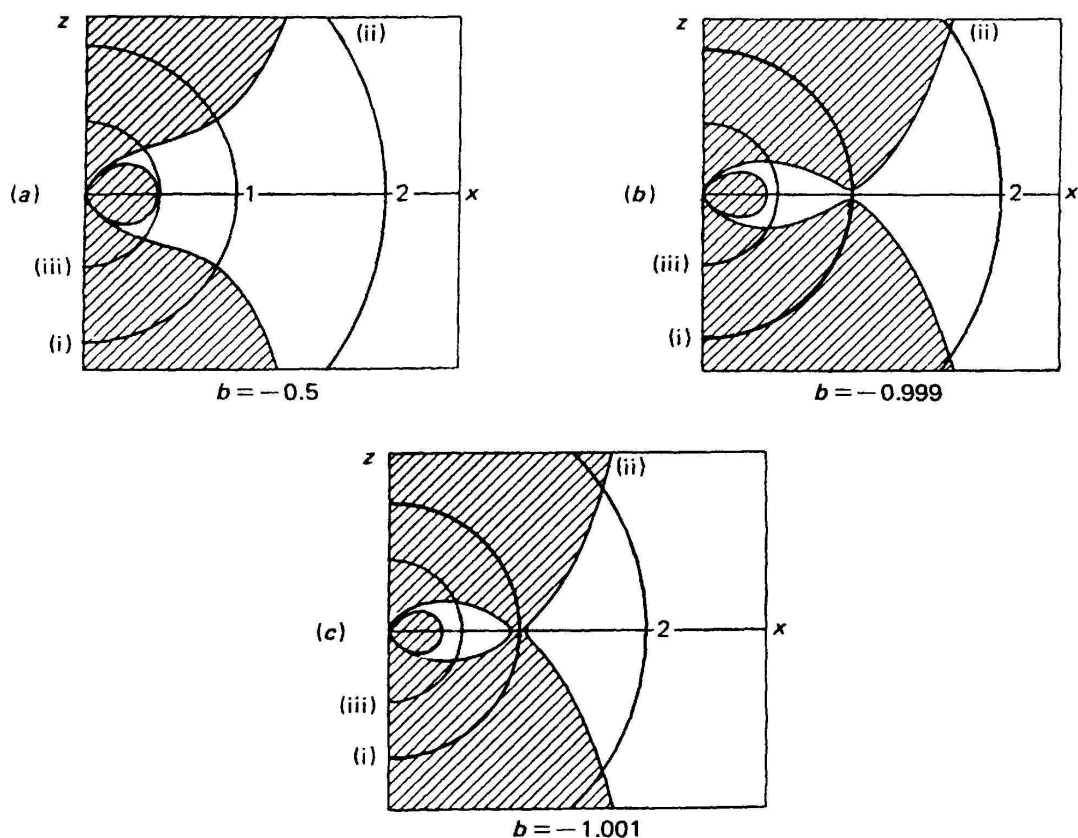


Σχ. 4.3 Κώνος του Störmer (Hillas, 1972; Kudela, 2007).

Στο σχήμα 4.4 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα της θεωρίας Störmer. Η ακτίνα της Γης σε μονάδες Störmer εκφράζεται ως  $r_E$ , οπότε προκύπτει ο λόγος  $r = \frac{r_E}{r_S}$ , όπου  $r_S$  η ακτίνα Störmer. Οι απαγορευμένες περιοχές είναι αυτές για τις οποίες



$|\sin \theta| > 1$ . Σε ότι αφορά στη Γη και τα σωματίδια τα οποία θα κατορθώσουν να φτάσουν σε αυτή φαίνεται να υπάρχει μία κρίσιμη τιμή ορμής για την οποία η ακτίνα Störmer είναι ίση με την ακτίνα της Γης ( $r = 1$ ). Αν το σωματίδιο είναι πρωτόνιο ( $Z = 1$ ) η ορμή αυτή θα είναι 59.6 GeV (Longair, 1981). Τα σωματίδια με ορμή 59.6 GeV/c μπορούν να φτάσουν στη Γη μόνο εάν η παράμετρος  $b$  λάβει τιμές μεγαλύτερες από -1 (περιπτώσεις a και b), αλλιώς δεν μπορούν να εισέλθουν (περίπτωση c) (Longair, 1981).



Σχ. 4.4 Διαγράμματα των περιοχών, σε πολικές συντεταγμένες, στις οποίες διέρχονται σωματίδια υψηλών ενεργειών μέσα από το γήινο μαγνητικό πεδίο.

Οι γραμμοσκιασμένες περιοχές έχουν  $|\sin \theta| > 1$  και επομένως είναι απαγορευμένες.

Η περιφέρεια της Γης δίνεται στα διαγράμματα με τρεις τιμές της δυσκαμψίας των πρωτονίων (i)  $R=59.6$  GeV/c, (ii)  $4R$  και (iii)  $R/4$  (Longair, 1981; Μαυρομαχάκη, 2005; Kudela, 2007).

Στην περίπτωση που τα σωματίδια φτάνουν στη Γη κατακόρυφα (Μαυρομιχαλάκη, 1989) βάση του ορισμού της γωνίας  $\theta$  θα ισχύει  $\theta = 0^\circ$ , αφού θα βρίσκονται πάνω στο μεσημβρινό επίπεδο. Τότε:

$$2b = -\frac{\cos^2 \lambda}{r} \quad (4.11)$$

Για τα σωματίδια που φτάνουν στη Γη θα ισχύει, σε ακτίνες Störmer, ότι

$$r = \frac{r_E}{r_S} = \frac{r_E}{\left(\frac{Ze\mu_o M}{4\pi p}\right)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{p}{59.6ZGeV}\right)^{\frac{1}{2}} = 1. \text{ Άρα η οριακή τιμή της παραμέτρου } b \text{ θα}$$

ισούται με (Longair, 1981):

$$b = -\frac{1}{2} \frac{\cos^2 \lambda}{\left(\frac{p}{59.6ZGeV}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.12)$$

Η αναγκαία συνθήκη για να φτάνουν στη Γη τα σωματίδια με ορμή μικρότερη των 59.6 GeV/c είναι να ισχύει  $b \geq -1$ . Επομένως, για τα σωματίδια που φτάνουν κατακόρυφα στην επιφάνεια της Γης θα πρέπει να ισχύει (Longair, 1981):

$$-\frac{1}{2} \frac{\cos^2 \lambda}{\left(\frac{p}{59.6ZGeV}\right)^{\frac{1}{2}}} \geq -1 \quad \text{ή}$$

$$p \geq 14.9Z \cos^4 \lambda GeV / c \quad (4.13)$$

Φαίνεται ότι υπάρχει ένα όριο ορμής και αντιστοίχως ένα κατώφλι ενέργειας, το οποίο απαγορεύει σε σωματίδια με ενέργειες κάτω από αυτό να φτάσουν σε ένα δεδομένο γεωμαγνητικό πλάτος. Το κατώφλι αυτό μεταβάλλεται για διαφορετικά γεωμαγνητικά πλάτη και σύμφωνα με τη διπολική προσέγγιση μειώνεται όταν

αυξάνεται το γεωμαγνητικό πλάτος. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει και η εξάρτηση από το φορτίο.

Η σχέση (4.13), με βάση τον ορισμό της μαγνητικής δυσκαμψίας, γίνεται  $R_{vert} \geq 14.9 \cos^4 \lambda (GV)$ , από την οποία προκύπτει ότι στη διπολική προσέγγιση το κατώφλι κατακόρυφης γεωμαγνητικής δυσκαμψίας εξαρτάται μόνο από το γεωμαγνητικό πλάτος και παίρνει τιμές από 0 έως 14.9 GV (Kallenrode, 1998; Ανδριοπούλου, 2010).

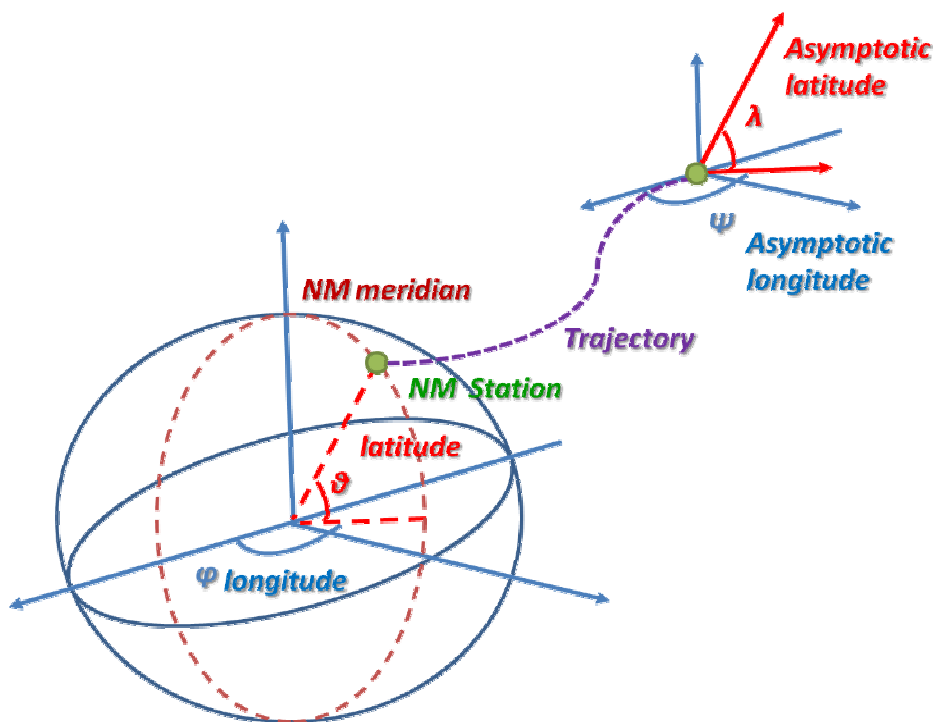
#### 4.4 Ασυμπτωτικές διευθύνσεις

Οι διευθύνσεις των σωματιδίων υφίστανται αποκλίσεις από το γήινο μαγνητικό πεδίο. Ως ασυμπτωτική διεύθυνση  $A(R, \theta, \varphi)$  μίας κοσμικής ακτίνας μαγνητικής δυσκαμψίας  $R$  που φτάνει στη Γη από τη διεύθυνση  $(\theta, \varphi)$  ορίζεται η διεύθυνση που έχει το σωματίδιο προτού εισέλθει στο γεωμαγνητικό πεδίο (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Από την αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης του σωματιδίου για διάφορα πρότυπα του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας που έχουν διάφορες μαγνητικές δυσκαμψίες. Πλέον κατάλληλο για τη μελέτη των χρονικών μεταβολών των κοσμικών ακτίνων και των ανισοτροπιών του διαστήματος είναι το πρότυπο των ασυμπτωτικών κώνων (asymptotic cones of acceptance) (Μαυρομιχαλάκη, 1989).

Κάθε μετρητής νετρονίων ‘βλέπει’ (scan) μόνο μία στενή περιοχή του σφαιρικού ουρανού ανεξάρτητα του μεγέθους του ανοίγματός του στη Γη (Μαυρομιχαλάκη, 1989). Ορίζεται ο ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής μίας δεδομένης γεωγραφικής περιοχής ως το σύνολο των τροχιών των φορτισμένων σωματιδίων που μπορούν να έχουν πρόσβαση στην περιοχή αυτή (Smart et al., 2000). Δηλαδή, ο ασυμπτωτικός κώνος είναι η στερεά γωνία που περιέχει εκείνες τις ασυμπτωτικές διευθύνσεις, οι οποίες συνεισφέρουν σημαντικά στη ροή του μετρητή. Δεν πρόκειται για μία απλή γεωμετρική περιοχή του μετρητή με κέντρο το μεσημβρινό του σταθμού αλλά σχηματίζει πολύπλοκα σχήματα. Σύμφωνα με τον ορισμό του κατωφλίου γεωμαγνητικής δυσκαμψίας, η δυσκαμψία των φορτισμένων σωματιδίων, που θα έχουν

πρόσβαση σε μία δεδομένη γεωγραφική περιοχή, θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτή του κατακόρυφου κατωφλίου γεωμαγνητικής δυσκαμψίας του σταθμού, δηλαδή πρέπει να ισχύει  $R_{part} > R_c$  (Ανδριοπούλου, 2010).

Για κάθε γεωγραφική περιοχή ορίζεται και ένας διαφορετικός ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής, ο οποίος μάλιστα συνεχώς μεταβάλλεται λόγω της περιστροφής της Γης σε σχέση με τον ηλιακό άνεμο. Άρα, για κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε γεωγραφική περιοχή μπορεί να οριστεί ένας ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής (Ανδριοπούλου, 2010). Στο σχήμα 4.5 δίνεται μία κλασσική τροχιά ενός σωματιδίου καθώς εισέρχεται στο μαγνητοσφαιρικό πεδίο της Γης. Ακολουθώντας μία ασυμπτωτική διεύθυνση, το φορτισμένο σωματίδιο φτάνει στο μαγνητοσφαιρικό όριο και στη συνέχεια πάνω από τη θέση ενός σταθμού (το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του οποίου φαίνονται στο σχήμα) (Ανδριοπούλου, 2010).



Σχ. 4.5 Ορισμός του ασυμπτωτικού πλάτους  $\lambda$  και του ασυμπτωτικού μήκους  $\psi$  (Παπαϊωάννου, 2012).

Ως ασυμπτωτικό πλάτος  $\lambda$  (Μαυρομιχαλάκη, 1989; Kudela, 2007) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από το άνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου και του

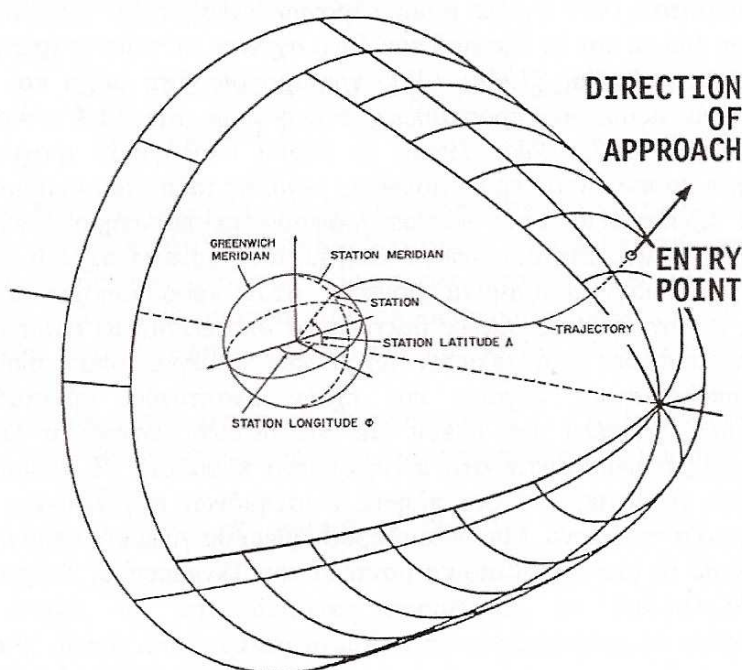
επιπέδου του γήινου ισημερινού, μεταβάλλεται από  $0^\circ$  έως  $\pm 90^\circ$  και δίνεται από τη σχέση:

$$\tan \lambda = \frac{-u_\theta \sin \theta + u_r \cos \theta}{\left[ u_\theta^2 + (u_\phi \cos \theta + u_r \sin \theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4.14)$$

Ως ασυμπτωτικό μήκος  $\psi$  (Μαυρομιχαλάκη, 1989; Kudela, 2007) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από το άνυσμα της ταχύτητας και τον μεσημβρινό του Greenwich, μετράται ανατολικά του Greenwich από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  και δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = \varphi + \arctan \left( \frac{u_\phi}{u_\theta \cos \theta + u_r \sin \theta} \right) \quad (4.15)$$

όπου  $u_r$ ,  $u_\theta$ ,  $u_\phi$  οι συνιστώσες της ταχύτητας σε σφαιρικές συντεταγμένες,  $\theta$  το συμπληρωματικό του γεωγραφικού πλάτους και  $\varphi$  το γεωγραφικό μήκος μετρημένο ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich.



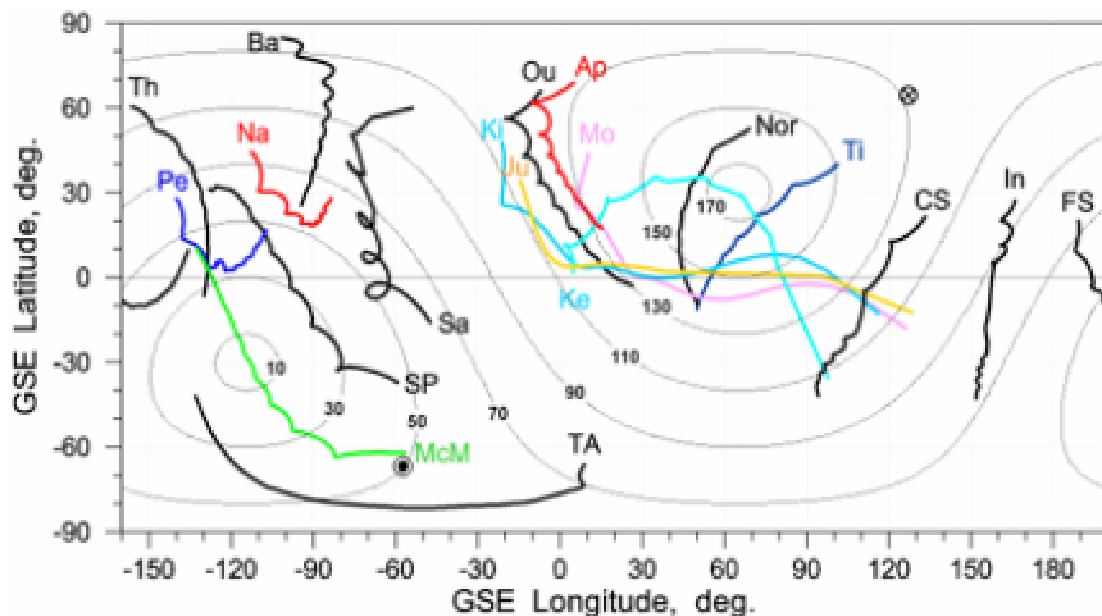
Σχ. 4.6 Ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής ενός σταθμού (McCracken et al., 1962).

Στο σχήμα 4.6 απεικονίζεται ο ασυμπτωτικός κώνος υποδοχής που σχηματίζεται από το σύνολο των επιτρεπών τροχιών. Οι ασυμπτωτικοί κώνοι των σταθμών παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες (Μαυρομιχαλάκη, 1989):

α) οι διαστάσεις και η μέση θέση του ασυμπτωτικού κώνου ενός μετρητή εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση του σταθμού. Είναι ευρείς στο μήκος για τους σταθμούς που είναι κοντά στον ισημερινό και στενοί για τους σταθμούς μέσου και μεγάλου γεωμαγνητικού πλάτους ( $30^\circ - 70^\circ$ ). Επομένως, μία ανισοτροπία του διαστήματος, που έχει περιορισμένη γωνιακή έκταση, θα καταγραφεί με μικρότερο πλάτος στον ισημερινό σταθμό από ότι σε ένα σταθμό μεγάλου πλάτους.

β) οι ασυμπτωτικοί κώνοι των ισημερινών και μέσου πλάτους σταθμών ( $\leq 60^\circ$ ) σχηματίζουν μικρές γωνίες με το ισημερινό επίπεδο της Γης, ενώ των πολικών σταθμών σχηματίζουν μεγάλες γωνίες, γιατί τα σωματίδια είναι κάθετα στο ισημερινό επίπεδο.

γ) ο χρόνος της μέγιστης ανισοτροπίας σε δεδομένο σταθμό εξαρτάται από τη σχετική γωνιακή διαφορά μεταξύ του ασυμπτωτικού κώνου και του μεσημβρινού του σταθμού.



Σχ. 4.7 Ασυμπτωτικές διευθύνσεις άφιξης για μία ομάδα μετρητών νετρονίων στις 7:00 UT την 20<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2005 (<http://www.nmdb.eu>).

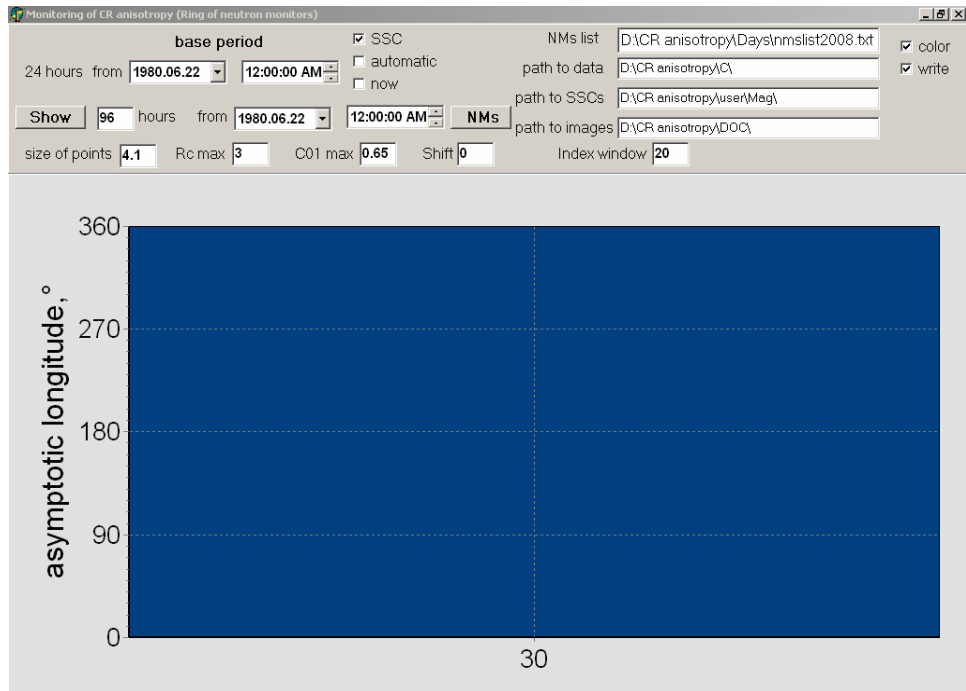
Χρησιμοποιώντας κώδικες είναι δυνατόν να υπολογισθούν για κάθε μετρητή νετρονίων οι διευθύνσεις των σωματιδίων για διαφορετικές ενέργειες τα οποία τελικά θα προσκρούσουν στην ατμόσφαιρα στο ζενίθ του σταθμού. Αυτές οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις άφιξης μπορούν να σχεδιαστούν για κάθε μετρητή νετρονίων. Στο σχήμα 4.7 δίνονται οι ασυμπτωτικές διευθύνσεις άφιξης για μία ομάδα μετρητών νετρονίων (Th-Thule, Na-Nain, Bar-Barentsburg, McM-McMurdo, SP-South Pole, Sa-SANAE, Pe-Peawanuk, TA-Terre Adelie, Ou-Oulu, Ap-Apatity, Mo-Moscow, Ki-Kiel, Ju-Jungfrauioch, Ke-Kerguelen, Nor-Norilsk, Ti-Tixie Bay, CS-Cape Shmidt, In-Inuvik) στις 7:00 UT την 20<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2005. Η καμπύλη των διευθύνσεων άφιξης κάθε μετρητή νετρονίων περιλαμβάνει τις διευθύνσεις για ένα εύρος μαγνητικών δυσκαμψιών ή ενεργειών. Η διεύθυνση της υψηλότερης τιμής δυσκαμψίας για την οποία έγιναν οι υπολογισμοί (20 GV, που αντιστοιχεί σε κινητική ενέργεια 19 GeV για πρωτόνιο) βρίσκεται στην αρχή της καμπύλης (εκεί που έχουν σημειωθεί τα αρχικά της ονομασίας του σταθμού), ενώ η διεύθυνση της χαμηλότερης τιμής δυσκαμψίας (1 GV, που αντιστοιχεί σε ενέργεια 430 MeV) στην άλλη άκρη της καμπύλης. Όπως προκύπτει κάθε σταθμός έχει μία χαρακτηριστική ομάδα διευθύνσεων άφιξης (<http://www.nmdb.eu>).

#### 4.5 Μέθοδος ‘Ring of Stations’

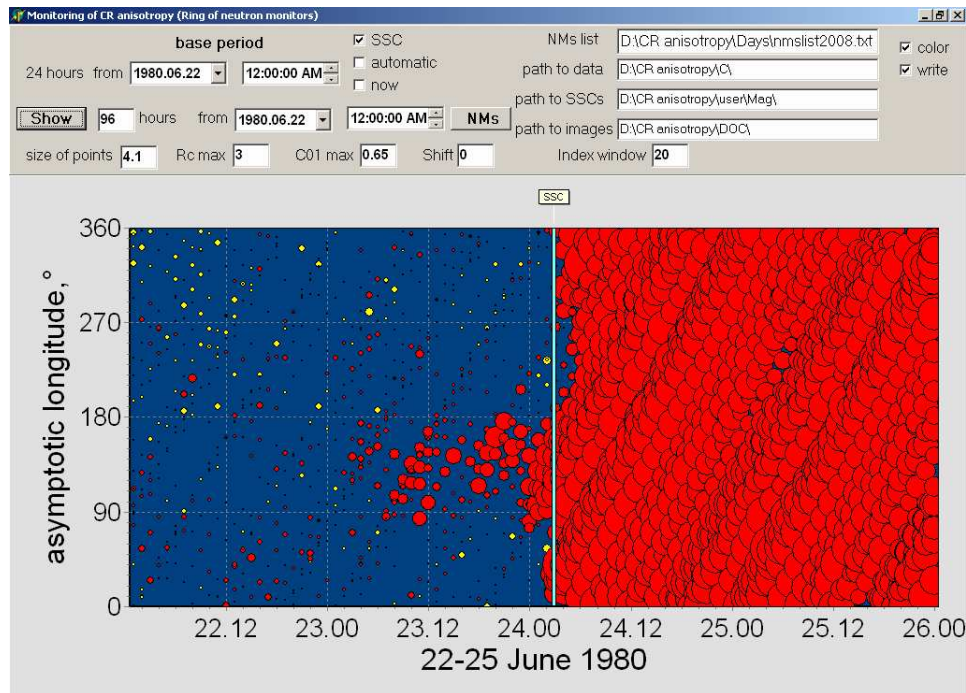
Προκειμένου να μελετηθούν τα φαινόμενα προειδοποίησης στις διάφορες μειώσεις Forbush έχει χρησιμοποιηθεί η ‘Ring of Stations’ (RS) μέθοδος (Belov et al., 1995a; Belov et al., 2003; Asipenka et al., 2009a). Αυτή η συγκεκριμένη μέθοδος (Σχ. 4.8) επεξεργάζεται ωριαίες τιμές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτή καταγράφεται από τους σταθμούς του παγκοσμίου δικτύου μετρητών νετρονίων με κατώφλι δυσκαμψίας  $R_c < 4$  GV και γεωγραφικά πλάτη  $< 70^\circ$ . Ο Πίνακας 4.1 περιέχει όλους τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν από τη μέθοδο RS.

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τις ωριαίες τιμές των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε κάθε σταθμό σε σχέση με μία ήρεμη περίοδο και μετά τις απεικονίζει ανάλογα με το ασυμπτωτικό μήκος των σωματιδίων που καταγράφει ο μετρητής νετρονίων εκείνη τη χρονική στιγμή, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 4.9. Χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερους μετρητές νετρονίων

επιτυγχάνεται η απεικόνιση των χρονικών μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατανεμημένες σε ασυμπτωτικές διευθύνσεις.



Σχ. 4.8 Η αρχική εικόνα του προγράμματος που χρησιμοποιεί τη μέθοδο RS.



Σχ. 4.9 Παράδειγμα διαγράμματος ασυμπτωτικού μήκους συναρτήσει του χρόνου.

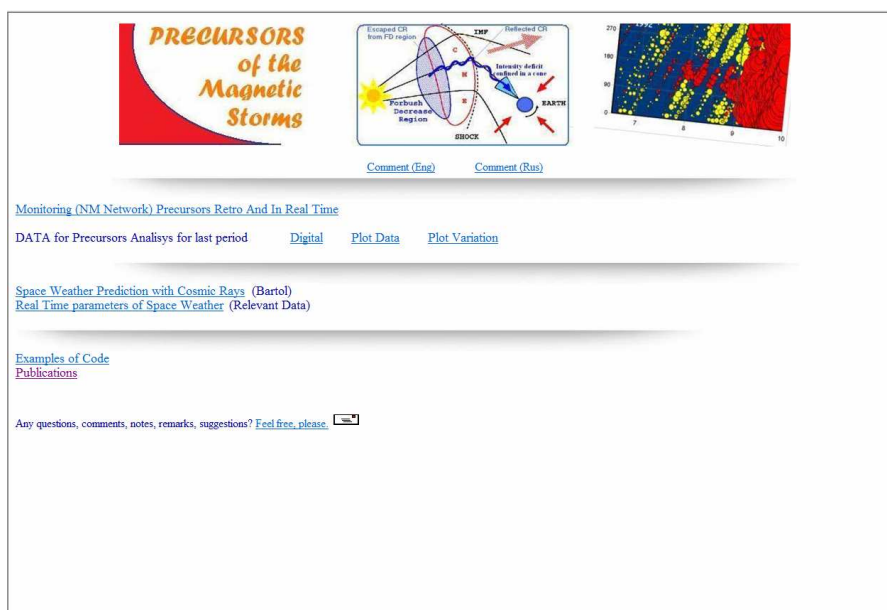


**Πίνακας 4.1** Κατάλογος των σταθμών μετρητών νετρονίων που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο ‘Ring of Stations’.

	Σταθμός μετρητή νετρονίων	Συντομ.	Γεωγρ. πλάτος (deg)	Γεωγρ. μήκος (deg)	R <sub>c</sub> (GV)	Υψόμετρο (m)
1	Apatity	APTY	67.55	33.33	0.65	177
2	Calgary	CALG	51.08	-114.13	1.08	1128
3	Cape Schmidt	CAPS	68.92	-179.47	0.45	0
4	Climax	CLMX	39.37	-106.18	2.93	3400
5	Deep River	DPRV	46.10	-77.50	1.25	145
6	Durham	DRHM	43.10	-70.83	1.76	0
7	Fort Smith	FRSM	60.02	-112.00	0.30	0
8	Goose Bay	GSBY	53.27	-60.4	0.74	46
9	Inuvik	INVK	68.35	-133.72	0.14	21
10	Irkutsk	IRKT	52.47	104.02	3.66	433
11	Kerguelen	KERG	-49.35	70.25	1.14	33
12	Kiel	KIEL	54.33	10.11	2.29	54
13	Kiev	KIEV	50.72	30.30	3.39	120
14	Kingston	KGSN	-42.99	147.29	1.82	65
15	Larc	LARC	-62.20	-58.96	3.01	40
16	Lomnický Stit	LMKS	49.20	20.22	4.00	2634
17	Magadan	MGDN	60.12	151.02	2.10	0
18	Mawson	MWSN	-67.6	62.88	0.15	0
19	Moscow	MOSC	55.47	37.32	2.46	200
20	Mt. Washington	MTWS	44.30	288.70	1.58	1909
21	Mt. Wellington	MTWL	-42.92	147.24	1.83	725
22	Nain	NAIN	56.55	-61.68	0.40	0
23	Newark	NWRK	39.68	-75.75	1.97	50
24	Norilsk	NRLK	69.26	88.05	0.63	0
25	Novosibirsk	NVBK	54.80	83.00	2.91	163
26	Oulu	OULU	65.02	25.50	0.81	15
27	Peawanuck	PWNK	54.98	-85.44	0.50	0
28	Sanae	SNAE	-71.67	-2.85	0.86	856
29	Terre Adelie	TERA	-66.65	140.00	0.00	32
30	Tixie Bay	TXBY	71.60	128.90	0.53	0
31	Yakutsk	YKTK	62.02	129.73	1.70	105

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι:

- α) παρέχει την πραγματική κατά μήκος κατανομή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας,
- β) δεν εξαρτάται τόσο από την αβεβαιότητα του μοντέλου των ισοτροπικών και ανισοτροπικών μεταβολών και
- γ) δεν εξαρτάται από τις μετρήσεις του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (Belov et al., 1995a; Asipenka et al., 2009a).



Σχ. 4.10 Precursor monitoring από το NMDB.

Η μέθοδος RS έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες προκειμένου να απεικονίσει τη συμπεριφορά της ασυμπτωτικής κατανομής των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας με τρόπο σαφή και επεξηγηματικό. Συγκεκριμένα, έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγραφεί το παράδειγμα προειδοποίησης για το γεγονός του Σεπτεμβρίου 1992 (βλ. Κεφ. II § 2.8.1), το οποίο αναφέρεται σε αρκετά επιστημονικά άρθρα (Belov et al., 1995a; Munakata et al., 2000; Belov et al., 2003; Dorman et al., 2003a).

Χρησιμοποιείται, επίσης, ως εφαρμογή στην Υψηλής Ανάλυσης Βάση Μετρητών Νετρονίων σε πραγματικό χρόνο (NMDB) για την κατασκευή σε

πραγματικό χρόνο της γωνιακής κατανομής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας: <http://www.nmdb.eu/?q=node/19> ή, <http://cr0.izmiran.ru/PrecursorMonitoring/index.htm> (Σχ. 4.10).

#### 4.6 Μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης

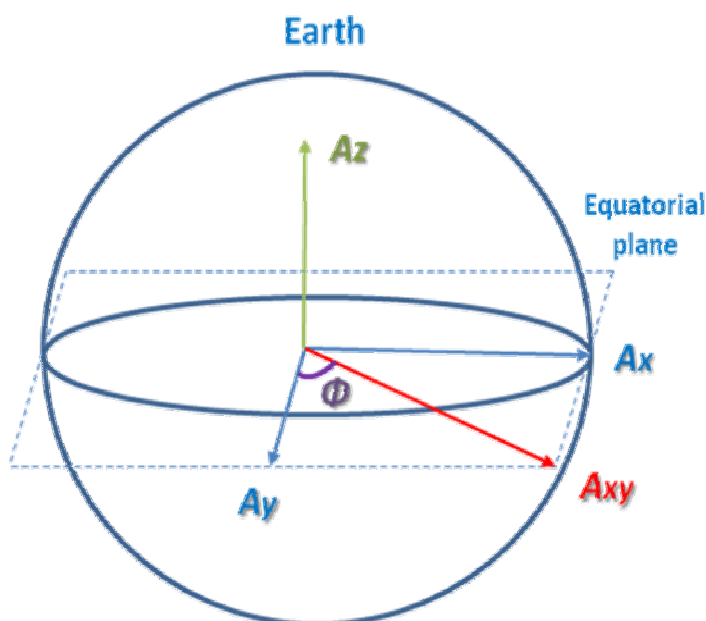
Οι Krymsky et al. (1966; 1967) πρότειναν για πρώτη φορά μία μέθοδο προσδιορισμού της χωρικής κατανομής των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων, έξω από τη μαγνητόσφαιρα στον διαπλανητικό χώρο, η οποία στη συνέχεια εξελίχθηκε από τους Chirkov et al. (1967) και Nagashima (1971).

Πρόκειται για μία μέθοδο Παγκοσμίου Επισκόπησης (Global Survey Method, GSM), αφού η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δεδομένα από όσο το δυνατόν περισσότερους επίγειους καταμετρητές (π.χ. μετρητές νετρονίων), η οποία παρέχει χρήσιμες και αξιόπιστες πληροφορίες για τις συνθήκες του διαστημικού περιβάλλοντος. Οι Belov et al. (1983) πρότειναν μία απλουστευμένη και συνεπώς πιο εύχρηστη εκδοχή της GSM, η οποία με το πέρασμα των χρόνων εξελίχθηκε (Belov et al., 1991; 1995b; 2005b; 2012b).

Η μέθοδος Παγκοσμίου Επισκόπησης χρησιμοποιεί ωριαία δεδομένα από όσο το δυνατόν περισσότερους επίγειους μετρητές νετρονίων από το παγκόσμιο δίκτυο (Papaioannou et al., 2009). Πρόκειται για δεδομένα διορθωμένα με την πίεση για κάθε σταθμό καταμέτρησης ξεχωριστά, ενώ συχνά γίνονται διορθώσεις και για σφάλματα που οφείλονται στο σύστημα καταγραφής (Παπαϊωάννου, 2007).

Μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέθοδος αυτή αποτελείται από δύο βήματα (Παπαϊωάννου, 2012). Αρχικά, με τη χρήση της μεθόδου των συντελεστών σύζευξης δευτερογενούς και πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας (Dorman, 2004; Belov et al., 2005b; Papaioannou et al., 2009), προσομοιώνεται η αναμενόμενη ένταση των κοσμικών σωματιδίων σε κάθε σταθμό καταμέτρησης, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε ανιχνευτή (π.χ. όριο μαγνητικής δυσκαμψίας, ασυμπτωτικές διευθύνσεις, ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένος). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται προσαρμογή της αναμενόμενης έντασης στα πειραματικά

καταγεγραμμένα δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας κάθε σταθμού (Papaioannou et al., 2009).



Σχ. 4.11 Συνιστώσες ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  και  $A_{xy}$ ) ανισοτροπίας κοσμικής ακτινοβολίας (Παπαϊωάννου, 2012).

Η παραπάνω διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της εξάρτησης του ισοτροπικού τμήματος των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων από τη δυσκαμψία στο όριο της ατμόσφαιρας (Paouris et al., 2012) ( $A_0$ ), όπως επίσης και των τριών συνιστωσών του διανύσματος της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων (Σχ. 4.11),  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ , όπου  $A_x$  και  $A_y$  είναι οι συνιστώσες της ημερήσιας ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (με πλάτος  $A_{xy} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$  και φάση  $\varphi = \arctan \frac{A_x}{A_y}$ ) και  $A_z$  η ανισοτροπία Βορρά – Νότου (Krymsky et al., 1967; Belov et al., 1973; Belov et al., 1974; Belov et al., 1995b). Για τον σκοπό αυτό έχει υποθεθεί ότι η εξάρτηση της έντασης των κοσμικών ακτίνων από τη δυσκαμψία ακολουθεί νόμο δύναμης και ότι η εξάρτηση της δυσκαμψίας από το πλάτος της ανισοτροπίας είναι σταθερή μέχρι και το όριο των 100 GV (Belov et al., 1995b).

Για να απεικονιστούν οι μεταβολές που καταγράφονται στην κοσμική ακτινοβολία έχουν επιλεγεί τα 10 GV (Moraal et al., 1979). Ο λόγος για τη συγκεκριμένη επιλογή είναι ότι στη δεδομένη ενέργεια οι μεταβολές αυτές εμφανίζονται ξεκάθαρα στα συνδυαστικά δεδομένα από περίπου 40 σταθμούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας. Η επιλογή μεγαλύτερης ή μικρότερης ενέργειας δεν παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων, αφού οδηγεί άμεσα σε αλλοίωση του αποτελέσματος καθώς αυτό ή ελαχιστοποιείται, ή μεγιστοποιείται (Παπαϊωάννου, 2007). Επιπλέον, οι μεταβολές της έντασης των κοσμικών ακτίνων στα 10 GV, εκτός από υψηλή ακρίβεια, αντανακλούν και όλες τις διαταραχές του ηλιακού ανέμου, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μειώσεις Forbush (Papaioannou et al., 2009).

Η αξιοποίηση των πειραματικών δεδομένων μέσω της GSM, κάνοντας ταυτόχρονα χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, παρέχει τα εξής αποτελέσματα,  $A_0$  (ισοτροπικό τμήμα γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων, ένταση κοσμικών ακτίνων),  $A_{xy}$  (πλάτος της ημερήσιας ανισοτροπίας) και  $A_z$  (πλάτος ανισοτροπίας Βορρά – Νότου).

Η θεωρητική βάση της μεθόδου είναι η εξίσωση Parker (Parker, 1965):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla_i (K_{ij} \nabla_j N) - \nabla_i (U_i N) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial R} (NR) \nabla_i U_i \quad (4.16)$$

όπου  $N$  η πυκνότητα των κοσμικών σωματιδίων,  $R$  η μαγνητική δυσκαμψία,  $U_i$  η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και  $K_{ij}$  ο τένσορας ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων, που για το διαπλανητικό πεδίο λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{\perp} & K_A & 0 \\ -K_A & K_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\parallel} \end{bmatrix}$$

όπου τα στοιχεία της διαγωνίου περιγράφουν τη διάχυση των σωματιδίων παράλληλα ( $K_{\parallel}$ ) και κάθετα ( $K_{\perp}$ ) προς το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο, ενώ τα στοιχεία εκτός

της διαγωνίου περιγράφουν τις επιδράσεις της συμπαράσυρσης. Σημαντικότερο ρόλο στην ηλιακή διαμόρφωση των κοσμικών ακτίνων παίζει η διάχυση των κοσμικών σωματιδίων. Ορίζοντας ως  $\psi$  τη γωνία ανάμεσα στο διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και την ακτινωτή (από τον Ήλιο προς τη Γη) διεύθυνση, η κίνηση των κοσμικών σωματιδίων περιγράφεται από τον συντελεστή:

$$K_{TT} = K_{//} \cos^2 \psi + K_{\perp} \sin^2 \psi \quad (4.17)$$

Από την GSM μπορούν να προσδιοριστούν οι συντελεστές της ανισοτροπίας, όποτε είναι δυνατόν να επιλυθεί και το αντίστροφο πρόβλημα (Belon, 1987). Ειδικότερα, η σχέση ανάμεσα στο διάνυσμα της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων και στις μεταβολές κλίσης της πυκνότητας των σωματιδίων αυτών παίρνει τη μορφή:

$$\vec{A} = c\Lambda \vec{g} \quad (4.18)$$

όπου ο παράγοντας  $\Lambda$  (που αντιστοιχεί στον πίνακα των ελευθέρων διαδρομών) εξαρτάται από την ακτίνα Larmor ( $r = \frac{mu_{\perp}}{q|B|}$ ), η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του μέτρου του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, γνωρίζοντας το  $|B|$  και το άνυσμα της ανισοτροπίας  $\vec{A}$ , είναι δυνατόν να προσδιοριστούν σαφώς οι μεταβολές κλίσης πυκνότητας των κοσμικών σωματιδίων (Παπαϊωάννου, 2007; 2012).

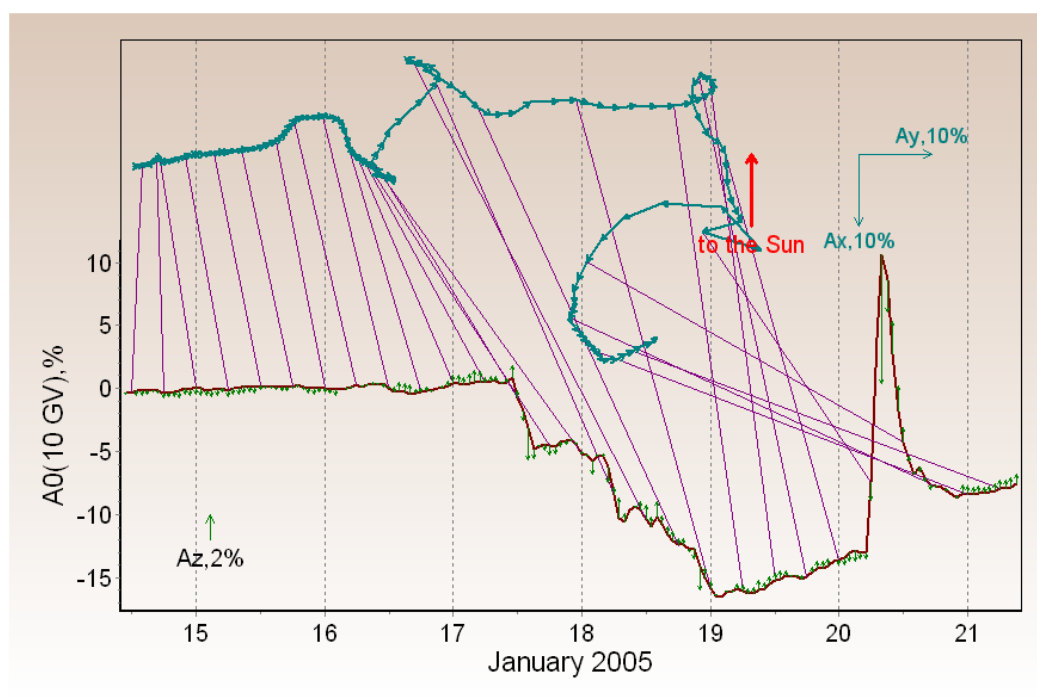
Είναι φανερό ότι η GSM μπορεί να αξιοποιηθεί ως δομικό εργαλείο για την ανάλυση του διαπλανητικού χώρου, αφού πρόκειται για μία πλήρη και καλά ορισμένη μέθοδο. Ειδικότερα μέσω της GSM (Παπαϊωάννου, 2007; 2012):

α) υπολογίζεται με ακρίβεια και αξιοπιστία η ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων σε τρεις διαστάσεις ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12.

β) ερευνάται η μακρόχρονη εξέλιξη της μεταβολής της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων και αναδεικνύονται περιοδικότητες άρρηκτα συνδεδεμένες με το διαπλανητικό και ηλιοσφαιρικό περιβάλλον.

γ) προσδιορίζονται πρόδρομα φαινόμενα προ-αύξησης και προ-μείωσης της έντασης των κοσμικών ακτίνων και ταυτοποιούνται με την έλευση και την άφιξη του κρουστικού κύματος στη Γη.

δ) εντοπίζονται οι ηλιακές πηγές των μειώσεων Forbush και εξηγείται η γεωμετρία της μαγνητικής φιάλης που δημιουργήσε τη μείωση Forbush.



Σχ. 4.12 Απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων, όπως προκύπτει από τη μέθοδο GSM.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι μέσες ωριαίες τιμές της έντασης των κοσμικών ακτίνων και οι συνιστώσες της πρώτης σφαιρικής αρμονικής της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων, που υπολογίζονται με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο, αποτελούν παγκόσμια χαρακτηριστικά των κοσμικών ακτίνων πέρα από τη μαγνητόσφαιρα και δεν εξαρτώνται από τη θέση του ανιχνευτή. Έτσι, η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις κατά τις οποίες οι ερευνητές απλώς χρησιμοποιούν δεδομένα ρυθμού καταμέτρησης από μεμονωμένους σταθμούς. Επιπλέον, τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά υπολογίζονται με υψηλή ακρίβεια (~ 0.05 % για ωριαίες μέσες τιμές) και παρέχουν με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα ακριβέστερων εκτιμήσεων των παραμέτρων των μειώσεων Forbush (Papaioannou et al., 2009).

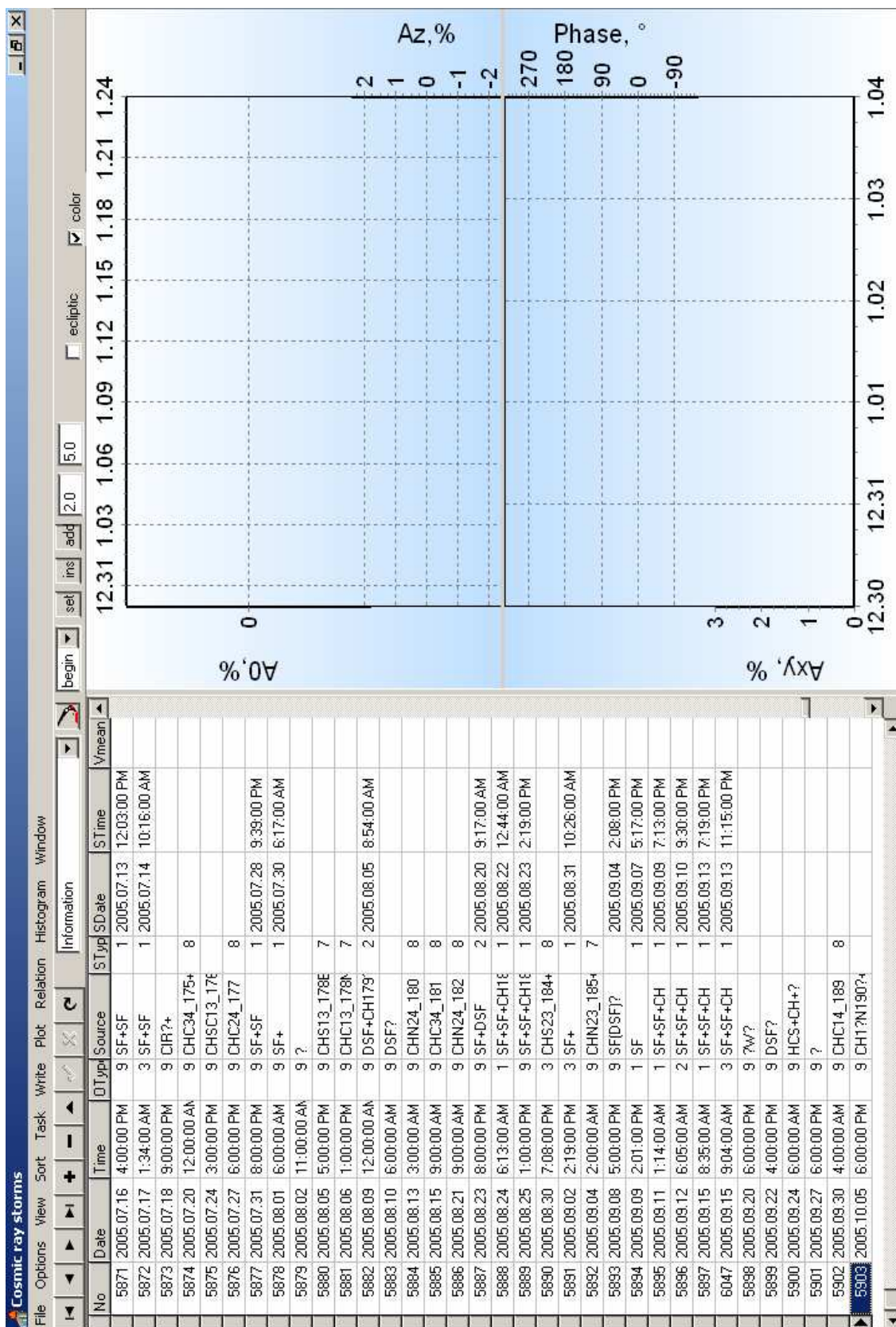
#### 4.7 Βάση Μειώσεων Forbush

Η ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN) της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών ξεκίνησε, το 1997, τη δημιουργία μίας βάσης μειώσεων Forbush και διαπλανητικών διαταραχών (Belov, 2008). Η βάση αυτή ενημερώνεται διαρκώς και από το 2005 συνδράμει σε αυτή την προσπάθεια και η Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Σήμερα η συγκεκριμένη βάση περιλαμβάνει 6519 γεγονότα που καλύπτουν τη χρονική περίοδο 1957 – 2012 και επιτρέπει την επιλογή γεγονότων σε σχέση με διαφορετικές παραμέτρους και στατιστικές εκτιμήσεις (βλ. Κεφ. V § 5.2) (Papaïliou et al., 2012b). Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα δείγμα της βάσης.

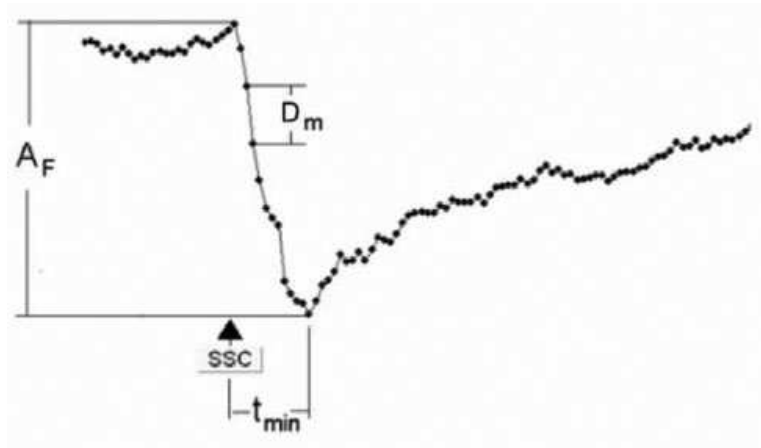
Η συγκεκριμένη βάση μειώσεων Forbush αποτελεί ένα σημαντικότατο εργαλείο μελέτης των διαφόρων φαινομένων του διαστημικού περιβάλλοντος, αφού παρέχει δεδομένα σχετικά με τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτές καταγράφονται από όλους τους μετρητές νετρονίων σε παγκόσμια κλίμακα, τις ηλιακές πηγές (source), δηλαδή ηλιακές εκλάμψεις ή στεμματικές οπές που σχετίζονται με την εκάστοτε μείωση Forbush, την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (IMF, nT) και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ( $V$ ,  $\text{km s}^{-1}$ ) αλλά και τους γεωμαγνητικούς δείκτες  $K_p$ ,  $A_p$  και  $Dst$  (όπως προκύπτουν από τη βάση OMNI, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Μεταξύ άλλων παραμέτρων δίνονται επίσης και το πλάτος της μείωσης Forbush ( $A_F$ , %), ο ελάχιστος ρυθμός μείωσης ( $D_{\min}$ ) και ο χρόνος ελαχίστου μείωσης ( $T_{\min}$ , h), όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.14, το πλάτος της ημερήσιας ανισοτροπίας ( $A_{xy}$ , %), το πλάτος ανισοτροπίας Βορρά – Νότου ( $A_z$ , %), ο χρόνος διαφοράς μεταξύ ελαχίστου και αρχικού σημείου μειώσεως ( $T_{d\min}$ , h), η χρονική διαφορά μεταξύ μίας μείωσης Forbush και της προηγούμενης ( $T_{bef}$ ) ή της επόμενης ( $T_{aft}$ ) ή η ελάχιστη χρονική διαφορά μεταξύ 2 μειώσεων Forbush ( $T_{from}$ ), κτλ.





Σχ. 4.13 Η αρχική σελίδα της βάσης των μειώσεων Forbush του IZMIRAN.

Στα σχήματα 4.15 και 4.16 έχουν σημειωθεί μέσα σε πλαίσιο οι στήλες με τα απαραίτητα για την παρούσα ανάλυση δεδομένα. Για κάθε μείωση Forbush εκτός από την ημερομηνία έναρξης, το μέγεθος του γεγονότος και την ώρα καταγραφής του SSC δίνονται τα χαρακτηριστικά της ηλιακής πηγής (ηλιογραφικές συντεταγμένες, ώρα καταγραφής και κατηγορία έκλαμψης), οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου, καθώς επίσης και η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των δεικτών  $K_p$  και  $Dst$  αντίστοιχα. Επίσης, στη βάση των μειώσεων Forbush εμφανίζονται μεταξύ άλλων και χρησιμοποιούνται στην ανάλυση τα αποτελέσματα των ωριαίων τιμών της έντασης των κοσμικών ακτίνων  $A_0$  των 10GV και η μέγιστη τιμή της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (η προβολή του διανύσματος της ανισοτροπίας στο ισημερινό επίπεδο της Γης) όπως προκύπτουν από την GSM (Belov et al., 2005b; Asipenka et al., 2009b; Παπαϊωάννου, 2012).



Σχ. 4.14 Τυπικό χρονικό προφίλ μίας μείωσης Forbush (Belov, 2008).

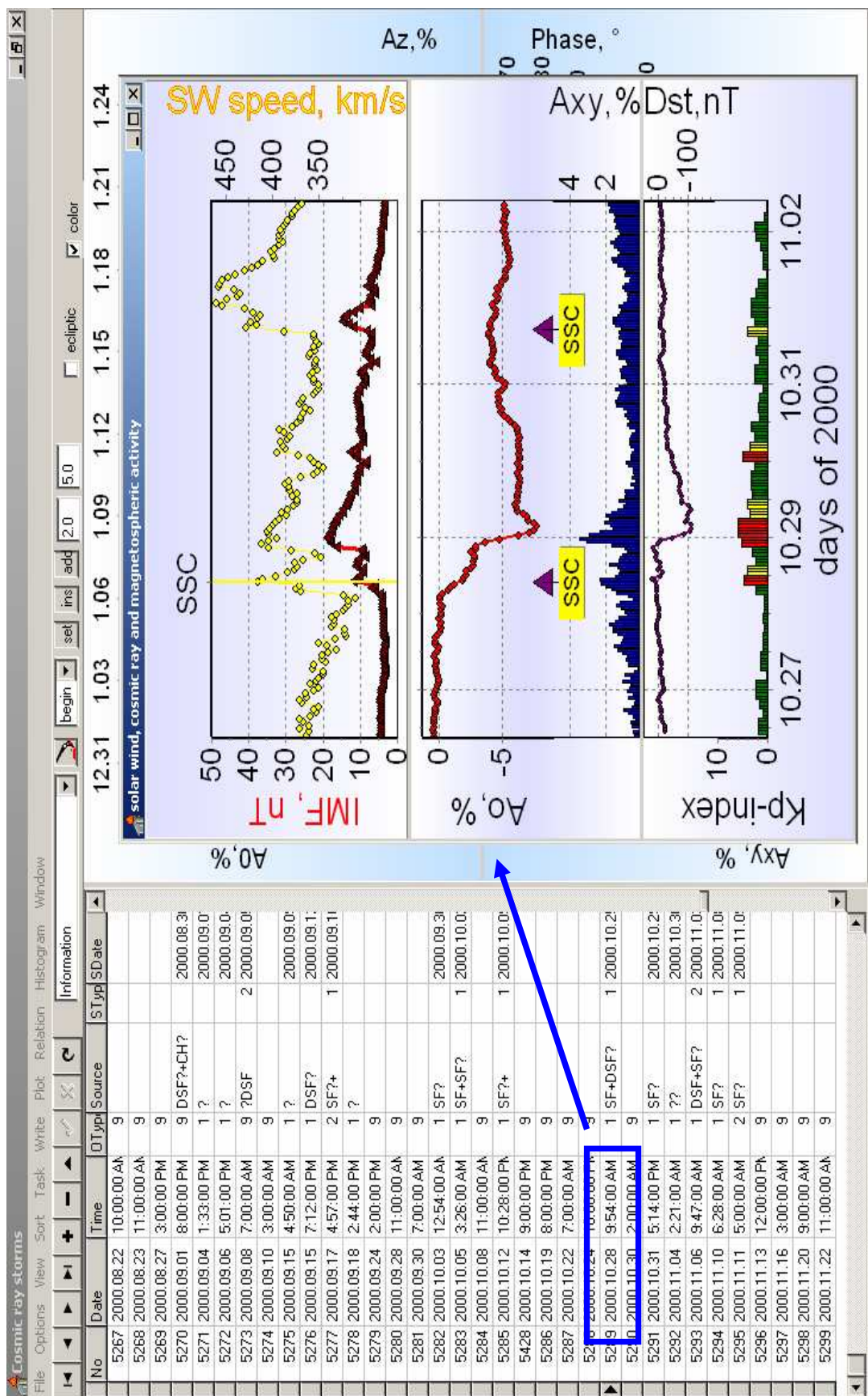
Όλα τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να παρασταθούν και γραφικά και να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να γίνει μία πιο πλήρης μελέτη των υπό εξέταση γεγονότων. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 4.17, όπου οι γραφικές παραστάσεις αφορούν στο επιλεγμένο γεγονός της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000.

No	Date	Time	DTyp	Source	STyp	SDate	STime	VMax	TVMax	HMax	THMax	ABZmax	BZmin	BZmax	BZmin
587	2005.05.08	8:00:00 AM	9	SF+SF+CH	1	2005.05.06	4:03:00 PM	1043	821	16.1	3	6.61	11.9	-11.9	0
588	2005.05.15	2:38:00 AM	1	SF	1	2005.05.13	4:13:00 PM	121	959	54.2	7	25.99	41.2	-41.2	0
589	2005.05.17	12:00:00 AM	9	7CH				-999	601	8.4	36	2.52	6.5	-5.5	0
590	2005.05.20	4:01:00 AM	3	SF	1	2005.05.16	12:46:00 PM	478	478	15	14	3.58	13.6	-9.7	0
591	2005.05.28	4:36:00 AM	3	DSF+SF+CH	2	2005.05.24	12:50:00 PM	479	464	12.7	14	2.95	6.4	-5.2	0
592	2005.05.29	9:52:00 AM	3	SF+DSF+CH	1	2005.05.26	1:10:00 PM	607	541	19.2	13	5.19	17.9	-16	0
593	2005.05.30	7:00:00 PM	9	SF+SF+CH		2005.05.26	8:57:00 PM	443	484	16.5	-2	3.99	15.8	-15.8	0
594	2005.06.02	1:00:00 PM	9	CHS14_168	8			-999	458	7.1	9	1.63	4.5	-4.5	0
595	2005.06.04	1:00:00 PM	9	CHN33_169				-999	647	14.9	9	4.82	7.6	-7.6	0
596	2005.06.06	7:00:00 PM	9	7W				-999	615	-1	5	2.46	4.7	-4.7	0
597	2005.06.11	6:00:00 PM	9	DSF?				-999	-999	-999	-999	-99.9	-99	999	0
598	2005.06.12	7:45:00 AM	1	SF?+CH170?	1	2005.06.09	1:28:00 PM	623	503	24.2	5	6.09	16.9	-16.9	0
599	2005.06.14	6:35:00 PM	1	SF?	1	2005.06.12	2:30:00 AM	650	553	11.5	1	3.18	7.5	-6.7	0
600	2005.06.16	8:47:00 AM	1	SF?+				835	686	19.5	1	6.69	8.6	-5.2	0
601	2005.06.21	8:00:00 PM	9	7CIR				-999	353	9.2	27	1.62	6.4	-5.9	0
602	2005.06.23	3:00:00 AM	9	CHN33_171+	6			0	662	21.1	7	6.98	17.2	-17.2	0
603	2005.06.27	4:00:00 PM	9	DSF?				-999	443	6.1	31	1.35	4.4	-1.8	0
604	2005.06.30	8:00:00 PM	9	CHC34_173	8			0	622	15.2	21	4.73	8.2	-8.2	0
605	2005.07.07	12:00:00 PM	9	CIR+7DSF				-999	355	7.1	13	1.26	4.7	-4.7	0
606	2005.07.09	3:00:00 AM	9	DSF+SF+CH		2005.07.05	2:52:00 PM	495	346	14.2	4	2.46	10.7	-10.7	0
607	2005.07.10	3:37:00 AM	3	SF+CH174?	1	2005.07.07	4:07:00 PM	700	474	25.2	5	5.97	18	-14.8	0
608	2005.07.12	6:00:00 AM	9	SF?+CH?	1	2005.07.09	9:47:00 PM	741	540	15.1	4	4.08	9.6	-9.6	0
609	2005.07.13	5:12:00 AM	1	SF+CH?				0	610	10.3	-1	3.14	8.8	-7	0
610	2005.07.16	2:00:00 AM	9	SF+DSF+SF	1	2005.07.12	3:47:00 PM	507	-999	-999	-999	-99.9	-99	999	0
611	2005.07.16	4:00:00 PM	9	SF+SF	1	2005.07.13	12:03:00 PM	545	-999	-999	-999	-99.9	-99	999	0
612	2005.07.17	1:34:00 AM	3	SF+SF	1	2005.07.14	10:16:00 AM	658	492	14.6	20	3.59	10.4	-8.9	0
613	2005.07.18	9:00:00 PM	9	CIR?+				-999	408	7.6	24	1.55	4.9	-4.9	0
614	2005.07.20	12:00:00 AM	9	CHC34_175+	8			-999	620	12.9	12	4	7.9	-7.9	0
615	2005.07.24	3:00:00 PM	9	CHSCT3_176				0	406	7.6	69	1.54	3.8	-3.7	0
616	2005.07.27	6:00:00 PM	9	CHC24_177	8			0	613	13.1	3	4.02	6.4	-6.4	0
617	2005.07.31	8:00:00 PM	9	SF+SF	1	2005.07.28	9:39:00 PM	592	-999	-999	-999	-99.9	-99	999	0
618	2005.08.01	6:00:00 AM	9	SF+	1	2005.07.30	6:17:00 AM	872	607	11.5	1	3.49	3.8	-3.8	0
619	2005.08.02	11:00:00 AM	9	?				-999	499	11.3	2	2.82	8.5	-4.2	0
620	2005.08.05	5:00:00 PM	9	CHS13_178E	7			-999	508	9	3	2.29	6.2	-6.2	0

Σχ. 4.15 Στήλες όπου σημειώνονται η ημερομηνία καταγραφής του γεγονότος, η ώρα καταγραφής του SSC, ο τύπος, η ημερομηνία και η ώρα καταγραφής της ηλιακής πηγής, που σχετίζεται με το γεγονός, η μέση ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

TFrom	RBulk	FData	WMagn	SDur	RB2	RB4	Ala	Hlat	Hlon	begin	set	ins	add	Sat	Magn	MagnC	Range	A10	Axym	Axm	Aym	Pxyl
15.6		X12.0/4B	0.0012	81			33	-44		37	-51	6.67		6.67	8.8	8.8	8.67	8.8	4.52	1.14	4.37	
15.6		M 4.2/3B	4.2E-5	279			27	-24		121	-134	7.33		7.33	3.4	3.6	3.42	3.4	4.11	2.08	3.55	
25		X10.0/3B	0.001	167			34	-4		126	-140	7.67		7.67	7.2	7.2	10.51	7.2	3.74	1.53	3.41	
31.8		X12.0/3B	0.0012	71			31	17		123	-103	7.67		7.67	20.5	20.5	19.79	20.51	5.61	1.55	5.39	
31.8			-99.9				-91	-999		96	-114	7.67		7.67	3.2	3.2	23.56	3.2	2.87	0.81	2.75	
9		X12.0/3B	0.0012	189			33	69		50	-31	6.33		6.33	2.9	3.8	2.89	2.9	2.79	0.27	2.78	
9		M 5.5/2B	5.5E-5	47			-14	80		86	-70	7.33		7.33	2.3	2.3	9.08	2.3	2.15	0.4	2.11	
67			-99.9				-91	-999		62	-79	6		6	2.5	2.5	2.47	2.51	1.5	0.35	1.46	
67			-99.9				-91	-999		38	-46	4.33		4.33	0.6	0.6	1.41	0.6	0.65	0.25	0.6	
54.9		M 1.4/2N	1.4E-5	115			-7	-11		64	-55	4.33		4.33	4.7	4.7	26.13	4.67	2.97	1.92	2.26	
35.8		M 5.0/1N	5E-5	37			-6	19		62	-57	4.67		4.67	5.9	5.9	5.92	5.92	2.12	1.67	-1.3	
35.8			-99.9				-91	-999		50	-41	4.67		4.67	2.1	2.1	2.12	2.11	1.23	1.23	0.05	
49.1		M 4.6/1N	4.6E-5	25			27	-56		72	-45	4.67		4.67	0.4	0.4	2.55	2.65	2.28	0.3	2.26	
44.4		X 1.9/2B	0.00019	46			26	-3		226	-194	8		8	10.5	10.5	10.35	10.5	4.45	-0.5	4.42	
44.4			-99.9				-91	-999		44	-72	5		5	1.3	1.3	5.9	1.3	2.38	0.79	2.25	
17.2		M 3.6/2N	3.6E-5	143			-22	-34		56	-51	5.67		5.67	4.9	4.9	4.79	4.85	2.84	0.96	2.67	
17.2		M 7.3/3B	7.3E-5	257			22	51		162	-183	8.67		8.67	3.7	3.7	5.39	3.7	3.74	-3.48	1.38	
75.1		M 1.9/2N	1.9E-5	141			35	37		72	-94	5.67		5.67	0.5	0.5	8.36	0.5	1.27	0.89	0.91	
75.1		X 1.1/2B	0.00011	35			-25	-46		47	-73	6.33		6.33	7	7	6.05	7	0.98	0.26	-0.94	
52			-99.9				-91	-999		28	-35	4.67		4.67	1.1	1.1	2.19	1.1	1.02	1.02	-0.06	
52			-99.9				-91	-999		32	-30	3.67		3.67	1	1	1.99	1	1.22	-0.68	1.01	
55.3		C 4.7/SF	4.7E-6	104			-2	-10		26	-16	4		4	0.5	0.5	25.74	0.5	1.14	-0.23	1.12	
16.3		M 1.0/SF	1E-5	36			-17	-28		61	-57	6		6	0.5	0.5	0.49	0.52	1.18	-0.79	0.88	
16.3	74.9	X 2.3/2B	0.00023	89			-17	-11		84	-114	6.33		6.33	1.3	1.3	1.29	1.32	1.33	1.33	0.08	
38.5			-99.9				-91	-999		60	-95	6		6	0.9	0.9	1.79	0.9	1.34	-0.72	1.13	
48.8		X 1.5/2B	0.00015	52			25	-15		75	-88	6		6	1.8	1.8	2.33	1.81	2.05	2.01	0.42	
32.9			-99.9				-91	-999		35	-37	4.33		4.33	1.7	1.7	1.63	1.71	1.75	0.02	1.75	
32.9		M 1.6/1B	1.6E-5	84			20	37		136	-99	7.33		7.33	1	1	1.8	1	1.84	-0.52	1.76	
45			-99.9				-91	-999		82	-99	5.33		5.33	2.5	2.5	2.33	2.52	1.9	-0.12	1.9	
57.6			-99.9				-91	-999		42	-58	4.33		4.33	1.8	1.8	1.85	1.75	1.27	-0.35	1.22	
28.2		M 6.7/1B	6.7E-5	60			-10	-65		172	-170	7.67		7.67	7.8	7.8	7.86	7.84	3.13	1.22	2.88	
9.3		M 1.4/1N	1.4E-5	53			-20	-18		25	-72	4		4	1.5	1.5	1.53	1.52	1.41	0.63	-1.26	
9.3		M 1.1/1F	1.1E-5	46			-16	-42		110	-143	7.67		7.67	1.8	1.8	2.62	1.8	1.68	1.21	-1.16	
40.3			-99.9	132			-91	-999		65	-92	7		7	0.2	0.2	2.37	2.7	1.36	1.18	-0.68	

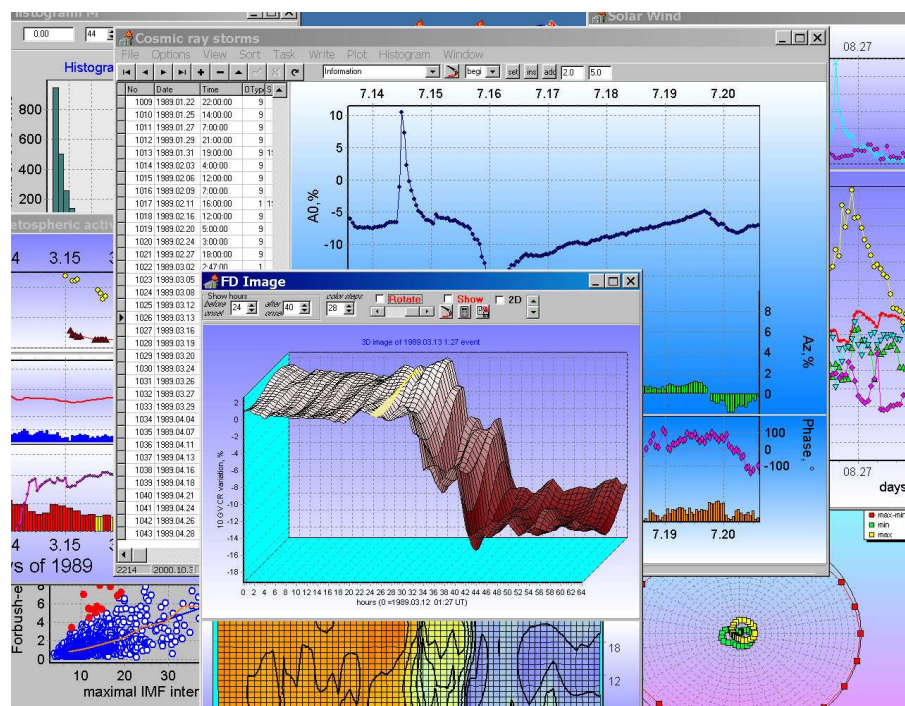
Σχ. 4.16 Στήλες όπου σημειώνονται η τάξη της ηλιακής έκλαμψης και οι ηλιογραφικές συντεταγμένες της καθώς επίσης και οι τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών Dst και Kp αλλά και το μέγεθος της μείωσης Forbush και η μέγιστη ανισοτροπία για το εκάστοτε γεγονός.



Σχ. 4.17 Μεταβολές ηλιακών, διαπλανητικών και γεωμαγνητικών παραμέτρων, όπως προκύπτουν από τη βάση των μειώσεων Forbush για το εκάστοτε γεγονός.

Επομένως, είναι φανερό ότι μία τέτοια βάση δεδομένων έχει αρκετά πλεονεκτήματα (Belov, 2008; 2012a; Παπαϊωάννου, 2012) και παρέχει πολλές δυνατότητες (Σχ. 4.18) καθώς:

- ❖ Βασίζεται στα φυσικά χαρακτηριστικά της έντασης και της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων μαγνητικής δυσκαμψίας 10 GV (ενέργειας 9 GeV), οι οποίες προκύπτουν από όλους τους μετρητές νετρονίων και όχι από τα δεδομένα κάθε μετρητή ξεχωριστά.
- ❖ Στηρίζεται στη σφαιρική παγκόσμια καταγραφή του γεγονότος και όχι στη μεμονωμένη εμφάνισή του σε έναν ανιχνευτή, γι' αυτό και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται για μεμονωμένα γεγονότα (π.χ. το πλάτος μείωσης Forbush) είναι πολύ πιο ακριβή.
- ❖ Περιέχει όλα τα γεγονότα που σημειώθηκαν τη χρονική περίοδο που καλύπτει, ακόμη και αυτά με μικρό πλάτος (0.5 – 1.0%), τα οποία, όμως, σχετίζονται με σημαντικές διαπλανητικές διαταραχές και συνεπώς μπορούν να κρύβουν κάποια σημαντική φυσική πληροφορία.
- ❖ Παρέχει αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούν στο διαπλανητικό και ηλιακό περιβάλλον μέσα στο οποίο εξελίσσεται κάθε γεγονός. Είναι, επομένως, ξεκάθαρο ότι μία τέτοια βάση είναι μία πλήρης βάση καταγεγραμμένων μεταβολών του διαπλανητικού περιβάλλοντος.

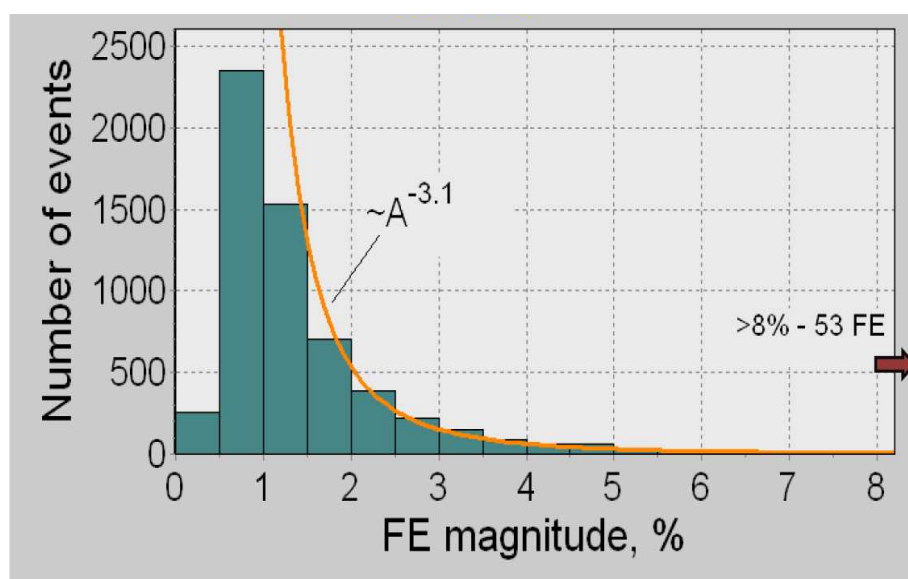


Σχ. 4.18 Δυνατότητες που παρέχονται από τη βάση μειώσεων Forbush (Belov, 2012a).

### 4.7.1 Χαρακτηριστικά μειώσεων Forbush

Στη συνέχεια αναφέρονται μερικά συμπεράσματα που αφορούν στα χαρακτηριστικά των μειώσεων Forbush, όπως προκύπτουν από τα δεδομένα της βάσης των μειώσεων Forbush.

Στο σχήμα 4.19 δίνεται η κατανομή των μειώσεων συναρτήσει του πλάτους τους  $A_F$  (%). Όπως παρατηρείται το μέγιστο της κατανομής βρίσκεται κοντά περίπου στο 1%, το οποίο εξηγείται αν ληφθεί υπόψη ότι στη βάση περιλαμβάνονται και γεγονότα με μικρό πλάτος. Επίσης φαίνεται ότι, για πλάτη  $A_F > 1.5\%$  η κατανομή περιγράφεται από νόμο δύναμης με δείκτη  $3.1 \pm 0.1$ . Αυτός ο δείκτης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο που αφορά σε ηλιακές παραμέτρους, όπως π.χ για τις μαλακές ακτίνες X παίρνει την τιμή 2.19 (Hudson, 2007; Belov, 2008).



Σχ. 4.19 Ο αριθμός των μειώσεων Forbush συναρτήσει του πλάτους τους  $A_F$  (Belov, 2008).

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω κατανομή των μειώσεων Forbush βάσει του πλάτους είναι δυνατό να δοθεί απάντηση και στο ερώτημα σχετικά με το ποιες μειώσεις θεωρούνται μεγάλες. Συγκρίνοντας τη συχνότητα κατανομής των μειώσεων Forbush με αυτή των γεωμαγνητικών καταιγίδων διαφορετικής έντασης ([http://www.swpc.noaa.gov/NOAA\\_scales](http://www.swpc.noaa.gov/NOAA_scales)) προκύπτει ότι μειώσεις Forbush με πλάτος  $> 3\%$  αντιστοιχούν σε έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες ( $Kp \geq 7$ ) και τέτοια γεγονότα

καταγράφονται κατά μέσο όρο μία φορά κάθε 36 ημέρες. Γενικώς, όμως, τέτοια ισχυρά γεγονότα είναι σπάνια. Μειώσεις Forbush πλάτους  $> 12.5\%$  αντιστοιχούν σε ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες, οι οποίες παρατηρούνται κατά μέσο όρο μία φορά κάθε τρία χρόνια (Πίνακας 4.2) (Belon, 2008). Σημειώνεται ότι οι μειώσεις Forbush και οι γεωμαγνητικές καταιγίδες είναι δύο φαινόμενα τα οποία δεν έχουν σχέση 1 – 1, αφού δεν οφείλονται στον ίδιο μηχανισμό (Kudela & Brenkus, 2004). Οι μειώσεις Forbush είναι ηλιοσφαιρικό φαινόμενο ενώ οι γεωμαγνητικές καταιγίδες οφείλονται στο φαινόμενο της μαγνητικής επανασύνδεσης.

**Πίνακας 4.2** Ρυθμός εμφάνισης γεωμαγνητικών καταιγίδων και μειώσεων Forbush.

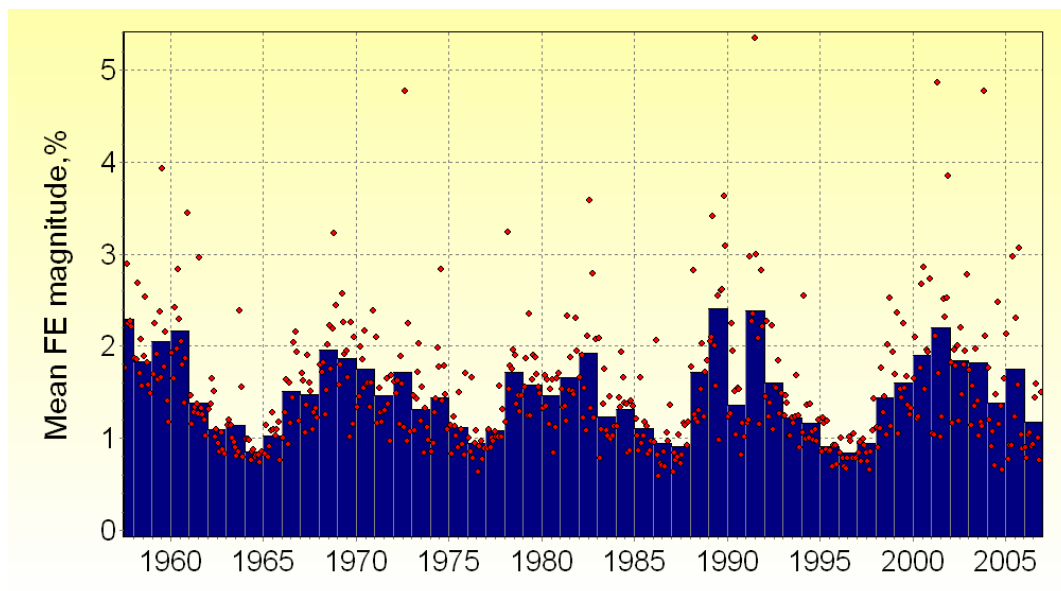
	$Kp_{max}$	N	FE, %	N	1 ανά
<b>μικρή</b>	$\geq 5^-$	2752	$> 1$	2930	6 ημέρες
	$\geq 6^-$	1318	$> 1.7$	1363	14 ημέρες
<b>μεσαία</b>	$\geq 7^-$	508	$> 3$	498	36 ημέρες
	$\geq 8^-$	190	$> 4.9$	188	3 μήνες
<b>ισχυρή</b>	$= 9$	16	$> 12.5$	16	3 χρόνια

Η συμπεριφορά του πλάτους των μειώσεων Forbush παρουσιάζει μία περιοδικότητα 11ετούς κύκλου. Αυτό, άλλωστε, προκύπτει και από το σχήμα 4.20 όπου δίνεται η μηνιαία και η ετήσια κατανομή του μέσου πλάτους των μειώσεων Forbush για το χρονικό διάστημα 1957 – 2006. Παρόμοια περιοδικότητα εμφανίζεται, επίσης, στον ετήσιο αριθμό των γεγονότων με πλάτη  $> 2\%$  και  $> 5\%$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.21 (Belon, 2008). Αυτό προφανώς οφείλεται στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των μειώσεων Forbush παρουσιάζουν σποραδικό χαρακτήρα και συνδέονται άρρηκτα με την εμφάνιση ισχυρών στεμματικών εκτινάξεων μάζας. Συνεπώς και η εμφάνισή τους ακολουθεί το ρυθμό εμφάνισης αυτών με ένα 11ετή κύκλο περιοδικότητας (Παπαιωάννου, 2012).

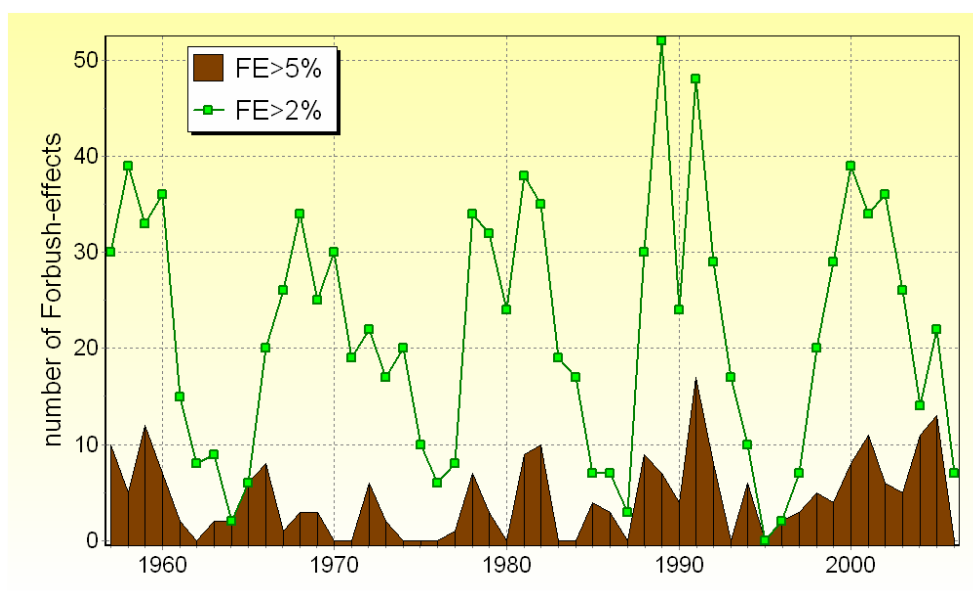
Συγκρίνοντας τον αριθμό των μειώσεων Forbush διαφορετικού πλάτους σε διαφορετικούς ηλιακούς κύκλους προκύπτουν κάποια πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ο μέγιστος αριθμός ηλιακών κηλίδων που σημειώθηκε τον 23ο ηλιακό κύκλο είναι παρόμοιος με τον αντίστοιχο για τον 20ο ηλιακό κύκλο. Αλλά δεν παρατηρείται το ίδιο με τον αριθμό των μειώσεων Forbush για τους συγκεκριμένους κύκλους. Στον 20ο ηλιακό κύκλο οι μειώσεις Forbush που κατεγράφησαν με πλάτος



> 5% ήταν 23, ενώ στον 23ο ηλιακό κύκλο ο αριθμός τους έφτασε τις 50. Γενικά, οι μεγάλες μειώσεις Forbush εμφανίζονται πιο συχνά στον 23ο ηλιακό κύκλο, από ότι σε οποιοδήποτε άλλο ηλιακό κύκλο ξεκινώντας από τον 19ο (Belon, 2008).

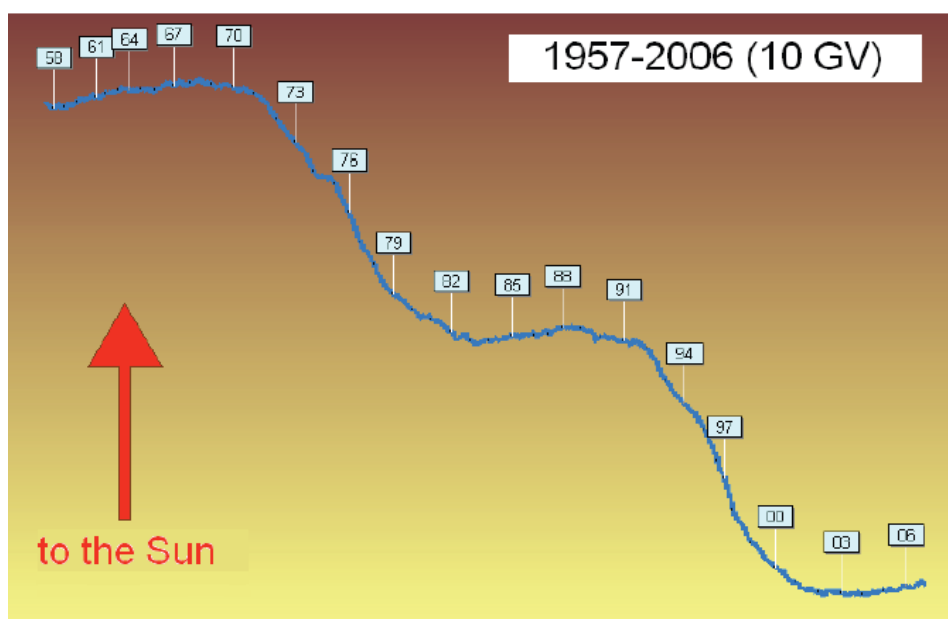


Σχ. 4.20 Μηνιαία (σημεία) και ετήσια (ραβδογράμματα) κατανομή του μέσου πλάτους των μειώσεων Forbush για το διάστημα 1957 – 2006 (Belon, 2012a).



Σχ. 4.21 Ετήσιος αριθμός μειώσεων Forbush με πλάτος > 2% (πράσινη γραμμή) και > 5% (καφέ περιοχή) (Belon, 2012a).

Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.22, δίνεται η συμπεριφορά της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας για το χρονικό διάστημα 1957 – 2006, όπως έχει υπολογιστεί από την ομάδα του IZMIRAN. Προκύπτει από το συγκεκριμένο διάγραμμα ότι η ανισοτροπία παρουσιάζει μία αργή, ομαλή και καλά ορισμένη μεταβολή. Παρ' όλα αυτά η ανισοτροπία μεταβάλλεται έντονα κατά τη διάρκεια μεγάλων μειώσεων Forbush. Επιπλέον κατά τη διάρκεια των μειώσεων Forbush παρατηρείται η μεγαλύτερη ανισοτροπία των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων (Belov, 2008).



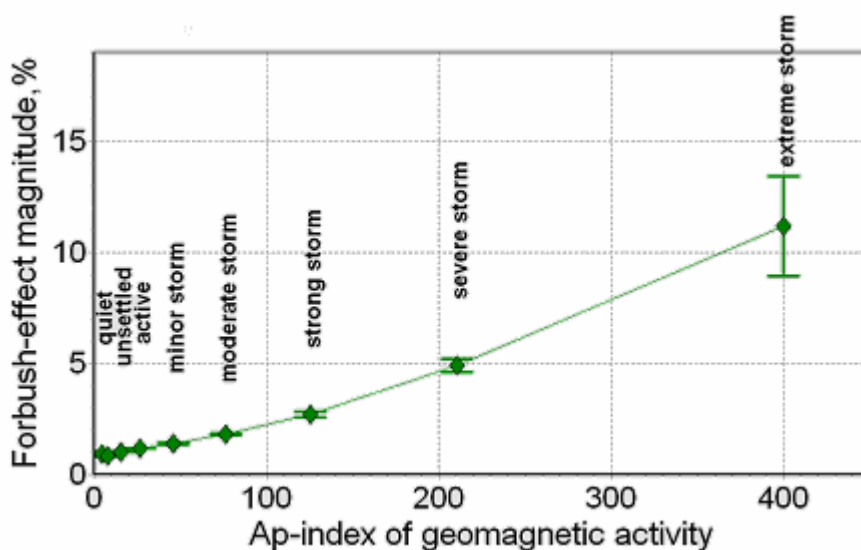
Σχ. 4.22 Συμπεριφορά του ανύσματος της ισημερινής ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων των 10 GV για το χρονικό διάστημα 1957 – 2006 (Belov, 2008).

#### 4.7.2 Αποτελέσματα από τη βάση των μειώσεων Forbush

Οι μειώσεις Forbush είναι ένα μέρος ενός περίπλοκου συνόλου σποραδικών φαινομένων που χαρακτηρίζουν μία ηλιακή – ηλιοσφαιρική καταιγίδα. Γι' αυτό και είναι φυσικώς αναμενόμενο να υπάρχουν στατιστικές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων των μειώσεων Forbush και άλλων φαινομένων, από ηλιακές εκλάμψεις έως γεωμαγνητικές διαταραχές (Belov, 2008).

Ο Belov (2008) υπολόγισε το μέσο πλάτος των μειώσεων Forbush σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, ξεκινώντας από πολύ

χαμηλή ( $K_p < 2$ ) έως και ισχυρή ( $K_p = 9$ ) χρησιμοποιώντας δεδομένα από το 1957 έως και το 2006 (Σχ. 4.23). Όπως φαίνεται, υπάρχει μία στατιστική σχέση μεταξύ του πλάτους της μείωσης Forbush και του επιπέδου γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Μειώσεις Forbush μικρού πλάτους ( $< 1\%$ ) συνήθως αντιστοιχούν σε ήσυχες ή ελαφρώς διαταραγμένες γεωμαγνητικές συνθήκες. Αντιθέτως, ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες συνήθως, αλλά όχι πάντα, προηγούνται ισχυρότατων μειώσεων Forbush, όπως για παράδειγμα τα γεγονότα του Αυγούστου 1972, του Ιουλίου 1982 και του Οκτωβρίου 2003. Από το σύνολο 16 γεωμαγνητικών καταιγίδων με  $K_p = 9$ , οι 13 προηγούνταν μειώσεων Forbush πλάτους  $> 5\%$ . Από την άλλη, τις μισές από τις 10 ισχυρότερες μειώσεις Forbush σε διάρκεια 50 χρόνων ακολούθησαν ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες. Παρ' όλα αυτά, η σχέση μεταξύ των μειώσεων Forbush και των γεωμαγνητικών καταιγίδων είναι στατιστικού χαρακτήρα και γι' αυτό και συχνά παραβιάζεται.

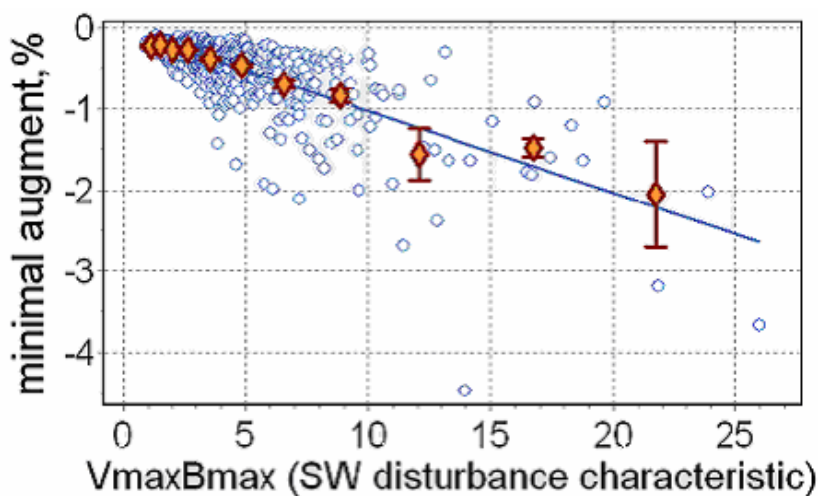


Σχ. 4.23 Μέσο πλάτος (%) των μειώσεων Forbush συναρτήσει του γεωμαγνητικού δείκτη  $A_p$  (Belov, 2008).

Είναι προφανές ότι, όσο πιο γρήγορη είναι η διάδοση της διαπλανητικής διαταραχής και όσο πιο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο που περιέχει τόσο πιο απότομη θα είναι η μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων κατά την κύρια διάρκεια της μείωσης Forbush. Αν υποθεθεί ότι, ο ρυθμός μείωσης για κοσμικές ακτίνες ορισμένης δυσκαμψίας  $R$  είναι αντιστρόφως ανάλογος του χρόνου  $t_r$ , ο

οποίος απαιτείται ώστε μία διαταραχή να καλύψει απόσταση ίση με τη γυροακτίνα σωματιδίου ίδιας δυσκαμψίας, τότε το  $D_m$  (η μέγιστη μείωση της έντασης των κοσμικών ακτίνων) είναι ανάλογο του γινομένου  $VB$ , όπου  $V$  και  $B$  είναι η τιμή της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα στο πιο διαταραγμένο μέρος της διαπλανητικής διαταραχής. Η παράμετρος  $VB$  έχει υπολογιστεί εντός της βάσης των μειώσεων Forbush για κάθε γεγονός ως  $V_{max}B_{max}$  (οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου και της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στη συγκεκριμένη διαταραχή νορμαλισμένες ως προς  $400 \text{ km s}^{-1}$  και  $5\text{nT}$  αντίστοιχα).

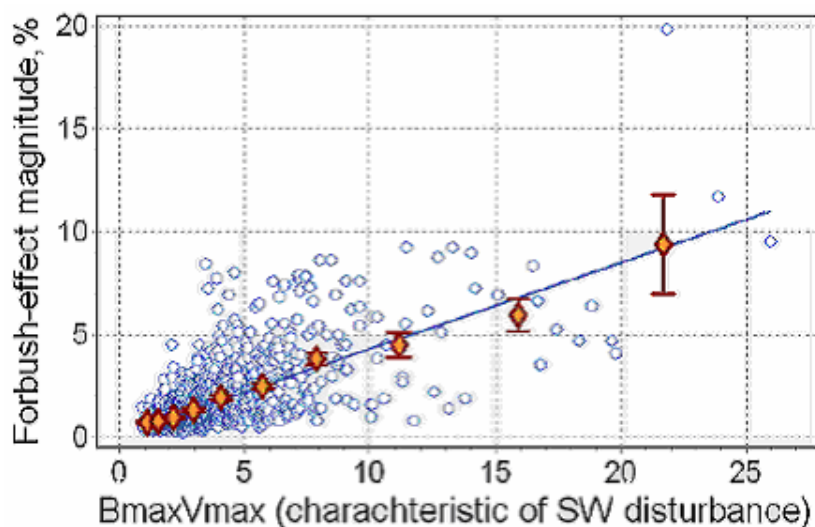
Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων  $D_m$  και  $V_{max}B_{max}$  παρουσιάζεται στο σχήμα 4.24 και όπως φαίνεται είναι σχεδόν γραμμική. Ομοίως και το πλάτος  $A_F$  των μειώσεων Forbush συσχετίζεται με την παράμετρο  $V_{max}B_{max}$ , όπως δίνεται στο σχήμα 4.25.



Σχ. 4.24 Εξάρτηση της ελάχιστης αύξησης  $D_m$  των μειώσεων Forbush από το γινόμενο  $V_{max}B_{max}$  (Belov, 2008).

Η εξάρτηση των χαρακτηριστικών των μειώσεων Forbush από το ηλιογραφικό μήκος των ηλιακών πηγών έχει συζητηθεί εκτενώς (Barnden, 1973a; b; Iucci et al., 1986; Cane & Richardson, 2003; Belov et al., 2008a). Η πλειοψηφία των στεμματικών εκτινάξεων μάζας που σχετίζονται με ηλιακές εκλάμψεις, οι οποίες παρατηρούνται πέρα από τον κεντρικό τομέα, συνήθως δεν προκαλούν μειώσεις

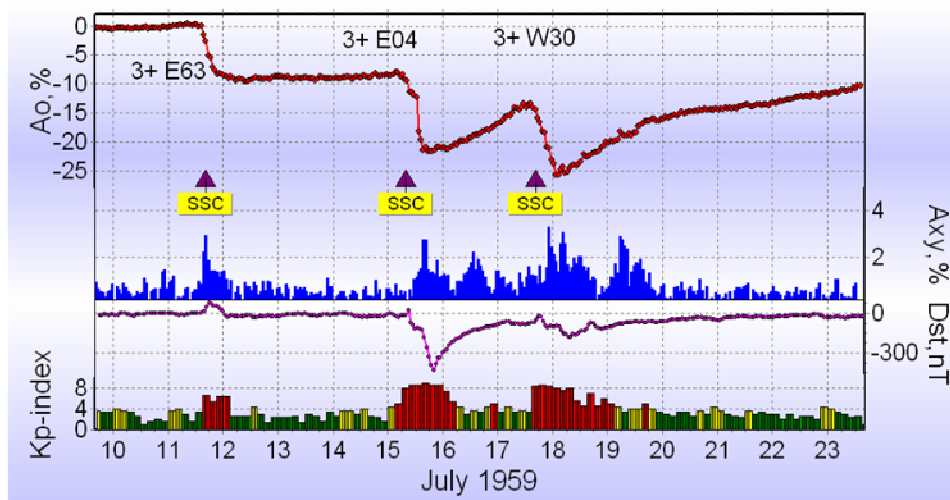
Forbush κοντά στη Γη και αν προκαλέσουν αυτές είναι πολύ μικρές. Παρ' όλα αυτά ο συγκεκριμένος κανόνας έχει και εξαιρέσεις οι οποίες δεν είναι τόσο σπάνιες (Belov, 2008). Συνήθως σχετίζονται με εξαιρετικά μεγάλες και ισχυρές CMEs. Παρατηρώντας τις μεταβολές των κοσμικών ακτίνων κοντά στη Γη προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με μεγαλύτερες μεταβολές σε μεγαλύτερες αποστάσεις (ανατολικά ή δυτικά της Γης).



Σχ. 4.25 Εξάρτηση του πλάτους των μειώσεων Forbush από το γινόμενο  $V_{max}B_{max}$  (Belov, 2008).

Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζονται τρεις ισχυρές μειώσεις Forbush που σημειώθηκαν τον Ιούλιο 1959. Κατά τη διάρκεια μίας εβδομάδας, στις 11, 15 και 17 Ιουλίου 1959 τρία ισχυρά κρουστικά κύματα έφτασαν στη Γη μετά τα οποία ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες και απότομες μειώσεις Forbush με πλάτη 10.1, 14.8 και 14.4% κατεγράφησαν. Καθένα από αυτά τα τρία γεγονότα συνδεόταν αντιστοίχως με ισχυρή ηλιακή έκλαμψη οπτικής σημαντικότητας 3+ (Dorman, 1963) που σημειώθηκε στις 10, 14 και 16 Ιουλίου. Και οι τρεις ηλιακές εκλάμψεις προήλθαν από μία ενεργό περιοχή ηλιογραφικού πλάτους N15 – N26 και διακρίνονταν, κυρίως, λόγω του ηλιογραφικού τους μήκους, E64 για την πρώτη, E04 για τη δεύτερη και W30 για την τρίτη. Σύμφωνα με την τωρινή θεώρηση προκύπτει ότι και στις τρεις περιπτώσεις ισχυρές διαπλανητικές διαταραχές ήρθαν στη Γη, ως αποτέλεσμα ισχυρών και γρήγορων CMEs, των οποίων τα κέντρα βρίσκονταν κοντά στις αναφερθείσες εκλάμψεις. Αυτά τα τρία γεγονότα κοσμικής ακτινοβολίας (μαζί με τις

σχετικές γεωμαγνητικές καταιγίδες) συνδέονταν με ανατολικές, κεντρικές και δυτικές CMEs και οι διαφορές μεταξύ τους εξηγούνται βάσει της διαφοράς της σχετικής θέσης αυτών των εκτινάξεων μάζας και της Γης (Belov, 2008).

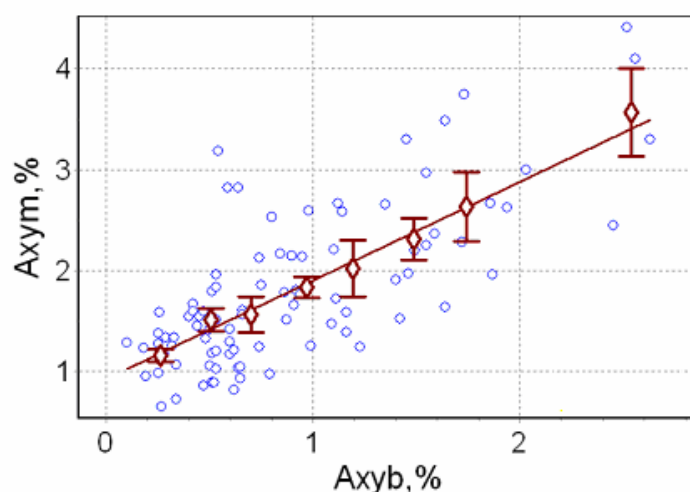


Σχ. 4.26 Μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (άνω διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για τα γεγονότα που σημειώθηκαν 10 – 21 Ιουλίου 1959. Στο πάνω μέρος σημειώνονται η οπτική σημαντικότητα και τα ηλιογραφικά μήκη των ηλιακών εκλάμψεων που σχετίζονται με τα κρουστικά κύματα τα οποία δημιούργησαν τα SSCs (Belov, 2008; 2012a).

Η πρώτη μείωση Forbush στις 11 Ιουλίου παρουσίασε ένα παρατεταμένο προφίλ και δεν είχε επανέλθει πλήρως μέχρι τη στιγμή της έναρξης της επόμενης μείωσης. Την ακολούθησε μία σύντομη και μέτριας έντασης γεωμαγνητική καταιγίδα ( $Kp_{max} = 7$ ,  $Dst = -36$  nT). Το δεύτερο γεγονός ήταν το μεγαλύτερο από τα τρία. Παρουσίασε μία γρήγορη μείωση, δύο βημάτων, της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και μία σχετικά γρήγορη επαναφορά. Η γεωμαγνητική καταιγίδα για το συγκεκριμένο γεγονός δεν ήταν μόνο η μεγαλύτερη από τις τρεις, αλλά ήταν μία από τις ισχυρότερες καταιγίδες με βάση τα δεδομένα του δείκτη  $Dst$ , ο οποίος είχε την τιμή  $-429$  nT στις 15 Ιουλίου και ο  $Kp$  τη μέγιστη τιμή 9. Το τρίτο γεγονός ήταν παρόμοιο του πρώτου ως προς τον ρυθμό μείωσης αλλά είχε την πιο γρήγορη επαναφορά. Το ακολούθησε μία ισχυρή καταιγίδα ( $Kp_{max} = 9$ ,  $Dst_{min} = -183$  nT). Στην πρώτη περίπτωση η Γη εισήλθε σε μία απομακρυσμένη δυτική περιοχή της εξ ανατολών εκτινάξης και στη συνέχεια σταδιακά πλησίασε προς το κεντρικό της τμήμα. Στη δεύτερη περίπτωση είναι φυσικό να υποτεθεί ότι η Γη πέρασε από το

κεντρικό τμήμα της διαταραχής συμπεριλαμβανομένου και ενός μαγνητικού νέφους. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση το κύριο μέρος της διαταραχής βρέθηκε στα δυτικά της Γης και η Γη γρήγορα άφησε την κύρια περιοχή της μείωσης Forbush (Belov, 2008).

Τέλος σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα απομακρυσμένα ηλιοσφαιρικά γεγονότα, μπορούν να προκύψουν από τις μεταβολές της έντασης των κοσμικών ακτίνων και συγκεκριμένα τη μελέτη των προειδοποιητικών σημάτων των μειώσεων Forbush. Μερικές φορές οι αλλαγές στη συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων ξεκινά πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος ή της διαταραχής στη Γη. Η επίδραση του κρουστικού κύματος που πλησιάζει είναι ένας περίπλοκος συνδυασμός προ-μειώσεων και προ-αυξήσεων στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτή η επίδραση αποτυπώνεται τόσο στις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας όσο και στην ημερήσια ανισοτροπία αυτών.



Σχ. 4.27 Μέγιστο πλάτος  $A_{\gamma m}$  (%) της ημερήσιας ανισοτροπίας του ισημερινού επιπέδου κατά τη διάρκεια της μείωσης Forbush συναρτήσει του πλάτους  $A_{\gamma b}$  (%) της ημερήσιας ανισοτροπίας του ισημερινού επιπέδου πριν από την έλευση του κρουστικού κύματος (Belov, 2008).

Το σχήμα 4.27 αναφέρεται σε όλες τις μειώσεις Forbush, οι οποίες σημειώθηκαν το χρονικό διάστημα 1964 – 2006 σε ήρεμο υπόβαθρο. Όπως φαίνεται υπάρχει μία σύνδεση (ο συντελεστής συσχέτισης είναι 0.74) μεταξύ της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων, όπως αυτή μετράται μία ώρα πριν το κρουστικό κύμα ( $A_{\gamma b}$ , %) και της ανισοτροπίας μέσα στη μείωση Forbush ( $A_{\gamma m}$ , %). Μία πιο λεπτομερής ανάλυση δείχνει ότι σε μερικές ομάδες γεγονότων (κυρίως σε αυτά που σχετίζονται

με δυτικές ηλιακές πηγές) τα προειδοποιητικά σήματα είναι αρκετά έντονα και παρατηρήσιμα έως και μία ημέρα πριν την άφιξη του κρουστικού κύματος στη Γη. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού, οι μειώσεις Forbush είναι ένα ηλιοσφαιρικό φαινόμενο το οποίο ξεκινά πολύ πριν η διαπλανητική διαταραχή φθάσει στη Γη όταν ακόμη η διαταραχή σχηματίζεται κοντά στον Ήλιο (Belov, 2008).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

### ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

#### 5.1 Εισαγωγή

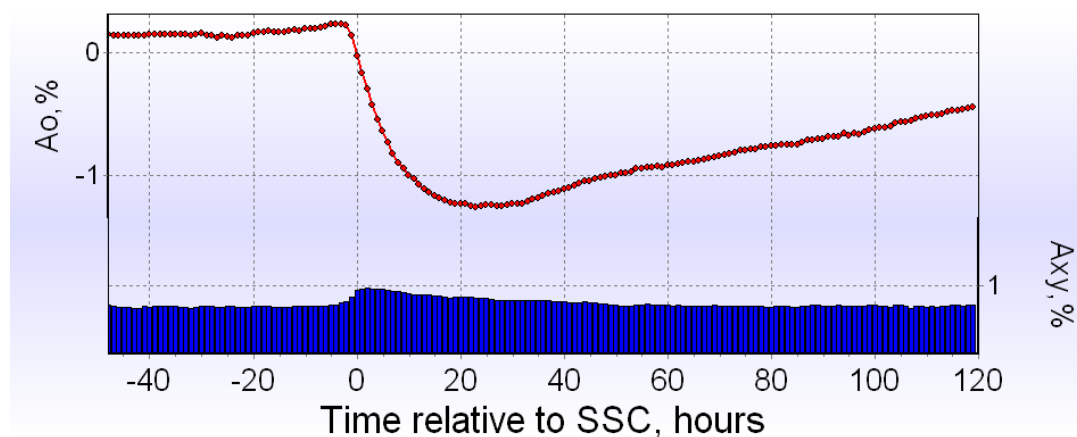
Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται μία αναλυτική και λεπτομερής περιγραφή των ομάδων των μειώσεων Forbush οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των προειδοποιητικών σημάτων. Τα συγκεκριμένα γεγονότα, 185 στο σύνολό τους, επελέγησαν από τη βάση των μειώσεων Forbush και ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο επιλογής τους. Το πρώτο κριτήριο αφορά στην ανισοτροπία μια ώρα πριν το γεγονός (93 γεγονότα), το δεύτερο στο ηλιογραφικό μήκος των πηγών και την ύπαρξη γεωμαγνητικής καταιγίδας (25 γεγονότα) και το τρίτο στο μέγεθος των μειώσεων Forbush (67 γεγονότα).

#### 5.2 Κριτήρια επιλογής

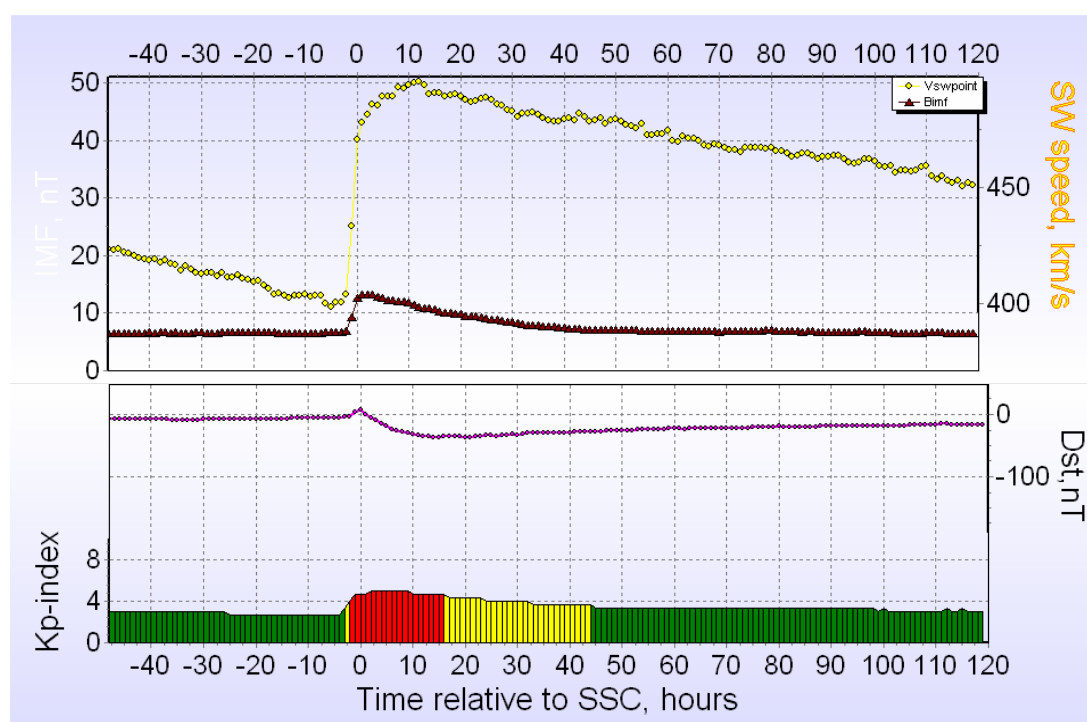
Η βάση των μειώσεων Forbush έχει ήδη περιγραφεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. IV § 4.7). Η βάση αυτή δίνει τη δυνατότητα ομαδοποίησης των μειώσεων Forbush με βάση διαφορετικά κριτήρια, τα οποία αναφέρονται σε διαπλανητικές, γεωμαγνητικές, κ.τ.λ., παραμέτρους (Σχ. 5.1).

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας αρχικά επελέγησαν από τη συγκεκριμένη βάση όλα τα γεγονότα τα οποία παρουσιάζουν αιφνίδια έναρξη καταιγίδας (sudden storm commencement, SSC) (βλ. Κεφ. I § 1.6.1) για το χρονικό διάστημα 1957 – 2012. Πρόκειται για 1403 μειώσεις Forbush. Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται τα χρονικά προφίλ ορισμένων παραμέτρων γι' αυτή την ομάδα γεγονότων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ένταση των κοσμικών ακτίνων  $A_0$  και το πλάτος της συνιστώσας  $A_{xy}$  της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας (Σχ. 5.2), το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου (Σχ. 5.3, άνω διάγραμμα) και οι δείκτες Dst και  $K_p$  (Σχ. 5.3, κάτω διάγραμμα) όπως προκύπτουν από τη μέθοδο

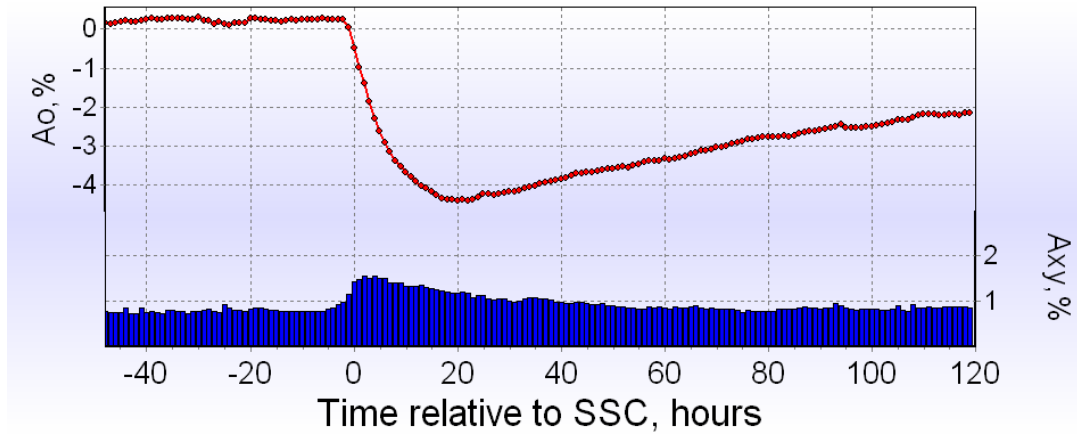




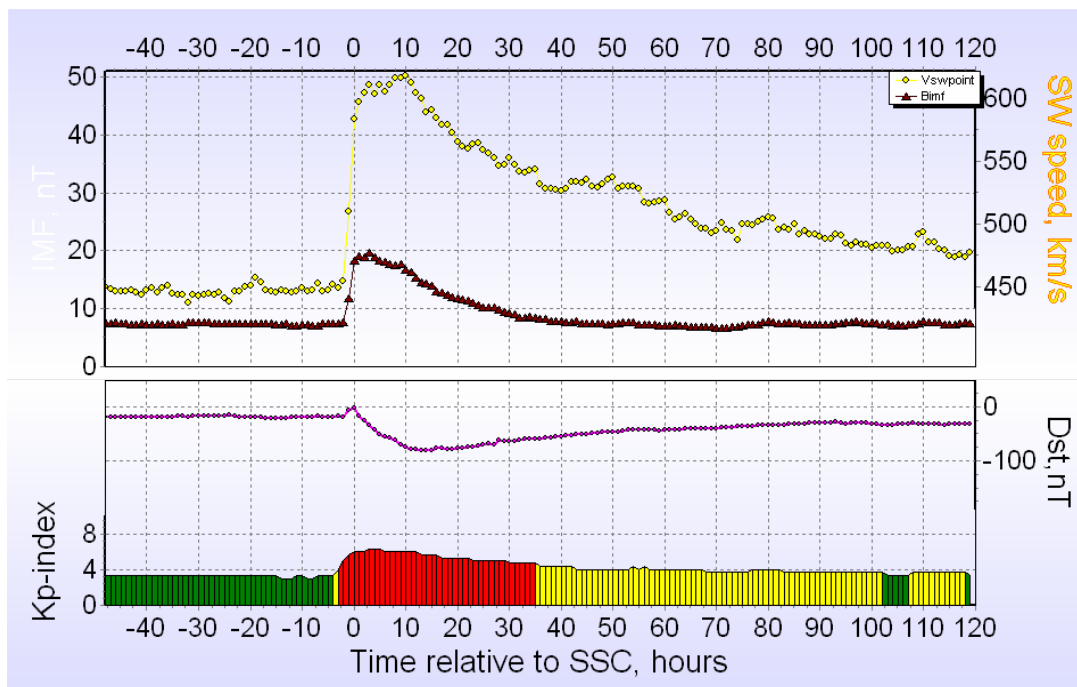
Σχ.5.2 Μεταβολές της έντασης των κοσμικών ακτίνων  $A_0$  (σημεία) και του πλάτους της συνιστώσας  $A_{xy}$  της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας (στήλες) για τις χρονικές περιόδους πριν και μετά την έλευση κρουστικού κύματος, όπως αυτές υπολογίστηκαν σε 1403 μειώσεις Forbush με SSC. Το 0 υποδηλώνει τον χρόνο καταγραφής του SSC.



Σχ. 5.3 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για τις χρονικές περιόδους πριν και μετά την έλευση κρουστικού κύματος, όπως αυτές υπολογίστηκαν σε 1403 μειώσεις Forbush με SSC. Το 0 υποδηλώνει τον χρόνο καταγραφής του SSC.



Σχ.5.4 Μεταβολές της έντασης των κοσμικών ακτίνων  $A_0$  (σημεία) και του πλάτους της συνιστώσας  $A_{xy}$  της πρώτης αρμονικής της ανισοτροπίας (στήλες) για τις χρονικές περιόδους πριν και μετά την έλευση κρουστικού κύματος, όπως αυτές υπολογίστηκαν σε 254 μειώσεις Forbush με πλάτος  $> 3.99\%$  και SSC. Το 0 υποδηλώνει τον χρόνο καταγραφής του SSC.



Σχ. 5.5 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για τις χρονικές περιόδους πριν και μετά την έλευση κρουστικού κύματος, όπως αυτές υπολογίστηκαν σε 254 μειώσεις Forbush με πλάτος  $> 3.99\%$  και SSC. Το 0 υποδηλώνει τον χρόνο καταγραφής του SSC.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, τα κριτήρια επιλογής για τη μελέτη των μειώσεων Forbush ως προς τα προειδοποιητικά σήματα είναι τα εξής:

#### ❖ Κριτήριο ανισοτροπίας

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει 93 γεγονότα με ανισοτροπία μία ώρα πριν το κρουστικό κύμα μεγαλύτερη από 1.2%, δηλαδή:

$$✓ A_{xy} > 1.2\%$$

Στον Πίνακα 5.1 δίνονται οι μέσες τιμές των διαφόρων παραμέτρων γι' αυτή την κατηγορία.

*Πίνακας 5.1 Μέση τιμή διαφόρων παραμέτρων για την κατανομή των 93 γεγονότων του κριτηρίου της ανισοτροπίας.*

Μέγεθος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Αριθμός γεγονότων <sup>1</sup>
Πλάτος, %	$2.18 \pm 0.17$	8.3	0.4	93
$A_{xy\max}$ , %	$2.13 \pm 0.07$	4.85	1.2	93
$Kp_{\max}$	$4.367 \pm 0.011$	8.3	1.3	93
$Dst_{\min}$ , nT	$-47.9 \pm 4.5$	5	-226	93
$IMF_{\max}$ , nT	$13.3 \pm 0.5$	32.1	5.7	88
$SW_{\max}$ , km s <sup>-1</sup>	$483.4 \pm 10.7$	847	311	88
$IMF_b^2$ , nT	$7.11 \pm 0.33$	19.4	1.8	89
$SW_b$ , km s <sup>-1</sup>	$385.8 \pm 6.0$	572	282	90
$A_{xyb}$ , %	$1.58 \pm 0.04$	2.63	1.2	80

#### ❖ Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει 25 γεγονότα τα οποία σχετίζονται με δυτικές ηλιακές πηγές και γεωμαγνητικές καταιγίδες, δηλαδή:

- ✓  $50^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < 70^\circ$
- ✓  $Kp_{\max} \geq 5.0$  στη διάρκεια της μείωσης Forbush

Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι μέσες τιμές των διαφόρων παραμέτρων γι' αυτή την κατηγορία.

<sup>1</sup> Η διαφορά στον αριθμό γεγονότων οφείλεται σε έλλειψη δεδομένων.

<sup>2</sup> Ο δείκτης b αναφέρεται σε χρονικό διάστημα 1 ώρας πριν το SSC.

**Πίνακας 5.2** Μέση τιμή διαφορών παραμέτρων για την κατανομή των 25 γεγονότων του κριτηρίου δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων.

Μέγεθος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Αριθμός γεγονότων
Πλάτος, %	3.13 ± 0.49	9.00	0.6	25
$A_{xy\max}$ , %	2.41 ± 0.26	5.78	0.89	25
$Kp_{\max}$	6.65 ± 0.21	8.67	5.33	25
$Dst_{\min}$ , nT	-96.3 ± 11.6	-31	-288	25
$IMF_{\max}$ , nT	19.74 ± 2.04	52.2	6.8	22
$SW_{\max}$ , km s <sup>-1</sup>	640.3 ± 30.5	950	415	22
$IMF_b$ , nT	9.70 ± 0.83	17.7	2.9	19
$SW_b$ , km s <sup>-1</sup>	500.76 ± 30.05	793	259	21
$A_{xyb}$ , %	0.960 ± 0.121	2.57	0.14	25

#### ❖ Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει 67 γεγονότα με μεγάλο πλάτος τα οποία εξελίχθηκαν σε ήρεμο υπόβαθρο, δηλαδή:

- ✓ Πλάτος > 3.99%
- ✓ Ωρες μετά το προηγούμενο γεγονός > 48
- ✓ Ωρες μέχρι το επόμενο γεγονός > 18
- ✓ Με SSC

Τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας ταξινομήθηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος των πηγών:

- ✓ Δυτικές ( $20^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < 60^\circ$ )
- ✓ Ανατολικές ( $-60^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < -20^\circ$ )
- ✓ Κεντρικές ( $-21^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < 21^\circ$ )

Στον Πίνακα 5.3 δίνονται οι μέσες τιμές των διαφορών παραμέτρων γι' αυτή την κατηγορία.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο συνολικός αριθμός των μειώσεων Forbush, αλλά και ο αριθμός των μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα για κάθε υπό εξέταση κριτήριο. Τα υπόλοιπα γεγονότα δεν σημαίνει ότι δεν παρουσίασαν και αυτά προειδοποιητικά σήματα. Πιθανώς ο σταθμός να μην ήταν μαγνητικά συνδεδεμένος με αυτή την περιοχή (βλ. Κεφ II § 2.8.2).

**Πίνακας 5.3** Μέση τιμή διαφόρων παραμέτρων για την κατανομή των 67 γεγονότων του κριτηρίου των μεγάλων μειώσεων Forbush.

	Μέγεθος	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Αριθμός γεγονότων
Δυτικές	Πλάτος, %	6.50 ± 0.71	13.5	4.00	14
	A <sub>xy</sub> max, %	3.06 ± 0.22	4.41	1.95	14
	K <sub>p</sub> max	6.50 ± 0.47	8.67	3.33	14
	Dst <sub>min</sub> , nT	-103.3 ± 18.2	-14	-221	14
	IMF <sub>max</sub> , nT	22.62 ± 3.32	56.9	9.7	13
	SW <sub>max</sub> , km s <sup>-1</sup>	684.2 ± 52.5	1040	433	13
	IMF <sub>b</sub> , nT	10.10 ± 1.44	19.1	4.5	10
	SW <sub>b</sub> , km s <sup>-1</sup>	527.50 ± 41.03	776	372	10
	A <sub>xyb</sub> , %	1.073 ± 0.199	2.56	0.12	14
Ανατολικές	Πλάτος, %	6.37 ± 0.68	19.8	4.1	23
	A <sub>xy</sub> max, %	2.31 ± 0.17	4.71	1.29	23
	K <sub>p</sub> max	6.32 ± 0.30	9.00	4.00	23
	Dst <sub>min</sub>	-94.0 ± 15.2	-11	-325	23
	IMF <sub>max</sub> , nT	24.42 ± 2.46	54.4	10.7	19
	SW <sub>max</sub> , km s <sup>-1</sup>	618.1 ± 30.6	986	440	18
	IMF <sub>b</sub> , nT	10.69 ± 1.14	20.1	1.8	17
	SW <sub>b</sub> , km s <sup>-1</sup>	454.22 ± 25.62	757	327	18
	A <sub>xyb</sub> , %	0.990 ± 0.089	1.68	0.18	22
Κεντρικές	Πλάτος, %	7.35 ± 0.64	20.4	4.2	31
	A <sub>xy</sub> max, %	2.94 ± 0.18	5.01	1.25	31
	K <sub>p</sub> max	6.96 ± 0.24	8.67	4.33	31
	Dst <sub>min</sub> , nT	-150.7 ± 17.8	-41	-472	31
	IMF <sub>max</sub> , nT	29.56 ± 2.51	65.6	14.3	25
	SW <sub>max</sub> , km s <sup>-1</sup>	671.0 ± 26.1	959	457	24
	IMF <sub>b</sub> , nT	12.16 ± 0.98	20.1	4.7	21
	SW <sub>b</sub> , km s <sup>-1</sup>	487.78 ± 19.59	675	366	23
	A <sub>xyb</sub> , %	0.819 ± 0.078	1.82	0.06	30

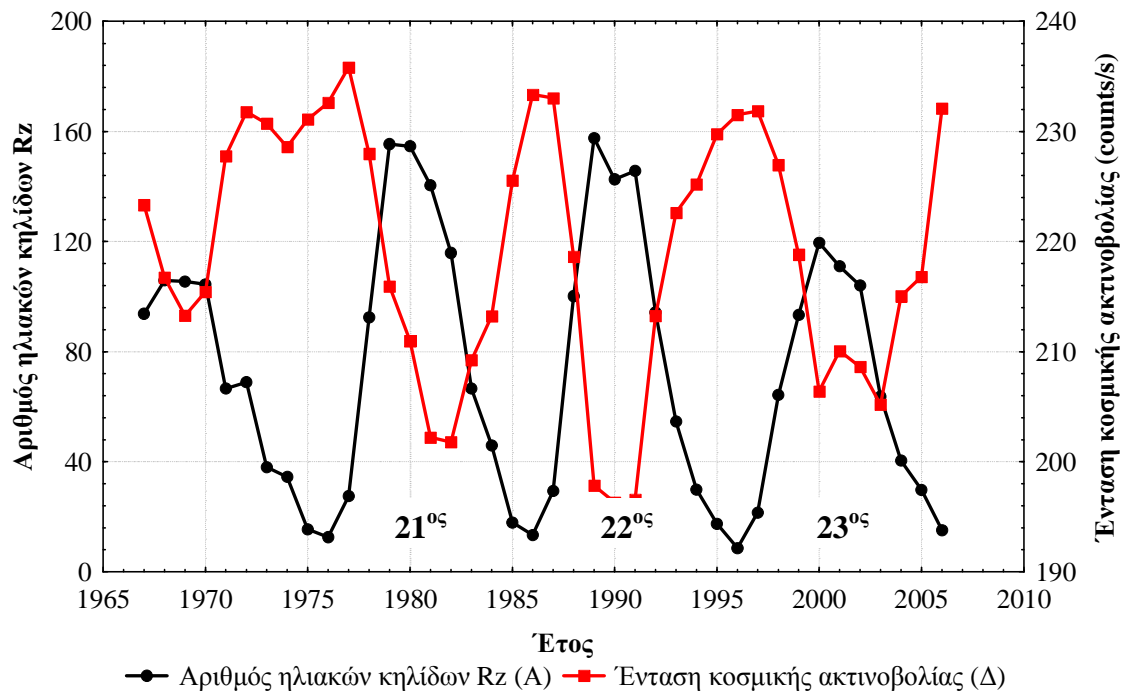
**Πίνακας 5.4** Συνολικός αριθμός μειώσεων Forbush και αριθμός μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα για κάθε υπό εξέταση κριτήριο.

Κριτήρια	Όλα	Με προειδοποιητικά σήματα
Κριτήριο ανισοτροπίας	93	27
Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων	25	15
Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush	67	46
Δυτικές πηγές	14	11
Ανατολικές πηγές	22	15
Κεντρικές πηγές	31	20
Σύνολο	185	88

### 5.3 Κατανομές των υπό εξέταση γεγονότων

Τα υπό μελέτη γεγονότα αναφέρονται στη χρονική περίοδο 1967 – 2006. Αυτό το χρονικό διάστημα καλύπτει τον 21ο (1976 – 1986), 22ο (1986 – 1996) και 23ο (1996 – 2008) ηλιακό κύκλο (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>).

Η ηλιακή δραστηριότητα και η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι δύο φυσικά μεγέθη που αντισυσχετίζονται (Μαυρομιχαλάκη, 2005). Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται αυτή η αντισυσχέτιση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως καταγράφηκε από τον Μετρητή Νετρονίων της Μόσχας (<http://www.nmdb.eu>) και του ετήσιου αριθμού των ηλιακών κηλίδων Rz (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>) για το χρονικό διάστημα 1967 – 2006. Όπως έχει σημειωθεί και στο σχήμα το χρονικό διάστημα καλύπτει έναν άρτιο και δύο περιττούς ηλιακούς κύκλους.



Σχ. 5.6 Ετήσια μεταβολή του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (Rz) και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας από τον μετρητή νετρονίων της Μόσχας για το χρονικό διάστημα 1967 – 2006.



Οι διαφορές μεταξύ άρτιων και περιττών κύκλων της κοσμικής ακτινοβολίας είναι γνωστές (Mavromichalaki et al., 1997; Μαυρομιχαλάκη, 2005) και δίνονται στον Πίνακα 5.5. Η χρονική υστέρηση μεταξύ του ελαχίστου των κοσμικών ακτίνων σε σχέση με τον μέγιστο αριθμό των ηλιακών κηλίδων είναι 16, 4 και 14 μήνες για τον 21ο, 22ο και 23ο ηλιακό κύκλο αντίστοιχα (Mavromichalaki et al., 1997; Mavromichalaki et al., 2007).

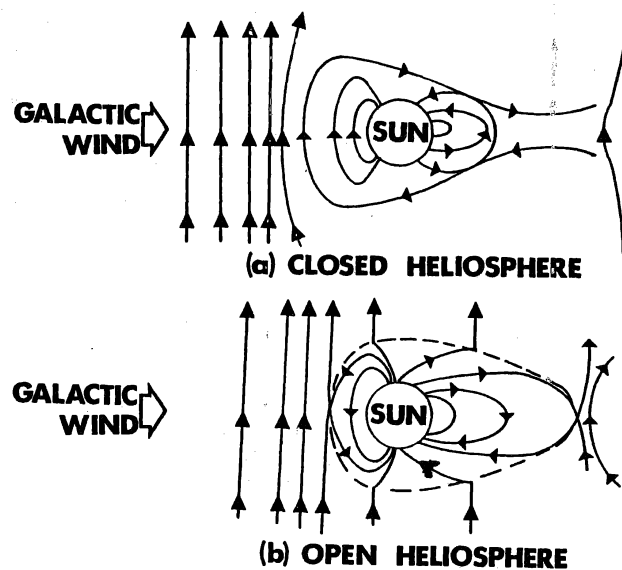
*Πίνακας 5.5 Μορφολογικές διαφορές μεταξύ άρτιων και περιττών κύκλων της κοσμικής ακτινοβολίας.*

Περιττοί κύκλοι	Άρτιοι κύκλοι
Ένα μέγιστο	Δύο μέγιστα
Απότομη άνοδος και μέγιστο κοντά στο ελάχιστο του κύκλου	Μεγάλη ροή αμέσως μετά το μέγιστο του κύκλου και για μεγάλο χρονικό διάστημα
‘Saddle – like’	‘Peak – like’
‘Mesa – type’	‘Point – type’
Επαναφορά διάρκειας (6 – 8 έτη)	Απότομη επαναφορά (2 – 3 έτη)
Μεγάλη χρονική υστέρηση	Μικρή χρονική υστέρηση

Υπεύθυνη για τη διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ άρτιων και περιττών κύκλων είναι η αλλαγή της πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου, η οποία παρατηρείται κοντά στο ηλιακό μέγιστο (Mavromichalaki et al., 1997). Επιπλέον, οι Otaola et al. (1985) έδειξαν ότι αυτή η διαφορετική συμπεριφορά οφείλεται σε διακριτές καταστάσεις, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε παράλληλες και αντιπαράλληλες καταστάσεις της πολικότητας του ηλιακού πολικού μαγνητικού πεδίου ως προς το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο.

Αυτή η συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων εξηγείται από το πρότυπο κλειστής και ανοιχτής ηλιόσφαιρας, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7 (Alhuwalia, 1979; Μαυρομιχαλάκη, 2005). Η ύπαρξη θετικού βόρειου πόλου του Ήλιου οδηγεί στο πρότυπο της ανοιχτής ηλιόσφαιρας, όπου τα σωματίδια μπορούν να φθάσουν στη Γη ευκολότερα, παρατηρείται δηλαδή κατευθείαν εισδοχή κοσμικών ακτίνων στον ενδοαστρικό χώρο. Τότε οι κοσμικές ακτίνες εισχωρούν και σε μικρά ηλιογραφικά πλάτη ώστε η διάχυση παίζει ελάχιστο ρόλο στη μεταφορά τους μέχρι τη Γη (άρτιοι κύκλοι). Αντίθετα, ο αρνητικός βόρειος πόλος του Ήλιου οδηγεί σε

κλειστή ηλιόσφαιρα, όπου οι κοσμικές ακτίνες εισέρχονται από το ισημερινό επίπεδο του Ήλιου. Η διάχυση παίζει, τότε, σπουδαίο ρόλο (περιτοί κύκλοι).



Σχ. 5.7 Πρότυπο κλειστής (a) και ανοιχτής (b) ηλιόσφαιρας (Ahluwalia, 1979).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ετήσιες κατανομές που αφορούν στις 185 υπό εξέταση περιπτώσεις μειώσεων Forbush (Πίνακας 5.6) και στις 88 περιπτώσεις μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα (Πίνακας 5.7). Στους Πίνακες αυτούς τα γεγονότα έχουν ταξινομηθεί με βάση τα τρία προαναφερθέντα κριτήρια, της ανισοτροπίας, των δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων και των μεγάλων μειώσεων Forbush.

Οι κατανομές αυτές έχουν παρασταθεί και γραφικά στο σχήμα 5.8. Στο ίδιο σχήμα, εκτός από την κατανομή των γεγονότων, δίνεται και η μεταβολή της ηλιακής δραστηριότητας (αριθμός ηλιακών κηλίδων  $R_z$ ) για το ίδιο χρονικό διάστημα. Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης γεγονότων (συνολικά αλλά και αυτών με προειδοποιητικά σήματα) παρατηρείται κοντά στα μέγιστα των ηλιακών κύκλων. Συγκεκριμένα για τους 21ο, 22ο και 23ο ηλιακούς κύκλους τα μέγιστα εμφανίζονται το 1979, το 1989 και το 2000 αντίστοιχα ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SUNSPOT\\_NUMBERS/INTERNATIONAL/yearly/YEARLY](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/INTERNATIONAL/yearly/YEARLY)). Όπως προκύπτει και από το σχήμα 5.8, η μεγαλύτερη συχνότητα γεγονότων αφορά στην περίοδο 1978 – 1982 (για τον 21ο κύκλο), την

ευρύτερη περιοχή γύρω από το 1989 (για τον 22ο κύκλο) και την περίοδο 2000 – 2002 (για τον 23ο κύκλο).

**Πίνακας 5.6** Ετήσια κατανομή των υπό εξέταση μειώσεων Forbush (93 γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας, 25 γεγονότα του κριτηρίου δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων και 67 γεγονότα του κριτηρίου μεγάλων μειώσεων Forbush, 14 γεγονότα για τις δυτικές πηγές, 22 γεγονότα για τις ανατολικές πηγές και 31 γεγονότα για τις κεντρικές πηγές).

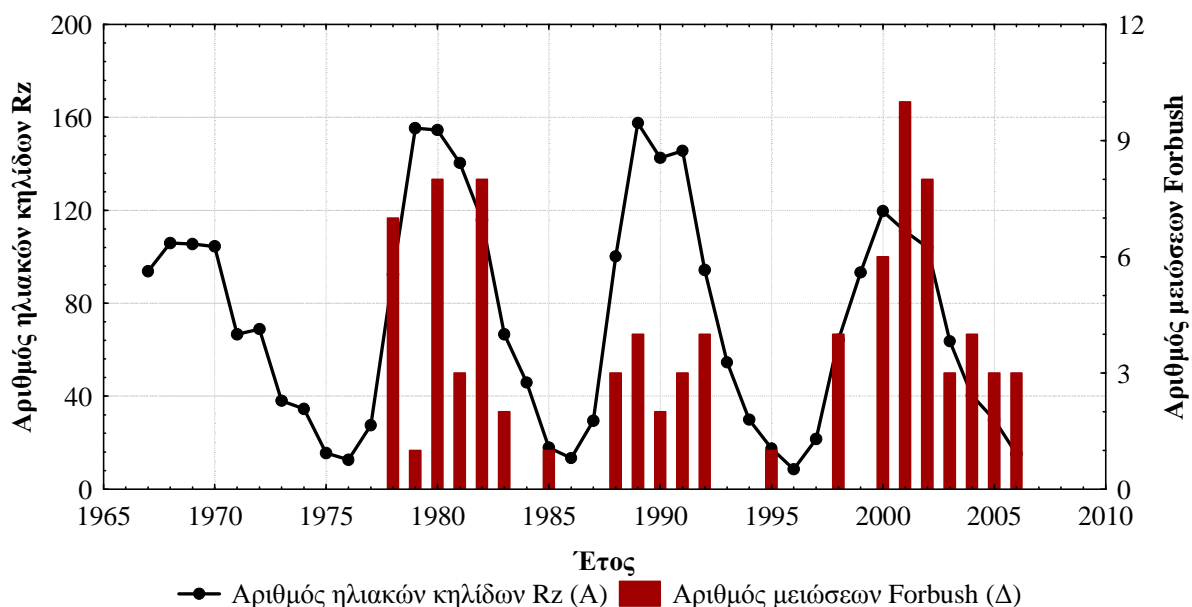
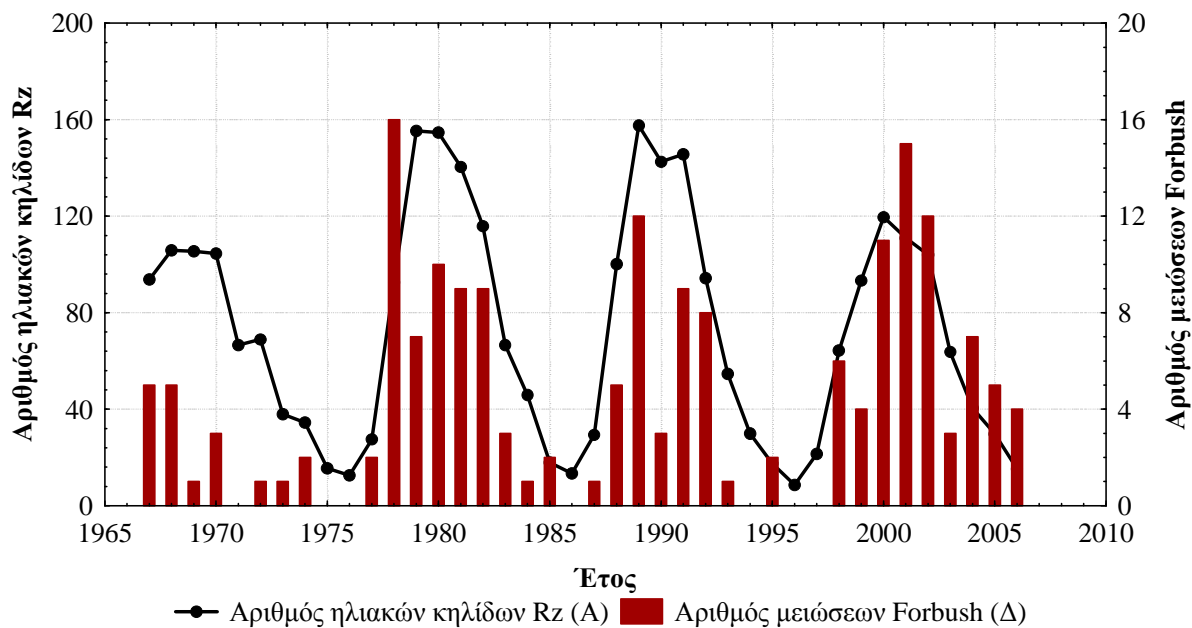
Έτος	Αριθμός μειώσεων Forbush				
	Κριτήριο ανισοτροπίας	Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων	Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush		
			Δυτικές	Ανατολικές	Κεντρικές
1967	5				
1968	5				
1969	1				
1970	3				
1972	1				
1973	1				
1974	2				
1977	1	1			
1978	8	1		2	5
1979	6			1	
1980	7	2			1
1981	3	3	1	2	
1982	1		1	5	2
1983		1			2
1984	1				
1985	1	1			
1987		1			
1988	3				2
1989	2	2	3	2	3
1990		1	1	1	
1991	2	2		2	3
1992	3	1	1	2	1
1993		1			
1995	2				
1998	5	1			
1999	4				
2000	7	2			2
2001	8		3	2	2
2002	7		1	1	3
2003		1			2
2004	1	1	1	2	2
2005	1	3			1
2006	2		2		

**Πίνακας 5.7** Ετήσια κατανομή των μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα (27 γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας, 15 γεγονότα του κριτηρίου δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων και 46 γεγονότα του κριτηρίου μεγάλων μειώσεων Forbush, 11 γεγονότα για τις δυτικές πηγές, 15 γεγονότα για τις ανατολικές πηγές και 20 γεγονότα για τις κεντρικές πηγές).

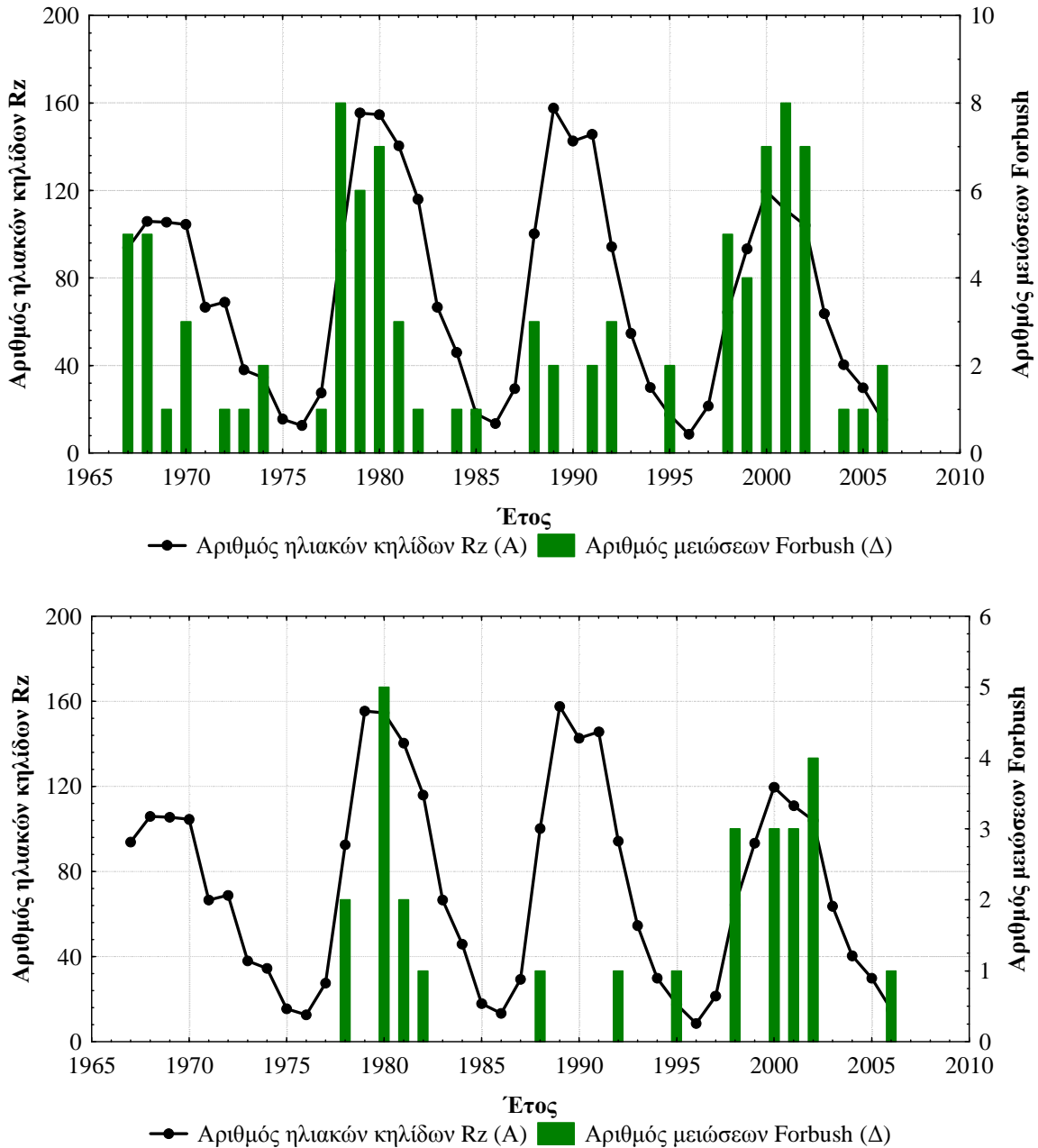
Έτος	Αριθμός μειώσεων Forbush				
	Κριτήριο ανισοτροπίας	Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων	Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush		
			Δυτικές	Ανατολικές	Κεντρικές
1978	2	1		1	3
1979				1	
1980	5	2			1
1981	2	1			
1982	1		1	5	1
1983		1			1
1985		1			
1988	1				2
1989		1	1	2	
1990		1	1		
1991				1	2
1992	1	1	1	1	
1995	1				
1998	3	1			
2000	3	2			1
2001	3		3	2	2
2002	4		1	1	2
2003		1			2
2004			1	1	2
2005		2			1
2006	1		2		

Παρόμοιες ετήσιες κατανομές, όπως αυτές που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.8, δίνονται για τις τρεις περιπτώσεις κριτηρίων, τόσο για όλα τα γεγονότα του κριτηρίου όσο και γι' αυτά που παρουσιάζουν προειδοποιητικά σήματα (Σχ. 5.9, 5.10 και 5.11).

Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι ετήσιες κατανομές των 93 περιπτώσεων μειώσεων Forbush οι οποίες πληρούν το κριτήριο ανισοτροπίας (Σχ. 5.9, άνω διάγραμμα), αλλά και των 27 εξ αυτών οι οποίες δίνουν προειδοποιητικά σήματα (Σχ. 5.9, κάτω διάγραμμα). Η συμπεριφορά παραμένει ίδια, όπως και προηγουμένως.



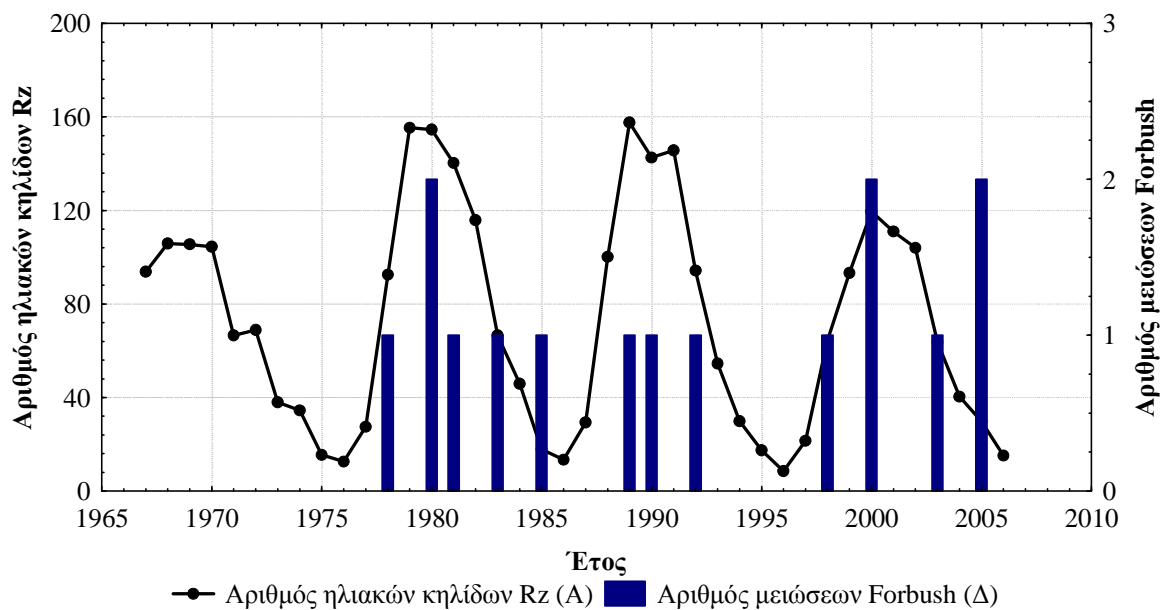
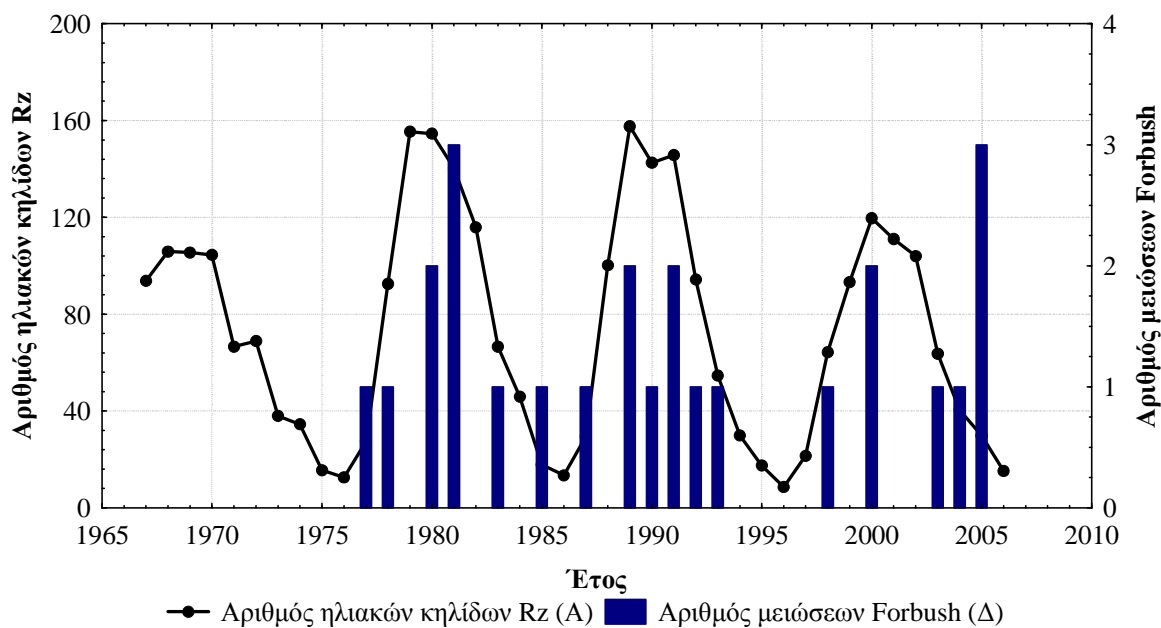
Σχ. 5.8 Ετήσια κατανομή του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (Rz), των 185 υπό εξέταση μειώσεων Forbush (άνω διάγραμμα) και των 88 εξ αυτών με προειδοποιητικά σήματα (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 5.9 Ετήσια κατανομή του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (Rz), των 93 υπό εξέταση μειώσεων Forbush (άνω διάγραμμα) και των 27 εξ αυτών με προειδοποιητικά σήματα (κάτω διάγραμμα), για το κριτήριο ανισοτροπίας.

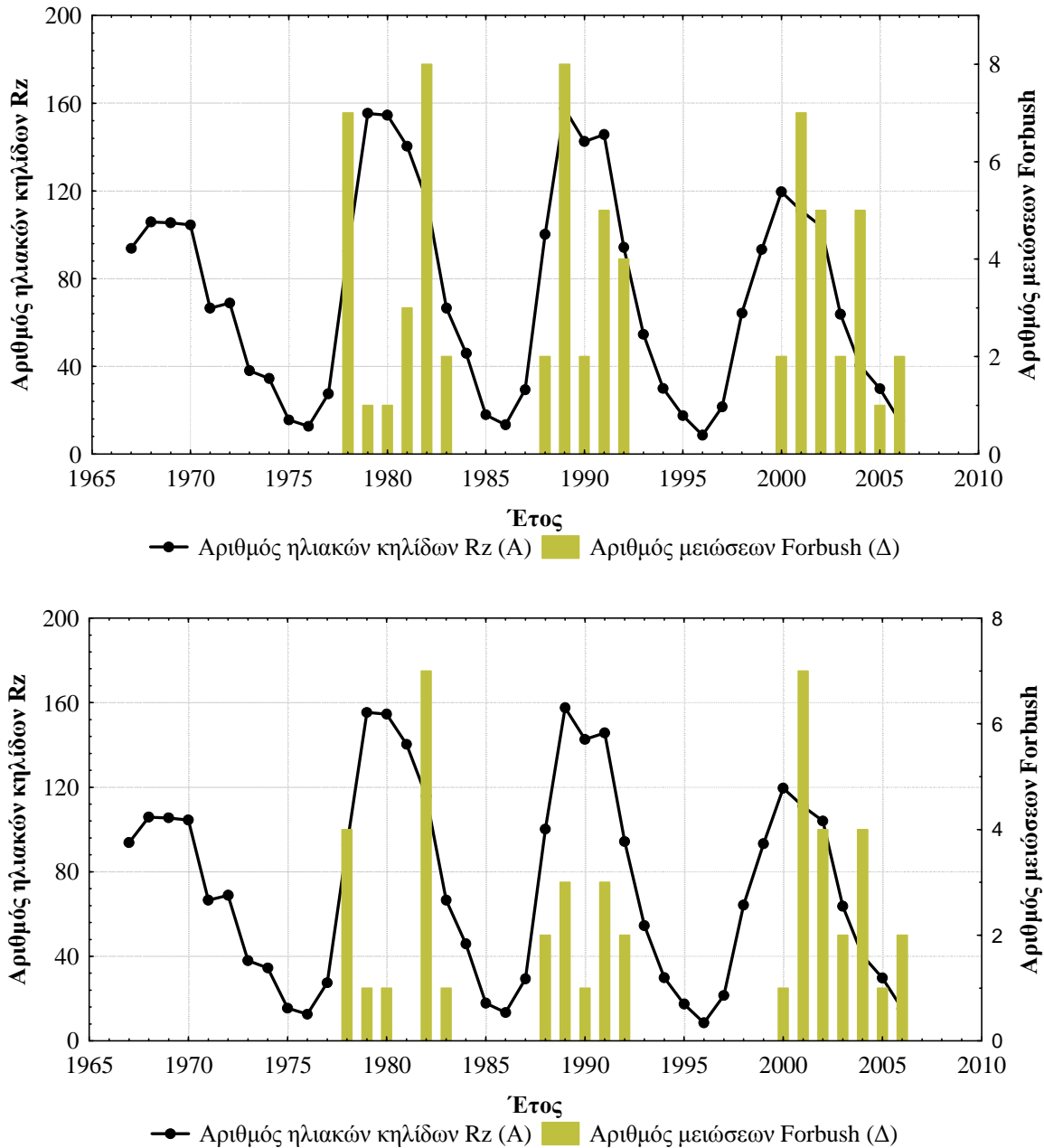
Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται οι ετήσιες κατανομές για τα 25 γεγονότα του κριτηρίου δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων (Σχ. 5.10, άνω διάγραμμα), αλλά και για τα 15 εξ αυτών τα οποία δίνουν προειδοποιητικά σήματα (Σχ. 5.10, κάτω διάγραμμα). Όπως και προηγουμένως, διατηρείται η ίδια συμπεριφορά, αν και

σε αυτή την περίπτωση, λόγω του περιορισμένου αριθμού μειώσεων Forbush, δεν είναι τόσο ξεκάθαρη.



Σχ. 5.10 Ετήσια κατανομή του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (Rz), των 25 υπό εξέταση μειώσεων Forbush (άνω διάγραμμα) και των 15 εξ αυτών με προειδοποιητικά σήματα (κάτω διάγραμμα), για το κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων.

Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζονται οι ετήσιες κατανομές για τα 67 γεγονότα που πληρούν το κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush (Σχ. 5.11, άνω διάγραμμα), αλλά και για τα 46 εξ αυτών τα οποία δίνουν προειδοποιητικά σήματα (Σχ. 5.11, κάτω διάγραμμα).



Σχ. 5.11 Ετήσια κατανομή του αριθμού των ηλιακών κηλίδων (Rz), των 67 υπό εξέταση μειώσεων Forbush (άνω διάγραμμα) και των 46 εξ αυτών προειδοποιητικά σήματα (κάτω διάγραμμα), για το κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush.



Εκτός από τις ετήσιες κατανομές, οι υπό εξέταση μειώσεις Forbush ταξινομήθηκαν και σε μηνιαία βάση προκειμένου να εντοπιστεί πιθανή εποχική μεταβολή. Στον Πίνακα 5.8 δίνονται οι μηνιαίες κατανομές των 185 μειώσεων Forbush.

*Πίνακας 5.8 Μηνιαία κατανομή των 185 υπό εξέταση περιπτώσεων μειώσεων Forbush (93 γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας, 25 γεγονότα του κριτηρίου δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων και 67 γεγονότα του κριτηρίου μεγάλων μειώσεων Forbush).*

Κριτήριο \ Μήνας	Αριθμός μειώσεων Forbush											
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
<b>Κριτήριο ανισοτροπίας</b>	9	6	5	8	5	6	9	12	10	9	8	6
<b>Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων</b>	2	-	2	2	4	2	3	3	2	4	1	-
<b>Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush</b>	5	3	8	6	4	6	8	4	7	4	8	4
Δυτικές	-	-	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1
Ανατολικές	-	1	4	3	1	2	4	1	4	-	1	1
Κεντρικές	5	2	2	2	2	3	2	2	1	2	6	2
<b>Σύνολο</b>	16	9	15	16	13	14	20	19	19	17	17	10

Επιπλέον στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζονται οι μηνιαίες κατανομές των 88 μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα. Όπως παρατηρείται, υπάρχει μία τάση μεγαλύτερης συχνότητας εμφάνισης γεγονότων τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο. Αντίθετα, τους μήνες Φεβρουάριο και Δεκέμβριο ο αριθμός των γεγονότων είναι ελάχιστος.

*Πίνακας 5.9 Μηνιαία κατανομή των 88 μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα (27 γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας, 15 γεγονότα του κριτηρίου δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων και 46 γεγονότα του κριτηρίου μεγάλων μειώσεων Forbush).*

Κριτήριο \ Μήνας	Αριθμός μειώσεων Forbush											
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
<b>Κριτήριο ανισοτροπίας</b>	2	1	2	2	1	1	3	5	5	4	-	1
<b>Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων</b>	2	-	1	1	3	1	1	2	-	3	1	-
<b>Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush</b>	4	2	3	5	4	6	6	4	5	1	3	3
<b>Δυτικές</b>	-	-	2	1	1	1	2	1	1	-	1	1
<b>Ανατολικές</b>	-	1	1	2	1	2	2	1	4	-	-	1
<b>Κεντρικές</b>	4	1	-	2	2	3	2	2	-	1	2	1
<b>Σύνολο</b>	8	3	6	8	8	8	10	11	10	8	4	4

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI

### ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΜΕΙΩΣΕΩΝ FORBUSH

#### 6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται μία λεπτομερής περιγραφή των προειδοποιητικών σημάτων των μειώσεων Forbush. Τα συγκεκριμένα γεγονότα, 185 στο σύνολο τους, επελέγησαν από τη βάση των μειώσεων Forbush και ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο επιλογής τους. Το πρώτο κριτήριο αφορά στην ανισοτροπία μία ώρα πριν το γεγονός (93 γεγονότα), το δεύτερο στο ηλιογραφικό μήκος των πηγών και την ύπαρξη γεωμαγνητικής καταιγίδας (25 γεγονότα) και το τρίτο σε μεγάλες μειώσεις Forbush (67 γεγονότα).

Μία αναλυτική περιγραφή των σχετικών διαπλανητικών συνθηκών που επικρατούν σε καθένα γεγονός έχει γίνει και για τα 185 υπό εξέταση γεγονότα, αλλά στο παρόν κεφάλαιο παρατίθεται ένα δείγμα και παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, τα οποία στο εξής αναφέρονται ως διαγράμματα 'χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους'.

#### 6.2 Κριτήριο Ανισοτροπίας

Από τη βάση των μειώσεων Forbush (βλ. Κεφ. IV § 4.7) επελέγησαν και μελετήθηκαν συνολικά 93 γεγονότα με ανισοτροπία  $A_{xy} > 1.2\%$  για το χρονικό διάστημα 1967 – 2006. Τα 27 από αυτά (~29%) παρουσιάζονται με κριτήριο την κοινή συμπεριφορά τους στα διαγράμματα χρονικής κατανομής ασυμπτωτικού μήκους της κοσμικής ακτινοβολίας. Η συνήθης τιμή της ανισοτροπίας μία ώρα πριν τη μείωση Forbush είναι  $< 0.6\%$ . Η ανισοτροπία που έχει επιλεγεί εδώ μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανώμαλη, αφού ξεπερνά σημαντικά τη μέση στατιστική τιμή. Η παρατηρούμενη αύξηση της ανισοτροπίας δεν μπορεί να περιγραφεί από το άθροισμα

των χαμηλότερης τάξης αρμονικών (Belon et al., 2003). Παρ' όλα αυτά είναι φανερό ότι θα πρέπει να αυξάνεται και η πρώτη αρμονική.

Μετά από λεπτομερή ανάλυση και προσεκτική μελέτη τα προαναφερθέντα γεγονότα ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες.

- ❖ Η πρώτη ομάδα, όπου παρατηρείται μία προ-μείωση στη ζώνη μηκών  $90^\circ - 180^\circ$  που διαρκεί περίπου 24 ώρες έως την άφιξη του κρουστικού κύματος, περιλαμβάνει 5 γεγονότα (24 Ιουνίου 1980, 28 Οκτωβρίου 2000, 17 Αυγούστου 2001, 23 Απριλίου 2002 και 10 Μαΐου 2002).
- ❖ Η δεύτερη ομάδα, όπου το προειδοποιητικό σήμα είναι μία προ-αύξηση που καταγράφεται σε μήκη άνω των  $180^\circ$  και διαρκεί περίπου 12 ώρες έως τη μείωση, περιλαμβάνει 14 γεγονότα (3 Ιανουαρίου 1978, 13 Ιουλίου 1978, 11 Ιανουαρίου 1980, 30 Μαρτίου 1980, 25 Ιουλίου 1980, 11 Δεκεμβρίου 1980, 2 Οκτωβρίου 1981, 10 Οκτωβρίου 1988, 9 Σεπτεμβρίου 1992, 26 Αυγούστου 1998, 20 Φεβρουαρίου 2000, 25 Σεπτεμβρίου 2001, 7 Σεπτεμβρίου 2002, 9 Ιουλίου 2006).
- ❖ Η τρίτη ομάδα, όπου η προ-μείωση παρατηρείται σε διαφορετικά μήκη και έχει διαφορετική διάρκεια σε κάθε γεγονός, περιλαμβάνει 8 γεγονότα (8 Σεπτεμβρίου 1981, 16 Απριλίου 1982, 4 Μαρτίου 1995, 10 Αυγούστου 1998, 18 Οκτωβρίου 1998, 15 Σεπτεμβρίου 2000, 3 Αυγούστου 2001, 25 Αυγούστου 2002).

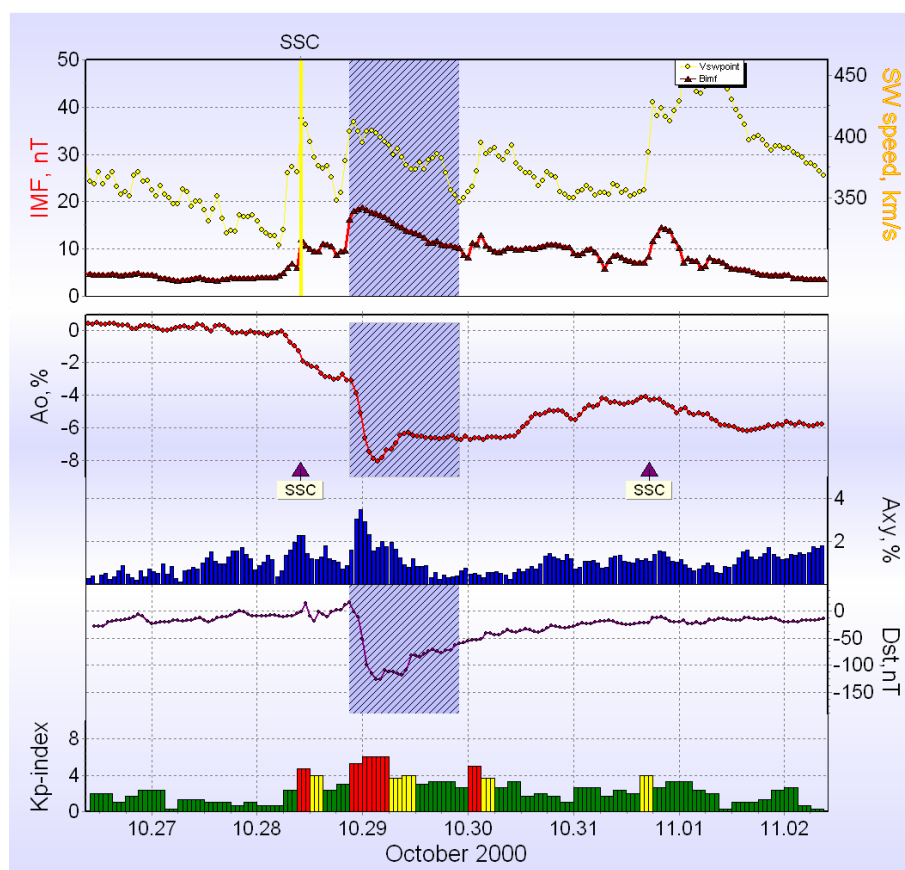
### 6.2.1 Προ-μειώσεις μακράς διάρκειας και σε ορισμένο ασυμπτωτικό μήκος (1<sup>η</sup> ομάδα)

Οι τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών  $K_p$  και  $Dst$  που συνδέονται με τις μειώσεις Forbush αυτής της κατηγορίας, όπως επίσης και άλλες διαπλανητικές παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Όπως φαίνεται, τρεις μειώσεις αυτής της ομάδας σχετίζονται με δυτικές πηγές, ενώ δύο μειώσεις με ανατολικές. Δύο μόνο μειώσεις, της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000 και της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001, είχαν μεγάλο πλάτος (7.7% και 6.3% αντίστοιχα), ενώ οι υπόλοιπες παρουσίασαν πλάτος μικρότερο από 4%. Οι τιμές της μέγιστης ανισοτροπίας κυμάνθηκαν από 1.49% έως 4.41%. Παρ' όλα αυτά για την πλειοψηφία των γεγονότων παρατηρείται μία αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Οι μέγιστες τιμές τους, 32.1nT και 599 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα, σημειώθηκαν για το γεγονός της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001. Επίσης, γεωμαγνητικές καταιγίδες μέτριας ή

ισχυρής έντασης φαίνεται να σχετίζονται με τις υπό μελέτη μειώσεις. Οι μέγιστες τιμές για τους γεωμαγνητικούς δείκτες  $K_p$  και  $Dst$  ήταν 7 και  $-127nT$ , αντίστοιχα.

### 6.2.1.1 Ανάλυση γεγονότων 1<sup>ης</sup> ομάδας

Μία αναλυτική περιγραφή δύο γεγονότων της 1<sup>ης</sup> ομάδας, καθώς επίσης και ο εντοπισμός των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους ακολουθεί στη συνέχεια.

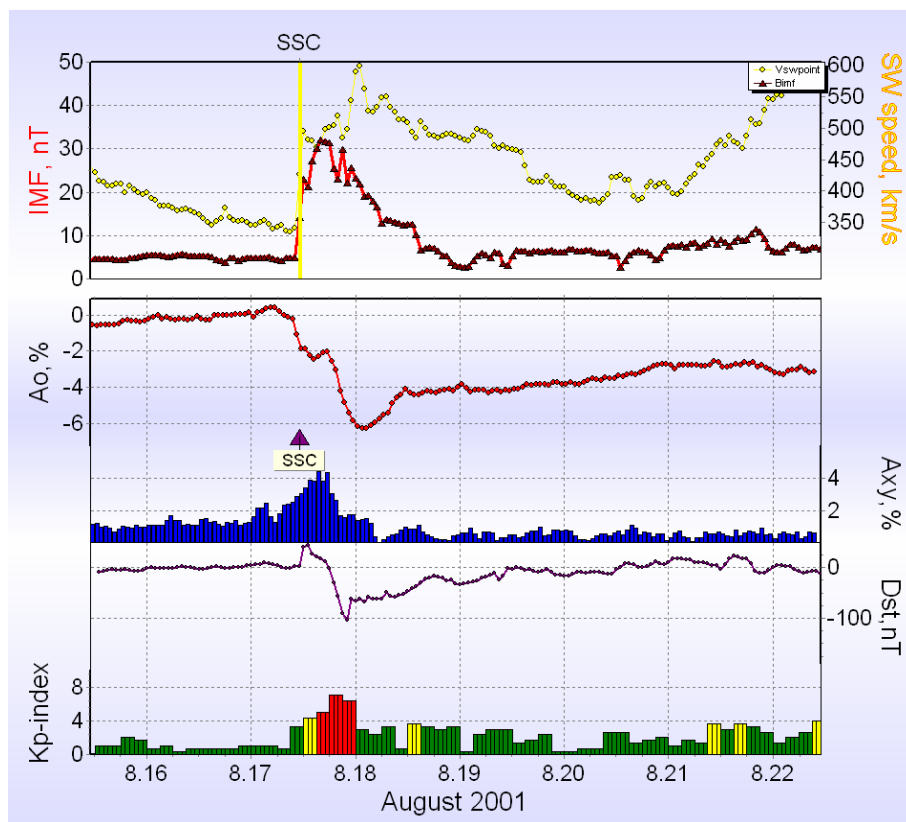


Σχ. 6.1 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $K_p$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000.

#### 1) Μείωση Forbush 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1 (άνω διάγραμμα), το SSC για το υπό μελέτη γεγονός σημειώθηκε την 28<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2000 στις 9:54 UT. Η σχετιζόμενη με αυτό το γεγονός ηλιακή έκλαμψη (N10W66) της ενεργού περιοχής του Ήλιου 9199 ήταν

τάξης C4.0 και καταγράφηκε την 25<sup>η</sup> Οκτωβρίου στις 8:45 UT. Το υπό εξέταση γεγονός εξελίχθηκε σε ήρεμο γεωμαγνητικό υπόβαθρο και χωρίς έντονες μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1 (άνω διάγραμμα) η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (interplanetary magnetic field, IMF) είχε την τιμή 18.8nT και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου την τιμή 415 km s<sup>-1</sup>. Η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 7.7% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 3.49% (Σχ. 6.1, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταγίδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1 (κάτω διάγραμμα), ήταν μέτρια ( $Kp_{max} = 6$  και  $Dst_{min} = -127nT$ ).



Σχ. 6.2 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001.

## 2) Μείωση Forbush 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001

Σχετικά με το συγκεκριμένο γεγονός, το ισχυρό SSC καταγράφηκε στις 17 Αυγούστου 2001 στις 11:03 UT (Σχ. 6.2, άνω διάγραμμα). Η σχετιζόμενη με αυτό το

γεγονός ηλιακή έκλαμψη τάξης C2.3 (N16W36) σημειώθηκε την 14<sup>η</sup> Αυγούστου 2001 στις 11:30 UT. Παρατηρήθηκε μία έντονη αύξηση της έντασης του IMF (32.1nT) και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου στα  $\sim 600 \text{ km s}^{-1}$  (Σχ. 6.2, άνω διάγραμμα). Η μείωση Forbush της 17<sup>ης</sup> – 18<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001, που ολοκληρώθηκε σε δύο βήματα (Σχ. 6.2, μεσαίο διάγραμμα), ήταν της τάξης 6.3% και συνοδεύτηκε από μία σημαντική αύξηση της ανισοτροπίας (4.41%). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst, κατά τη διάρκεια αυτού του γεγονότος είχαν τιμές 7 και -105nT αντίστοιχα (μεγάλη μαγνητική καταιγίδα), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2 (κάτω διάγραμμα).

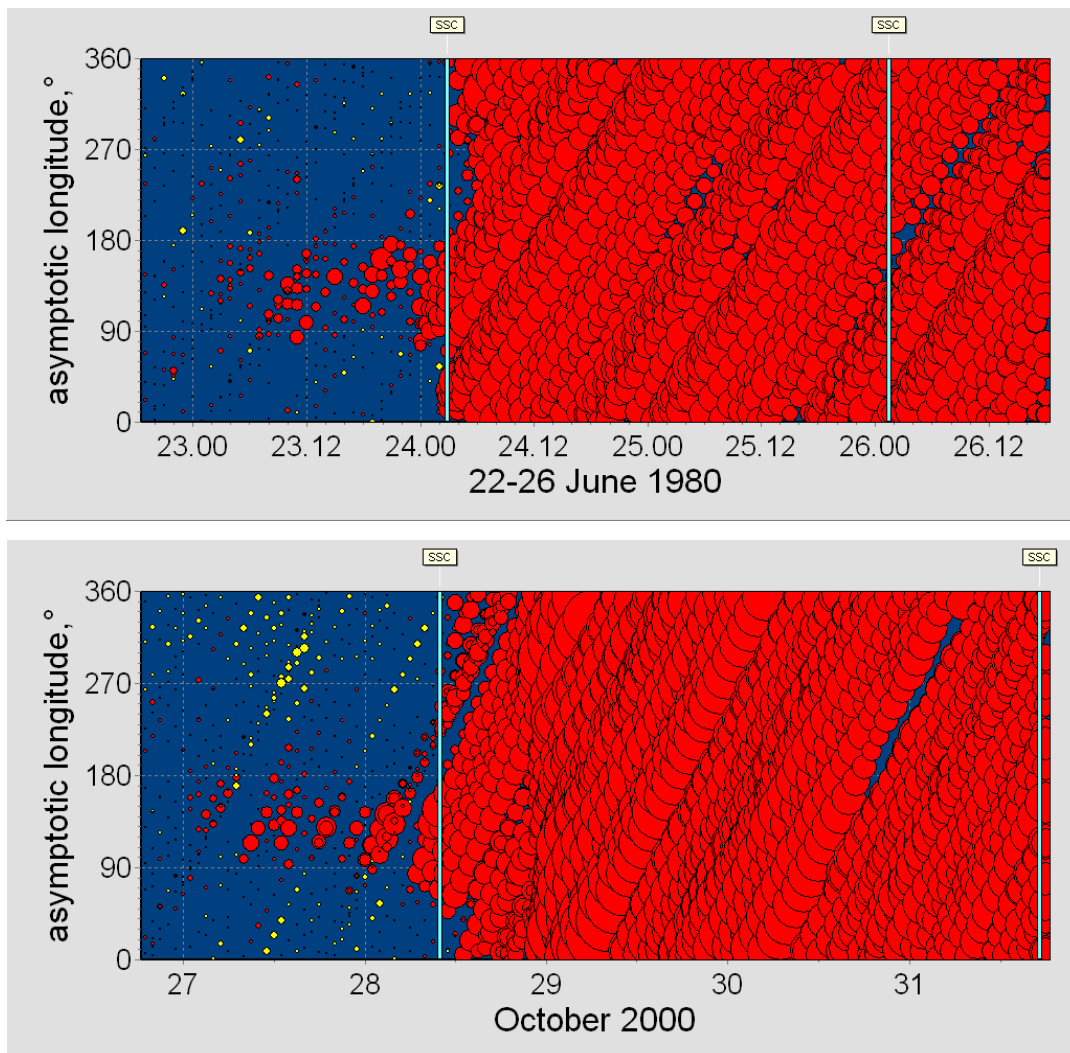
### 6.2.1.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων 1<sup>ης</sup> ομάδας

Όλα τα γεγονότα αυτής της ομάδας απεικονίστηκαν, επίσης, μέσω της κατανομής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας συναρτήσει του ασυμπτωτικού μήκους, ώστε να μελετηθούν και να καθοριστούν οι προειδοποιήσεις σε κάθε γεγονός.

Τα διαγράμματα αυτά σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από 31 σταθμούς μετρητών νετρονίων (βλ. Κεφ. IV, Πίνακας 4.1). Είναι σημαντικό ότι ο αριθμός αυτός των σταθμών καλύπτει σχεδόν όλες τις ασυμπτωτικές διευθύνσεις και εξασφαλίζει για κάθε χρονική στιγμή να καταγράφονται δεδομένα από όσες το δυνατόν περισσότερες διευθύνσεις άφιξης. Δεδομένου ότι κάθε σταθμός περιστρέφεται μαζί με τη Γη, σκανάρει έναν ολόκληρο κύκλο μηκών κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Είναι κατανοητό ότι μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ουράνιας σφαίρας καταγράφεται όταν κάθε στιγμή χρησιμοποιείται ένας ικανοποιητικός αριθμός σταθμών που προσανατολίζονται σε διαφορετικές ασυμπτωτικές διευθύνσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των μετρήσεων κοσμικής ακτινοβολίας από το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων (βλ. Κεφ. III § 3.4.2).

Παραδείγματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας για τα προαναφερθέντα γεγονότα φαίνονται στα σχήματα 6.3, 6.4 και 6.5. Σε αυτά τα διαγράμματα ο κάθετος άξονας δίνει το ασυμπτωτικό μήκος των σωματιδίων που καταγράφει ο μετρητής νετρονίων και ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στον χρόνο καταγραφής (DD.HH, UT). Επίσης, οι

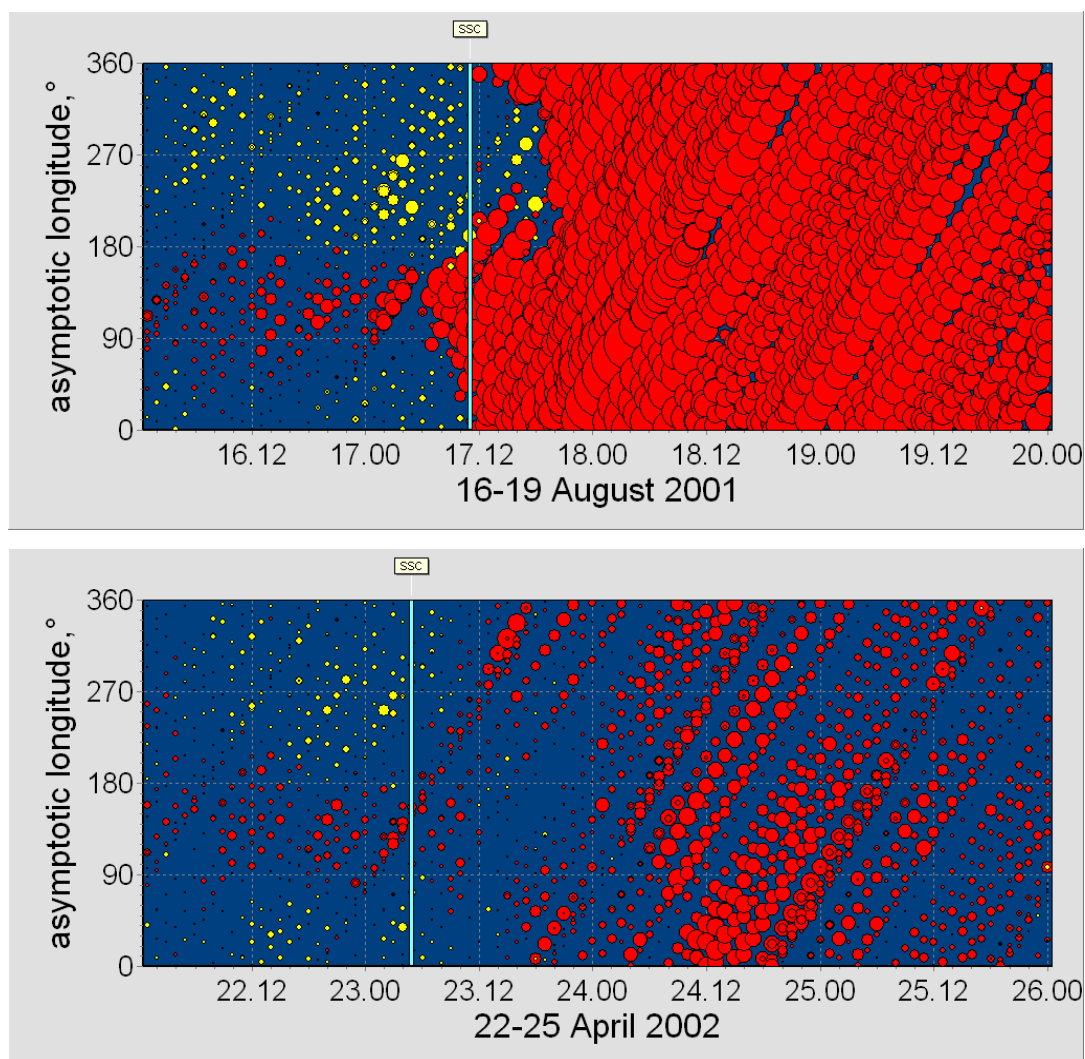
κόκκινοι κύκλοι αντιστοιχούν σε μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ οι κίτρινοι κύκλοι δηλώνουν αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με μία ήρεμη περίοδο, όπως αυτές οι μεταβολές έχουν καταγραφεί από τους σταθμούς που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο ‘Ring of Stations’ (βλ. Κεφ. IV § 4.5). Το μέγεθος των κύκλων είναι ανάλογο του μεγέθους της μεταβολής. Η κάθετη γραμμή υποδηλώνει τη χρονική στιγμή καταγραφής του SSC. Συνήθως πρόκειται για την έναρξη της μείωσης Forbush, όταν η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται σε όλους τους σταθμούς, όπως φαίνεται και στα σχήματα 6.3, 6.4 και 6.5.



Σχ. 6.3 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 24 Ιουνίου 1980 (άνω διάγραμμα) και 28 Οκτωβρίου 2000 (κάτω διάγραμμα).



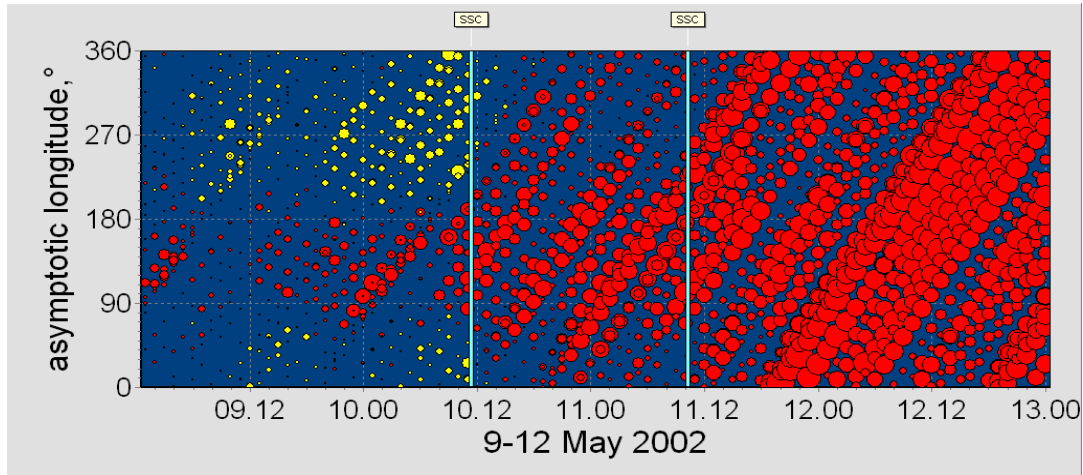
Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για την πρώτη ομάδα γεγονότων μία μακράς διάρκειας και σε ορισμένο πλάτος προ-μείωση παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς για ασυμπτωτικά μήκη από  $90^\circ$  μέχρι  $180^\circ$  (Σχ. 6.3, 6.4 και 6.5).



Σχ. 6.4 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 17 Αυγούστου 2001 (άνω διάγραμμα) και 23 Απριλίου 2002 (κάτω διάγραμμα).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3 (άνω διάγραμμα), για το γεγονός της 24<sup>ης</sup> Ιουνίου 1980, η προ-μείωση ξεκινά κάποιες ώρες μετά τις 00:00 UT την 23<sup>η</sup> Ιουνίου και διαρκεί έως και τις 02:00 UT την 24<sup>η</sup> Ιουνίου (Papailiou et al., 2012c). Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για τη μείωση Forbush της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000 (Σχ. 6.3, κάτω διάγραμμα). Και εδώ η προ-μείωση ξεκινάει κάποιες ώρες μετά τις 00:00

UT την 27<sup>η</sup> Οκτωβρίου και διαρκεί σχεδόν 24 ώρες (Papailiou et al., 2012c). Για το γεγονός της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001 (Σχ. 6.4, άνω διάγραμμα) η προ-μείωση, επίσης, διαρκεί σχεδόν 24 ώρες, ενώ παρατηρείται και μία προ-αύξηση άνω των 180° (Papailiou et al., 2012b; c).



Σχ. 6.5 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για το γεγονός στις 10 Μαΐου 2002.

Η προ-μείωση για το γεγονός της 23<sup>ης</sup> Απριλίου 2002 (Σχ. 6.4, κάτω διάγραμμα) διαρκεί σχεδόν 16 ώρες, ενώ για το γεγονός της 10<sup>ης</sup> Μαΐου 2002 (Σχ. 6.5) σχεδόν 24 ώρες ξεκινώντας από τις 12:00 UT της 9<sup>ης</sup> Μαΐου. Και στις δύο περιπτώσεις είναι ορατή μία προ-αύξηση άνω των 180° (Papailiou et al., 2012c).

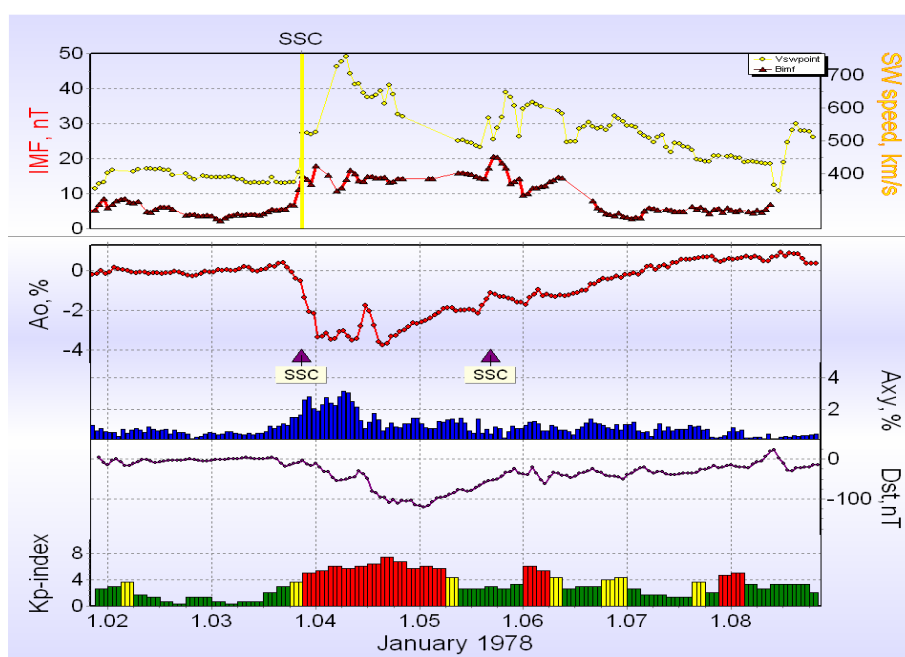
### 6.2.2 Προ-αυξήσεις σε ασυμπτωτικό μήκος άνω των 180° (2<sup>η</sup> ομάδα)

Οι ηλιογραφικές συντεταγμένες των ηλιακών εκλάμψεων που συνδέονται με αυτές τις μειώσεις, όπως επίσης και άλλες διαπλανητικές παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Όπως φαίνεται, τα υπό εξέταση γεγονότα σχετίζονται, κυρίως, με κεντρικές ή ανατολικές εκλάμψεις και συνδέονται με γεωμαγνητικές καταιγίδες (μέτριας, ισχυρής ή πολύ ισχυρής έντασης). Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή για τον δείκτη  $K_p$  ήταν 8 και σημειώθηκε για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Αυγούστου 1998, ενώ ο  $Dst$ , για το ίδιο γεγονός, μειώθηκε έως  $-188nT$ . Χαμηλές τιμές, όμως, του δείκτη  $Dst$  σημειώθηκαν για αρκετά από τα υπόλοιπα γεγονότα, όπως για παράδειγμα της 3<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1978 ( $-121nT$ ), της 10<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998 ( $-156nT$ ), της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992 ( $-135$ ), της 25<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001 ( $-170nT$ ) και της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002 (-

170nT). Ακόμη, παρατηρείται αύξηση στην ένταση του διαπλανητικού πεδίου για κάποιες από τις μειώσεις Forbush, με μέγιστη τιμή να σημειώνεται για το γεγονός της 10<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1988 (27.4nT), ενώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου μεταβάλλεται από 397 km s<sup>-1</sup> (μείωση της 30<sup>ης</sup> Μαρτίου 1980) έως 847 km s<sup>-1</sup> (μείωση της 26<sup>ης</sup> Αυγούστου 1998). Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει μειώσεις με πλάτη από περίπου 2% έως και 8%, ενώ η μέγιστη ανισοτροπία κυμαίνεται από ~1.5% έως ~5%, με μέγιστη τιμή (4.85%) να καταγράφεται για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Αυγούστου 1998.

### 6.2.2.1 Ανάλυση γεγονότων 2<sup>ης</sup> ομάδας

Στη συνέχεια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή μερικών από τα γεγονότα της 2<sup>ης</sup> ομάδας.

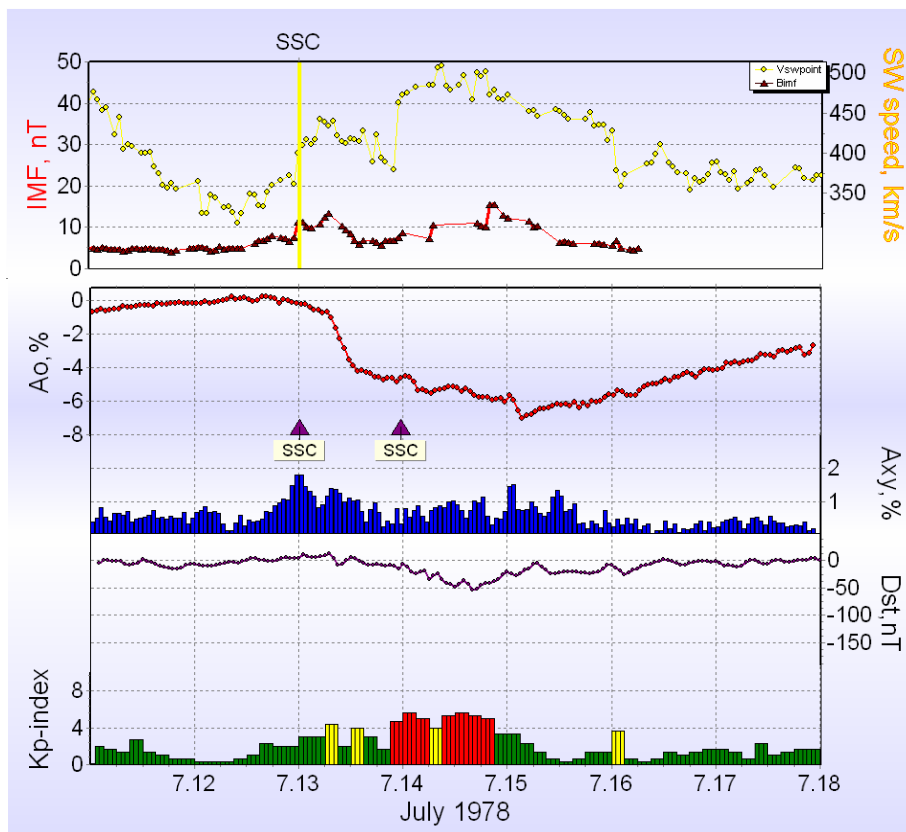


Σχ. 6.6 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 3<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1978.

#### 1) Μείωση Forbush 3<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1978

Το SSC, για το υπό μελέτη γεγονός, καταγράφηκε στις 3 Ιανουαρίου 1978 στις 20:42 UT. Η αύξηση της έντασης του διαπλανητικού πεδίου (17.9nT) και της

ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ( $756 \text{ km s}^{-1}$ ) φαίνεται στο σχήμα 6.6 (άνω διάγραμμα). Ακολούθησε μία μείωση Forbush ( $\sim 4\%$ ), η οποία ολοκληρώθηκε σε 2 βήματα (την αρχική μείωση ακολούθησε μία μικρή αύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ( $\sim 2\%$ ) και στη συνέχεια μία νέα μείωση) και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν  $2.97\%$  (Σχ. 6.6, μεσαίο διάγραμμα). Επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6 (κάτω διάγραμμα), με το συγκεκριμένο γεγονός συνδέεται και μία μεγάλη γεωμαγνητική καταιγίδα ( $Kp_{\text{max}} = 7.3$  και  $Dst_{\text{min}} = -121 \text{ nT}$ ).

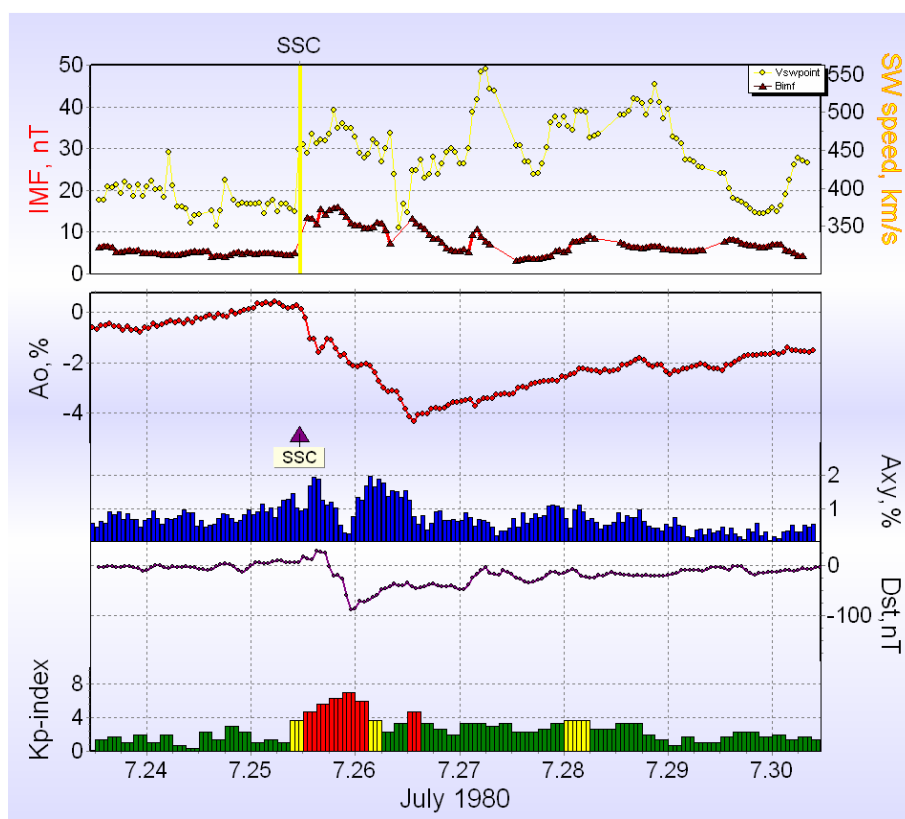


Σχ. 6.7 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1978.

## 2) Μείωση Forbush 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1978

Η άφιξη του σχετικού SSC σημειώθηκε στις 13 Ιουλίου 1978 στις 00:15 UT (Σχ. 6.7, άνω διάγραμμα). Αυτό το γεγονός συνδέεται με μία ανατολική (N18E58) έκλαμψη τάξης X3.0 που καταγράφηκε την 10<sup>η</sup> Ιουλίου 1978 στις 06:20 UT. Κατά τη διάρκεια αυτής της μείωσης η μέγιστη ένταση του IMF και της ταχύτητας του

ηλιακού ανέμου ήταν 13.4nT και 442 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.7, άνω διάγραμμα). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.7 (κάτω διάγραμμα), η μέγιστη τιμή του δείκτη Kp ήταν 4.3 και η ελάχιστη τιμή του δείκτη Dst -11nT. Επίσης, σημειώθηκε μία σημαντική μείωση (περίπου 5%) της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και μέγιστη τιμή ανισοτροπίας 2.62% (Σχ. 6.7, μεσαίο διάγραμμα).

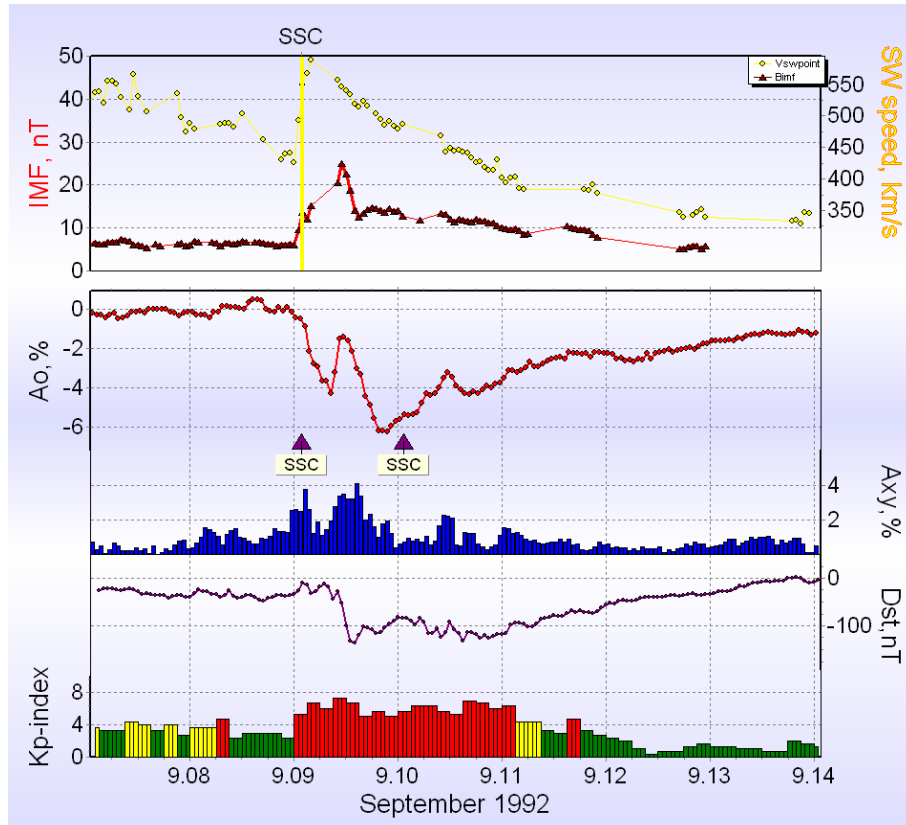


Σχ. 6.8 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 25<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980.

### 3) Μείωση Forbush 25<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980

Το SSC σημειώθηκε στις 25 Ιουλίου 1980 στις 11:11 UT (Σχ. 6.8, άνω διάγραμμα). Με αυτό το γεγονός σχετίζεται μία κεντρική (S17E13) έκλαμψη τάξης M8.9 που σημειώθηκε την 23<sup>η</sup> Ιουλίου 1980 στις 00:58 UT. Οι μέγιστες τιμές για την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν 16nT και 503 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.8, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, που σημειώθηκε στις 25 – 26 Ιουλίου 1980 και

ολοκληρώθηκε σε 2 βήματα, ήταν περίπου 5% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 1.97% (Σχ. 6.8, μεσαίο διάγραμμα). Κατά τη διάρκεια αυτού του γεγονότος η γεωμαγνητική δραστηριότητα ήταν υψηλή ( $Kp_{max} = 7.0$  και  $Dst_{min} = -88nT$ ) όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.8 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.9 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992.

#### 4) Μείωση Forbush 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992

Το SSC σημειώθηκε την 9<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 1992 στις 01:39 UT. Η σχετική τάξης M1.3 έκλαμψη (S13W32) σημειώθηκε την 6<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 1992 στις 06:57 UT. Παρατηρήθηκε μία έντονη αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στα 25nT και άλμα της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου στα  $\sim 600 \text{ km s}^{-1}$  (Σχ. 6.9, άνω διάγραμμα). Αυτή η συγκεκριμένη μείωση Forbush, που διήρκεσε σχεδόν 1 μέρα, ήταν ένα περίπλοκο γεγονός. Μετά την πρώτη μείωση της τάξης του 4%, η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυξήθηκε περίπου 2% και ξαναμειώθηκε στη

συνέχεια (~6%), ενώ η ανισοτροπία είχε μέγιστη τιμή 4.10% (Σχ. 6.9, μεσαίο διάγραμμα). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες  $K_p$  και  $Dst$  πήραν τιμές 7.3 και  $-135nT$  αντίστοιχα (έντονη μαγνητική καταιγίδα), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.9 (κάτω διάγραμμα).

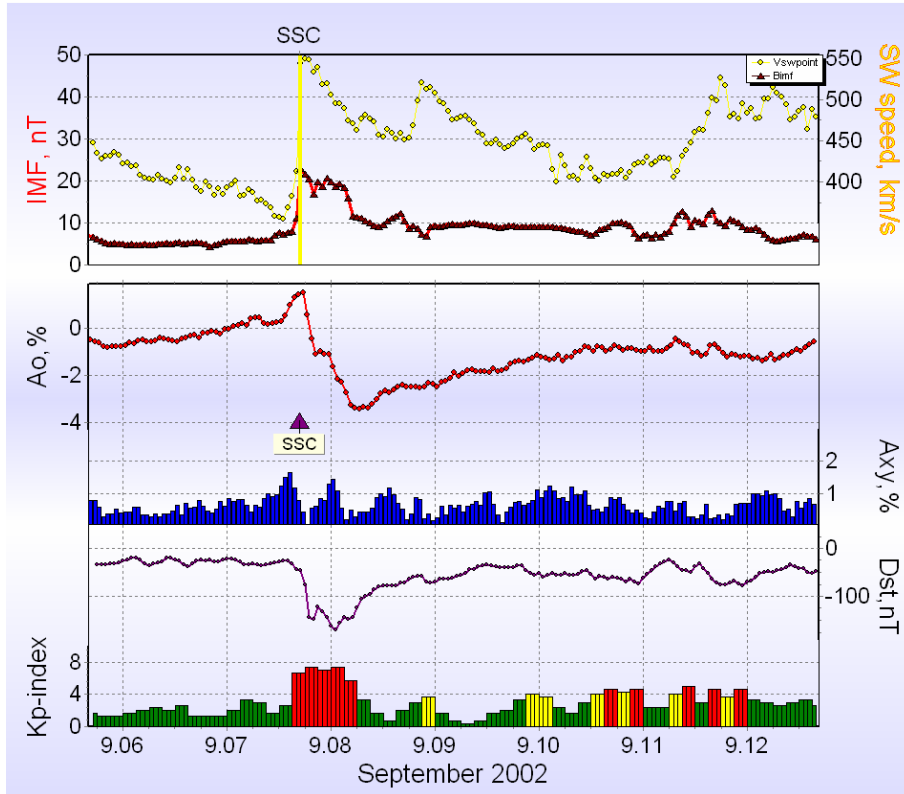


Σχ. 6.10 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $K_p$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 25<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001.

### 5) Μείωση Forbush 25<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001

Το SSC καταγράφηκε στις 25 Σεπτεμβρίου 2001 στις 20:25 UT (Σχ. 6.10, άνω διάγραμμα). Η σχετική έκλαμψη (S16E23) τάξης X2.6 σημειώθηκε την 24<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2001 στις 09:32 UT. Στο σχήμα 6.10 (άνω διάγραμμα) επίσης φαίνεται μία σημαντική αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (26.1nT και  $677 \text{ km s}^{-1}$  αντίστοιχα). Η μείωση Forbush που σημειώθηκε στις 25 – 26 Σεπτεμβρίου 2001 (Σχ. 6.10, μεσαίο διάγραμμα) ήταν περίπου της τάξης του 8% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 1.84%.

Οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst, γι' αυτό το γεγονός, ήταν 7.3 και -102nT αντίστοιχα (έντονη μαγνητική καταιγίδα) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10 (κάτω διάγραμμα).



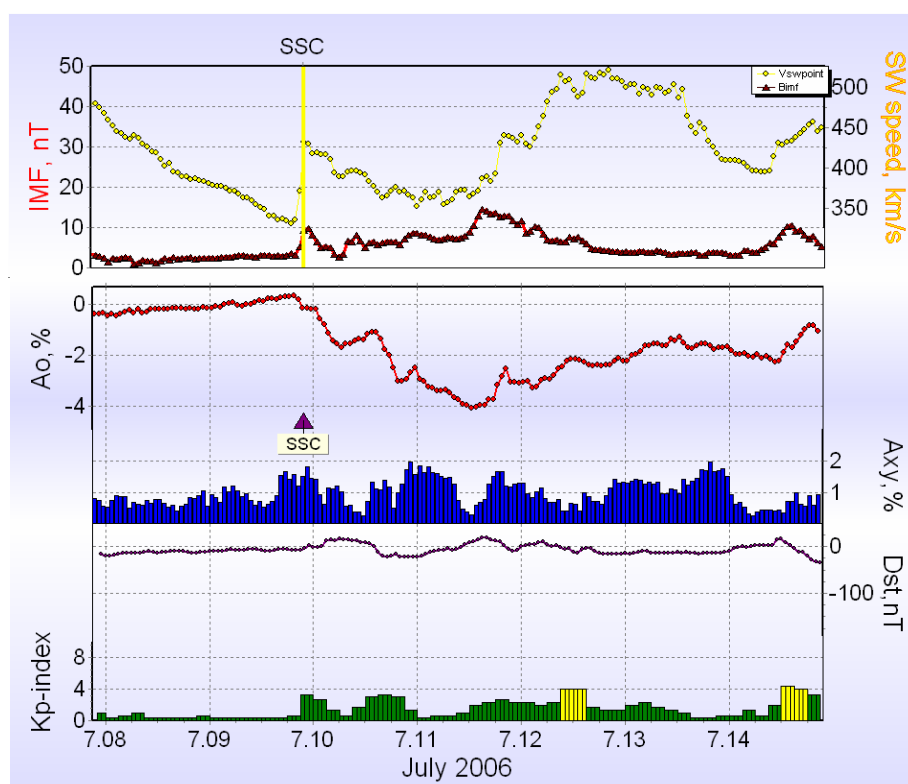
Σχ. 6.11 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $K_p$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002.

## 6) Μείωση Forbush 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002

Κατά το γεγονός αυτό, το SSC σημειώθηκε την 7<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2002 στις 16:36 UT. Η έκλαμψη που σχετίζεται με αυτό είναι ανατολική (N09E28) τάξης C5.2 και καταγράφηκε την 5<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2002 στις 16:18 UT. Στο σχήμα 6.11 (άνω διάγραμμα) δίνονται η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (22.9nT) και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ( $550 \text{ km s}^{-1}$ ). Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.11 (μεσαίο διάγραμμα) η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειώθηκε ~5% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 1.64%, ενώ σημειώθηκε και μία έντονη μαγνητική καταιγίδα, με



τους γεωμαγνητικούς δείκτες Dst και Kp να παίρνουν τις τιμές -170nT και 7.3 αντίστοιχα (Σχ. 6.11, κάτω διάγραμμα).



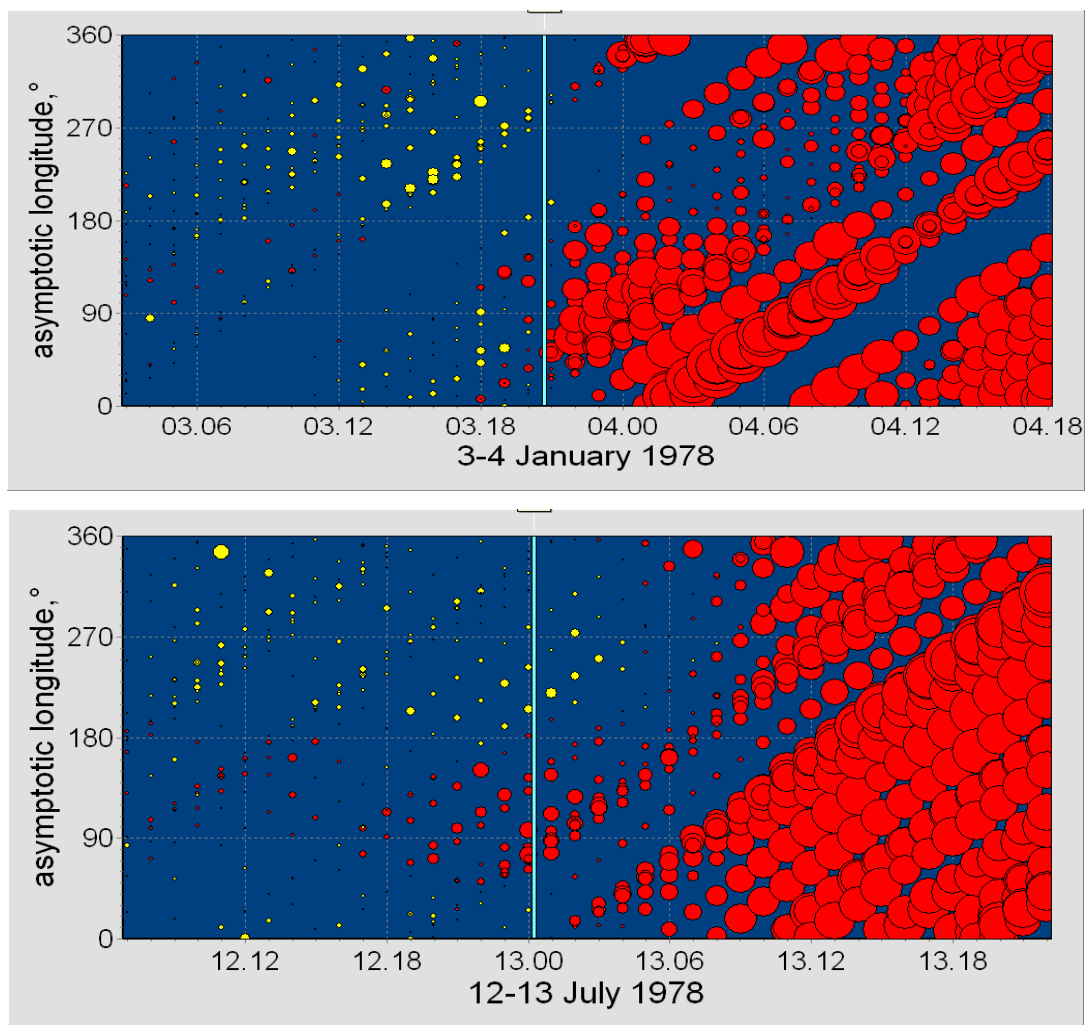
Σχ. 6.12 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών Dst και Kp (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 9<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006.

## 7) Μείωση Forbush 9<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006

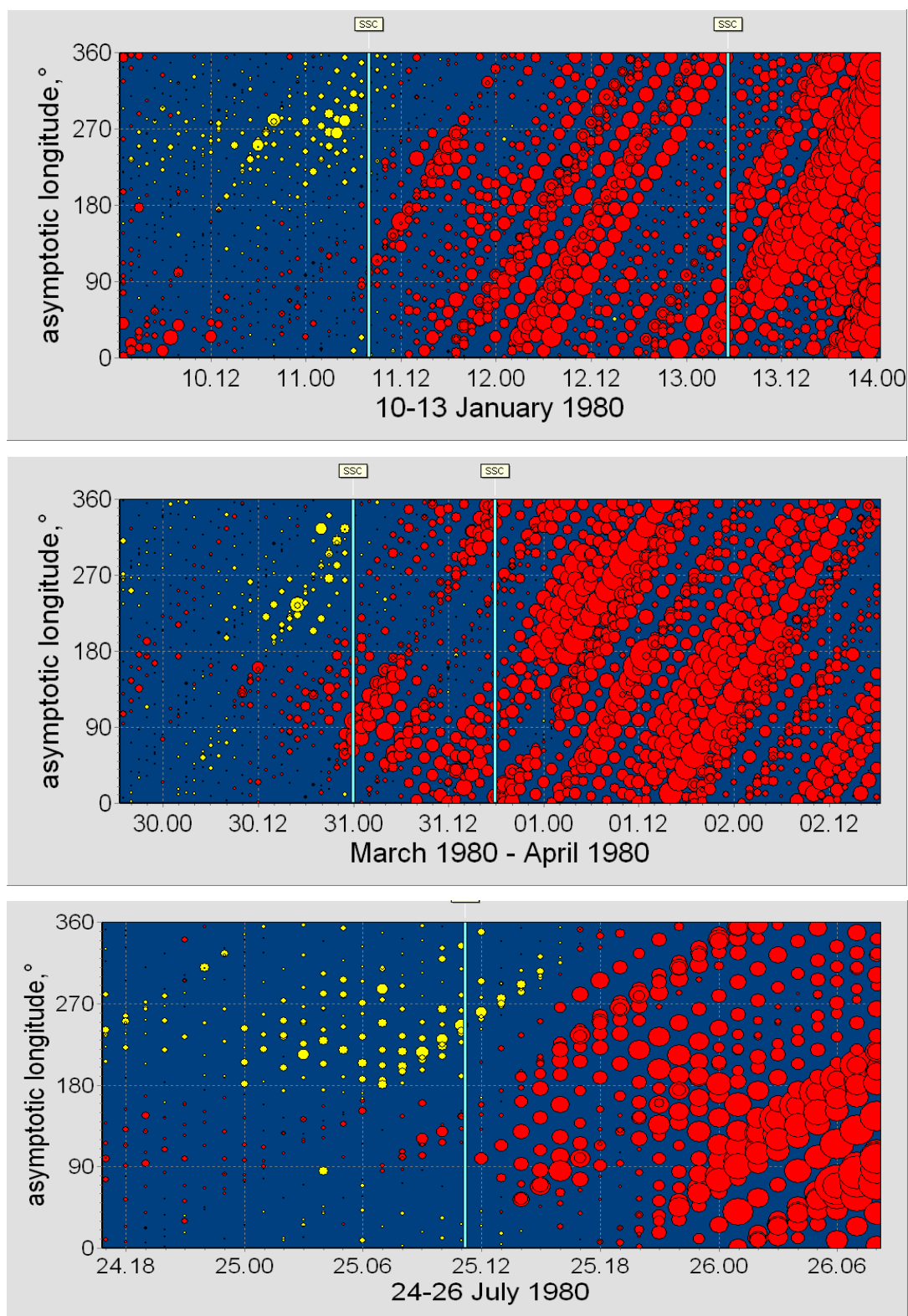
Το SSC της 9<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006 σημειώθηκε στις 21:36 UT. Η σχετιζόμενη με αυτό το γεγονός έκλαμψη ήταν η δυτική (S09W34) έκλαμψη της 6<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006 στις 8:13 UT τάξης M2.5. Παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (9.7nT) και μία μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου, η οποία όμως παρέμεινε αρκετά χαμηλή ( $433 \text{ km s}^{-1}$ ) (Σχ. 6.12, άνω διάγραμμα). Η μείωση Forbush της 10<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006 ολοκληρώθηκε σε τρία βήματα και η συνολική μείωση ήταν ~4% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 1.95% (Σχ. 6.12, μεσαίο διάγραμμα). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.12 (κάτω διάγραμμα), η γεωμαγνητική δραστηριότητα ήταν χαμηλή ( $Kp_{\max} = 3.3$  και  $Dst_{\min} = -23\text{nT}$ ).

### 6.2.2.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων 2<sup>ης</sup> ομάδας

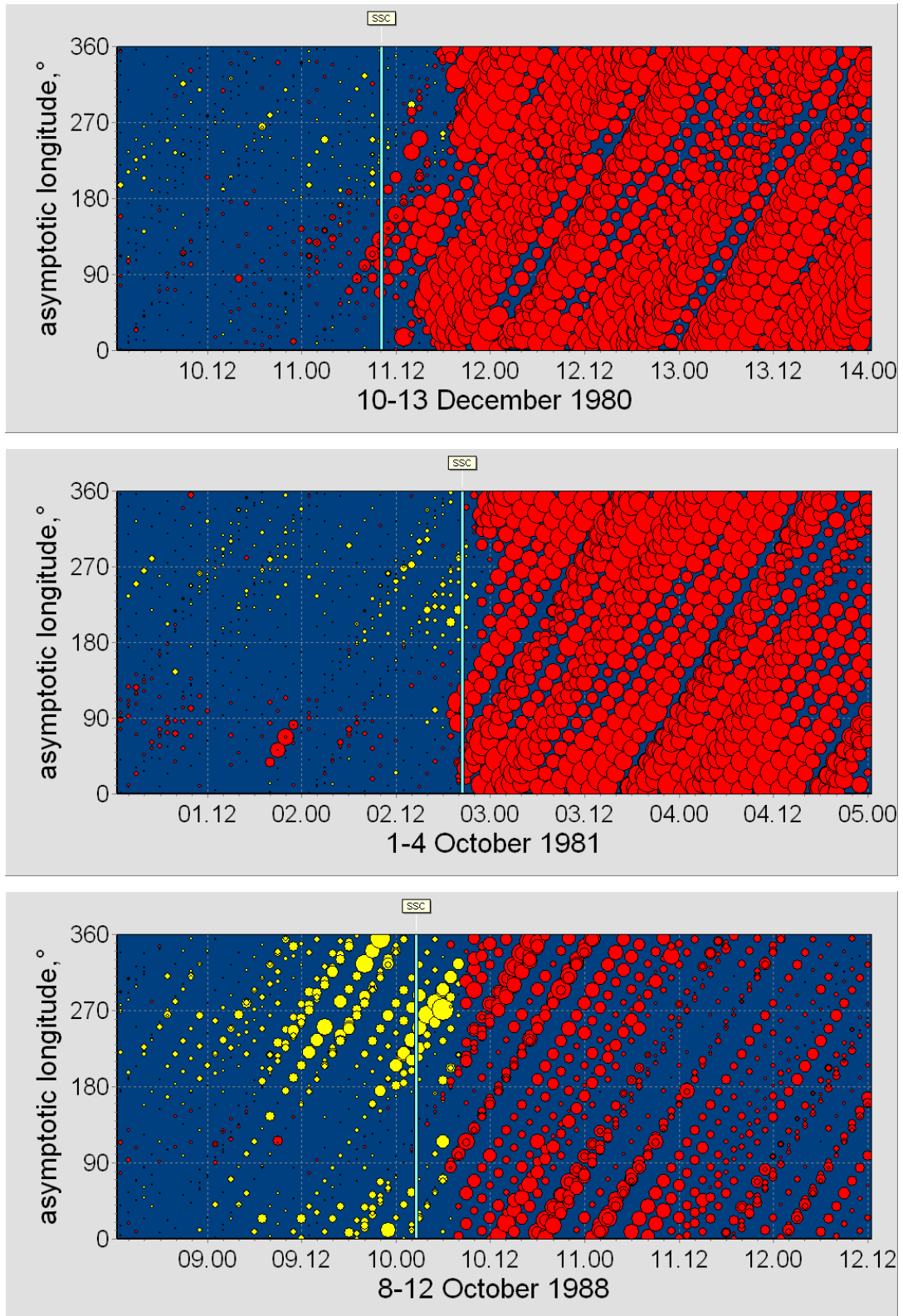
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους για τα παραδείγματα των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας αυτής της ομάδας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε αυτές τις περιπτώσεις το προειδοποιητικό σήμα είναι μία προ-αύξηση που καταγράφεται σε μήκη άνω των 180° έως και 360° και διαρκεί περίπου 12 ώρες έως τη μείωση. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται και μία προ-μείωση σε περιοχές μηκών κάτω των 180°, η οποία διαρκεί λίγες ώρες μέχρι το κύριο γεγονός (Papaiioliou et al., 2012b).



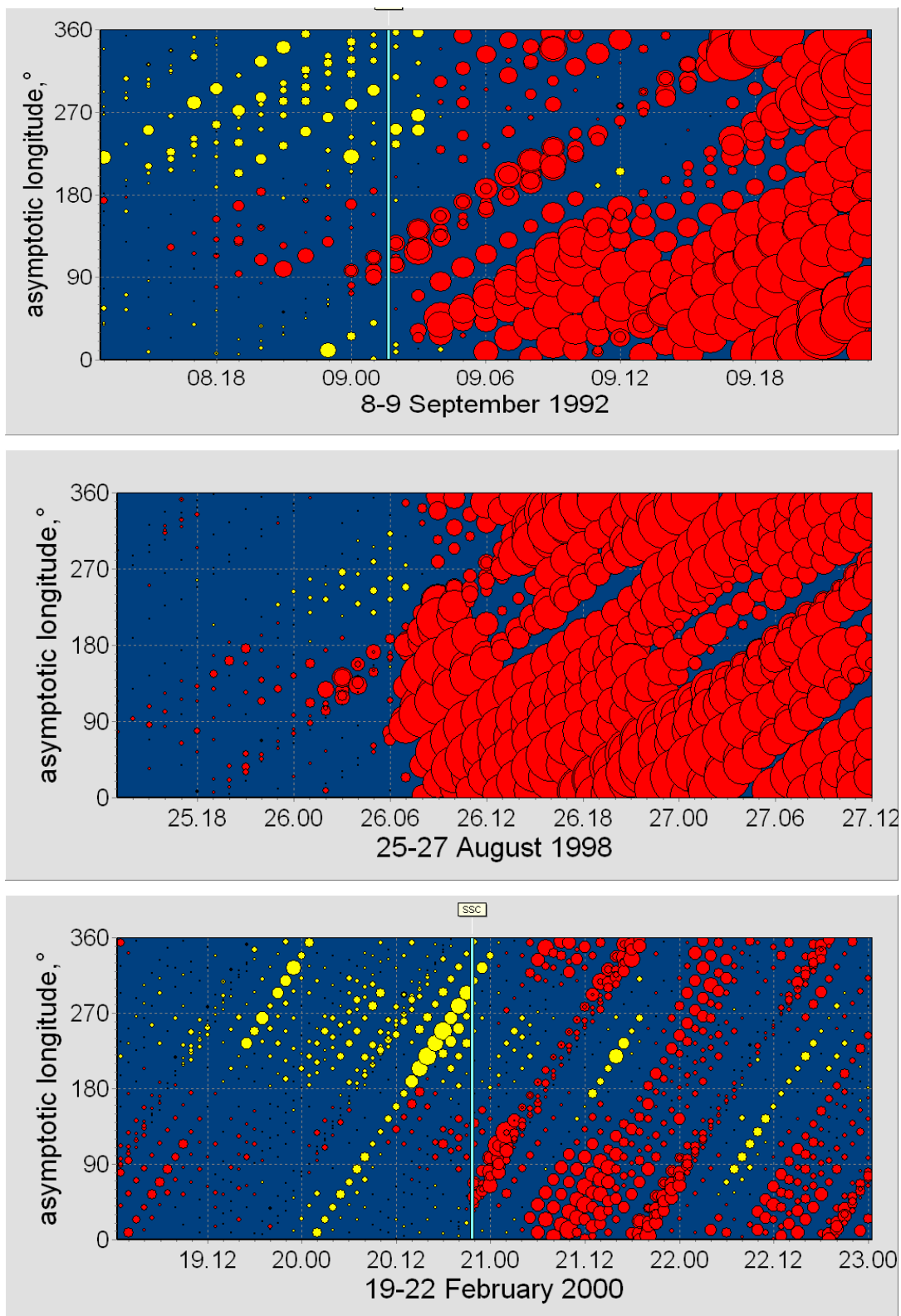
Σχ. 6.13 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 3 Ιανουαρίου 1978 (άνω διάγραμμα) και 13 Ιουλίου 1978 (κάτω διάγραμμα).



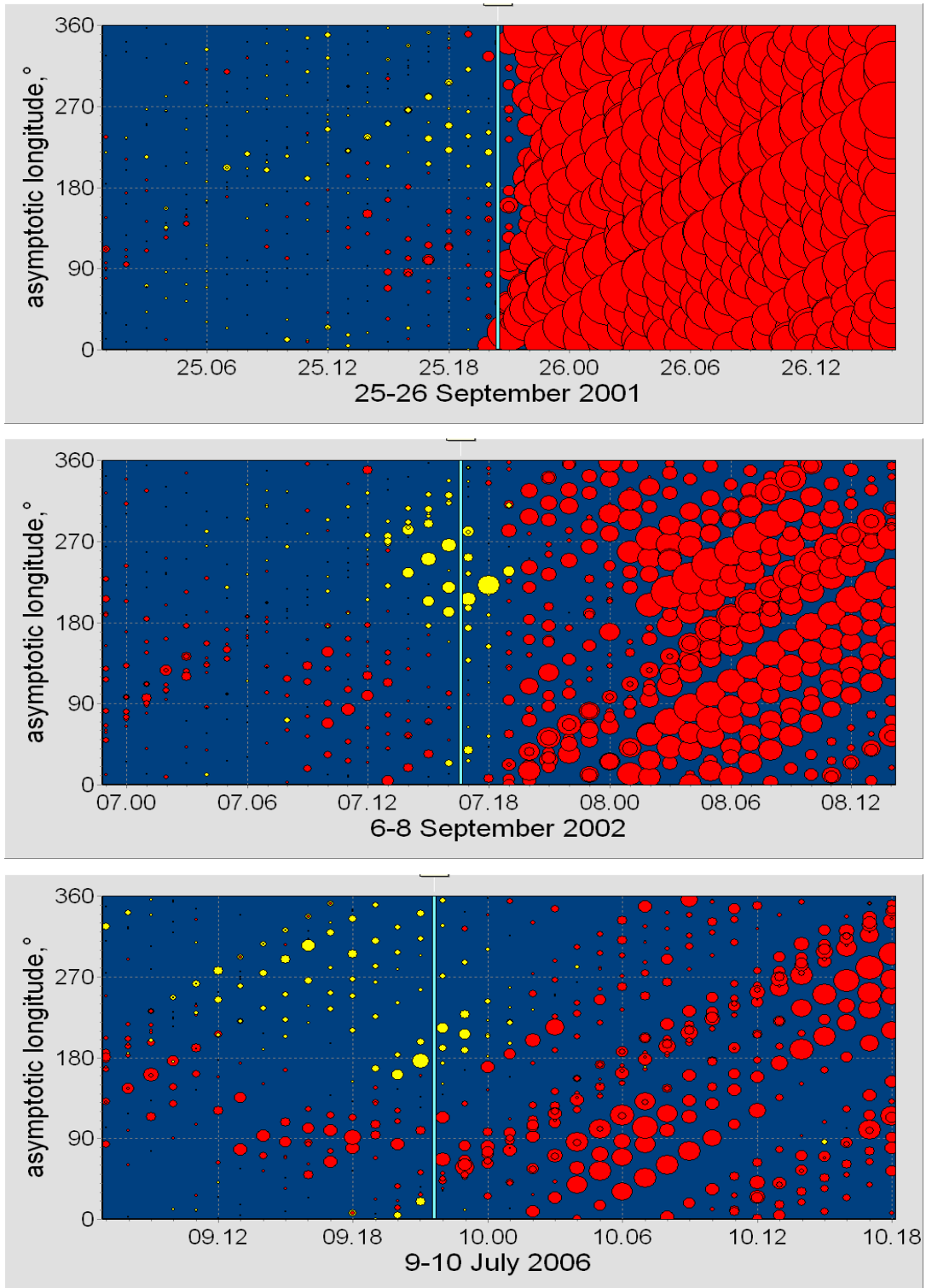
Σχ. 6.14 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 11 Ιανουαρίου 1980 (άνω διάγραμμα), 30 Μαρτίου 1980 (μεσαίο διάγραμμα) και 25 Ιουλίου 1980 (κάτω διάγραμμα)



Σχ. 6.15 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 11 Δεκεμβρίου 1980 (άνω διάγραμμα), 2 Οκτωβρίου 1981 (μεσαίο διάγραμμα) και 10 Οκτωβρίου 1988 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.16 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 9 Σεπτεμβρίου 1992 (άνω διάγραμμα), 26 Αυγούστου 1998 (μεσαίο διάγραμμα) και 20 Φεβρουαρίου 2000 (άνω διάγραμμα).



*Σχ. 6.17 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 25 Σεπτεμβρίου 2001 (άνω διάγραμμα), 7 Σεπτεμβρίου 2002 (μεσαίο διάγραμμα) και 9 Ιουλίου 2006 (κάτω διάγραμμα).*

Για το γεγονός της 3<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1978 (Σχ. 6.13, άνω διάγραμμα) η προ-αύξηση παρατηρείται περίπου 10 ώρες πριν το SSC, ενώ για τις μειώσεις Forbush της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1978 (Σχ. 6.13, κάτω διάγραμμα) και της 11<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1980 (Σχ. 6.14, άνω διάγραμμα) η προ-αύξηση διαρκεί περίπου 12 ώρες ξεκινώντας από τις 12:00 UT της 12<sup>ης</sup> Ιουλίου και από τις 22:00 UT της 10<sup>ης</sup> Ιανουαρίου αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.14 (μεσαίο διάγραμμα), το προειδοποιητικό σήμα για το γεγονός της 30<sup>ης</sup> Μαρτίου 1980 είναι μία προ-αύξηση άνω των 180° που ξεκινάει περίπου στις 12:00 UT την 30<sup>η</sup> Μαρτίου αλλά και μία προ-μείωση κάτω των 180° που διαρκεί κάποιες ώρες λιγότερο. Η προ-αύξηση για το γεγονός της 25<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980 (Σχ. 6.14, κάτω διάγραμμα) είναι μεγαλύτερης διάρκειας από ότι έχει παρατηρηθεί μέχρι στιγμής για τις μειώσεις αυτής της κατηγορίας, αφού ξεκινάει λίγες ώρες μετά τις 12:00 UT την 24<sup>η</sup> Ιουλίου και ολοκληρώνεται σχεδόν 24 ώρες μετά. Για το γεγονός της 11<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 1980 (Σχ. 6.15, άνω διάγραμμα) η προ-αύξηση είναι πολύ ασθενής και διαρκεί περίπου 8 – 10 ώρες, ενώ σημαντική είναι και η προ-μείωση.

Για το παράδειγμα της 2<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1981 (Σχ. 6.15, μεσαίο διάγραμμα) η προ-αύξηση παρατηρείται σχεδόν 10 ώρες πριν το κύριο γεγονός (Papaïliou et al., 2012b), ενώ για τη μείωση της 10<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1988 (Σχ. 6.15, κάτω διάγραμμα) διαρκεί άνω των 12 ωρών. Για το παράδειγμα της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992 (Σχ. 6.16, άνω διάγραμμα) η προ-αύξηση διαρκεί σχεδόν 12 ώρες και επίσης εμφανίζεται και μία προ-μείωση περίπου 8 ωρών.

Στο σχήμα 6.16 (μεσαίο διάγραμμα) απεικονίζεται η μείωση της 26<sup>ης</sup> Αυγούστου 1998 και είναι φανερό η προ-αύξηση περίπου 6 ώρες πριν εκδηλωθεί το κύριο γεγονός αλλά είναι, επίσης, έντονη η προ-μείωση παρόμοιας διάρκειας. Για το γεγονός της 20<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2000 (Σχ. 6.16, κάτω διάγραμμα) η προ-αύξηση διαρκεί αρκετές ώρες μέχρι το κύριο γεγονός και η προ-μείωση περίπου 6 ώρες. Για τη μείωση της 25<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001 (Σχ. 6.17, άνω διάγραμμα) η προ-αύξηση αν και ασθενής παρατηρείται περίπου 8 ώρες πριν τη μείωση (Papaïliou et al., 2012b).

Τέλος, έντονες προ-αυξήσεις εμφανίζονται στα διαγράμματα των γεγονότων της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002 (Σχ. 6.17, μεσαίο διάγραμμα) και 9<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006 (Σχ. 6.17, κάτω διάγραμμα). Στην πρώτη περίπτωση το προειδοποιητικό σήμα ξεκινά λίγες ώρες μετά τις 00:00 UT την 7<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου και ολοκληρώνεται λίγες ώρες μετά τις 12:00 UT της ίδιας ημέρας και στη δεύτερη περίπτωση η προ-αύξηση ξεκινά λίγες ώρες πριν τις 12:00 UT την 9<sup>η</sup> Ιουλίου και ολοκληρώνεται λίγες ώρες μετά τις 00:00 UT της επόμενης ημέρας.

### 6.2.3 Προ-μειώσεις τυχαίας διάρκειας και ασυμπτωτικού μήκους (3<sup>η</sup> ομάδα)

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που περιγράφουν τις διαπλανητικές συνθήκες για τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Η μέγιστη τιμή του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν 26.2nT για το γεγονός της 18<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998, ενώ οι τιμές της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου μεταβλήθηκαν από 401 km s<sup>-1</sup> έως 518 km s<sup>-1</sup>. Επίσης, όπως παρατηρείται, αυτές οι μειώσεις δεν συνδέονται με έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα, αφού ο γεωμαγνητικός δείκτης Kp μεταβάλλεται από 2.7 (για τα γεγονότα της 4<sup>ης</sup> Μαρτίου 1995 και 15<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2000) έως 6.7 (για το γεγονός της 18<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998). Ακόμη, ο δείκτης Dst κυμάνθηκε σε μεγάλες σχετικά τιμές (από -7nT έως -60nT) για την πλειοψηφία των γεγονότων, πλην της περίπτωσης της μείωσης της 18<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998, για την οποία είχε τιμή -139nT. Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει μικρές μειώσεις, με πλάτος που κυμαίνεται από 0.8% έως 3.4% και οι οποίες συνδέονται, κυρίως, με κεντρικές πηγές. Η μέγιστη τιμή ανισοτροπίας (3.3%) σημειώθηκε για τη μείωση της 15<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2000, ενώ για άλλα δύο γεγονότα (8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1981 και 3<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001) η μέγιστη τιμή ανισοτροπίας ήταν άνω του 3%.

#### 6.2.3.1 Ανάλυση γεγονότων 3<sup>ης</sup> ομάδας

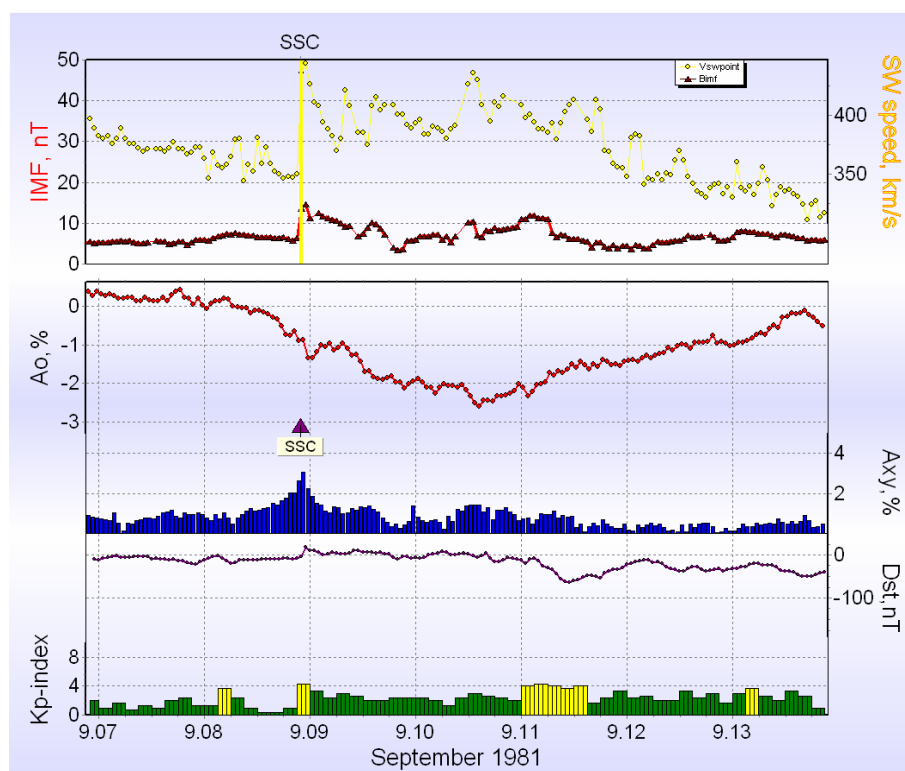
Στη συνέχεια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή μερικών γεγονότων της 3<sup>ης</sup> ομάδας.

##### 1) Μείωση Forbush 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1981

Το SSC της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1981 σημειώθηκε στις 21:46 UT. Η ηλιακή έκλαμψη που συνδέεται με αυτό το γεγονός ήταν κεντρική (S13E16) τάξης M7.4 και



σημειώθηκε στις 3 Σεπτεμβρίου 1981 στις 22:57 UT. Σημειώθηκε μία μικρή αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (14.7nT) και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ( $\sim 450 \text{ km s}^{-1}$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.18 (άνω διάγραμμα). Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας μειώθηκε  $\sim 2\%$  και η ανισοτροπία είχε μέγιστη τιμή 3.06% (Σχ. 6.18, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική δραστηριότητα ήταν χαμηλή, αφού οι δείκτες Kp και Dst ήταν 4.3 και -12nT αντίστοιχα (Σχ. 6.18, κάτω διάγραμμα).

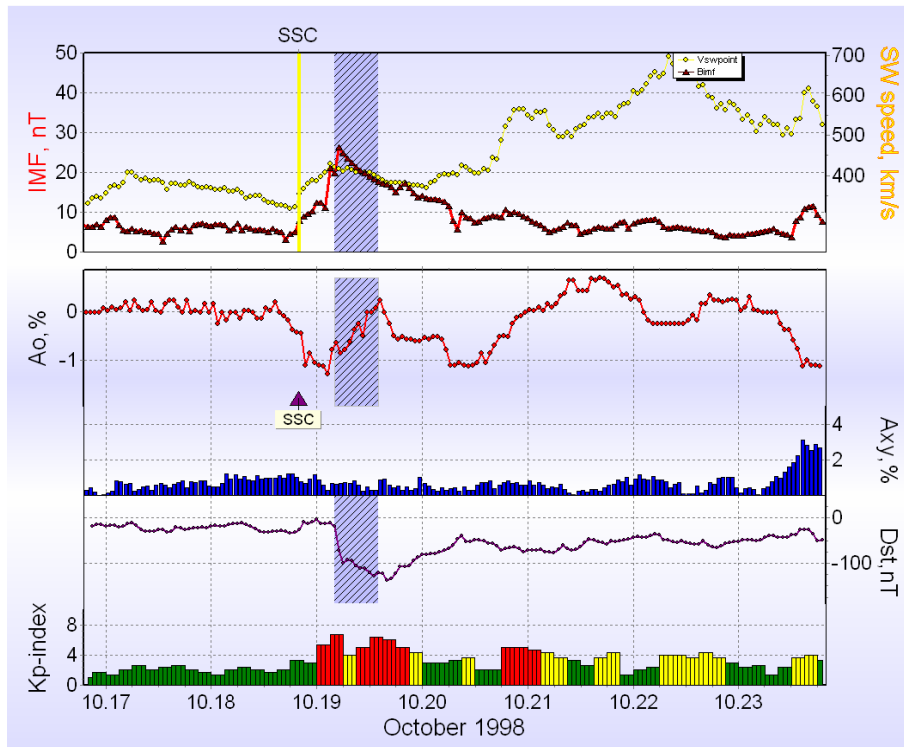


Σχ. 6.18 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1981.

## 2) Μείωση Forbush 18<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998

Το SSC, που σχετίζεται με το παρόν γεγονός, σημειώθηκε την 18<sup>η</sup> Οκτωβρίου 1998 στις 19:52 UT (Σχ. 6.19, άνω διάγραμμα). Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται μία έντονη αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου έως τα 26.2nT, ενώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είχε τιμή  $430 \text{ km s}^{-1}$ . Η σχετική τάξης C1.0 έκλαμψη (N16E03) σημειώθηκε στις 13 Οκτωβρίου 1998 στις 19:29 UT. Η μείωση

Forbush που καταγράφηκε στις 18 – 19 Οκτωβρίου 1998 (Σχ. 6.19, μεσαίο διάγραμμα) ήταν μικρότερη από 2% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 1.24%. Οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν τιμές 6.7 και -139nT αντίστοιχα (μέτρια μαγνητική καταιγίδα), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.19 (κάτω διάγραμμα).

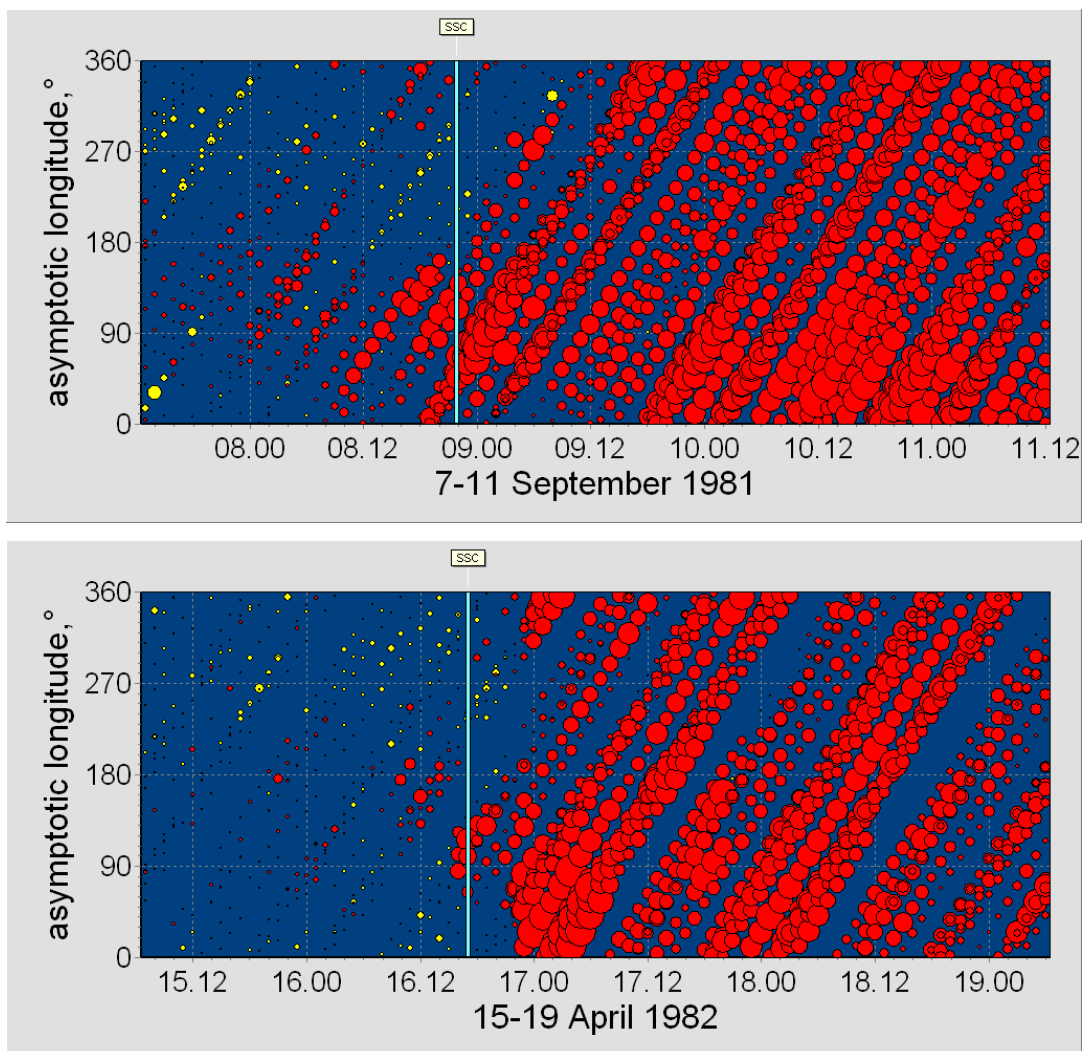


Σχ. 6.19 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 18<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998.

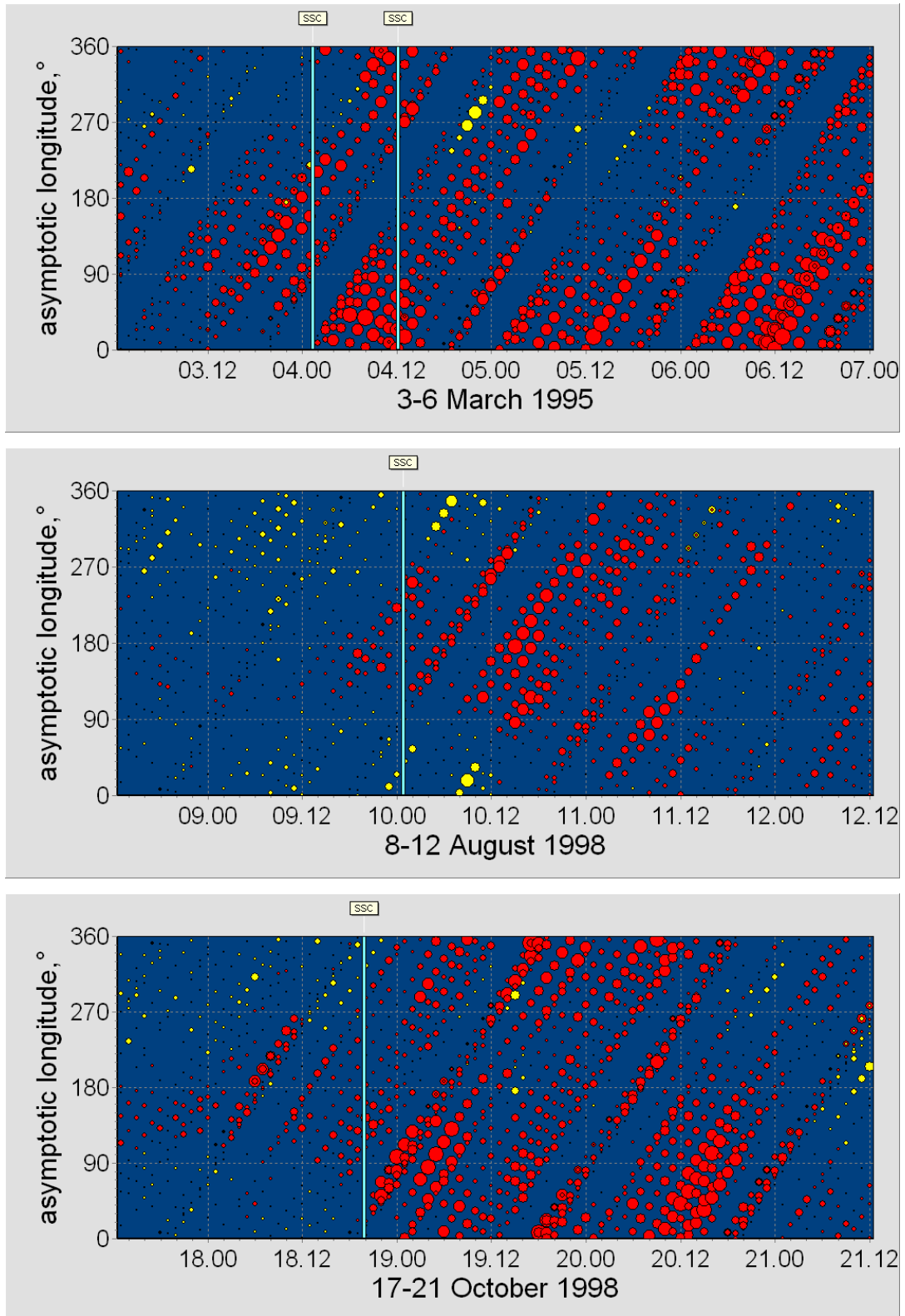
### 6.2.3.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων 3<sup>ης</sup> ομάδας

Στα σχήματα 6.20, 6.21 και 6.22 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί για τα παραδείγματα αυτής της ομάδας η προ-μείωση παρατηρείται σε διαφορετικά μήκη και έχει διαφορετική διάρκεια σε κάθε γεγονός (Papailiou et al., 2012b).

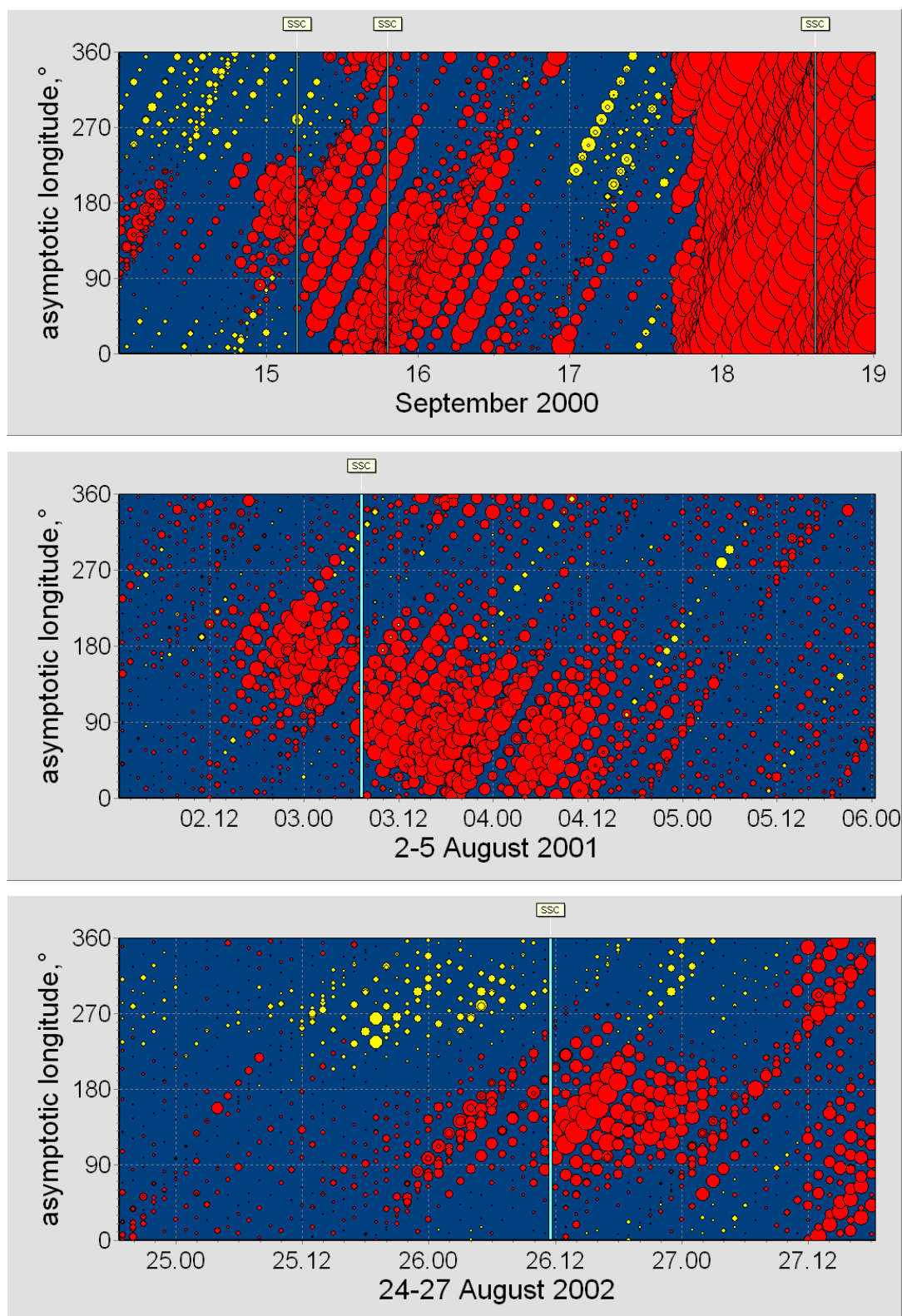
Πιο συγκεκριμένα, για τη μείωση της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1981 (Σχ. 6.20, άνω διάγραμμα) η προ-μείωση διαρκεί περίπου 24 ώρες (Parailiou et al., 2012b), ενώ για το αμέσως επόμενο γεγονός της 16<sup>ης</sup> Απριλίου 1982 (Σχ. 6.20, κάτω διάγραμμα) το προειδοποιητικό σήμα δεν ξεπερνά τις 10 ώρες. Στο σχήμα 6.21 (άνω διάγραμμα) απεικονίζεται η μείωση της 4<sup>ης</sup> Μαρτίου 1995 για την οποία η προ-μείωση διαρκεί σχεδόν 12 ώρες.



Σχ. 6.20 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 8 Σεπτεμβρίου 1981 (άνω διάγραμμα) και 16 Απριλίου 1982 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.21 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 4 Μαρτίου 1995 (άνω διάγραμμα), 10 Αυγούστου 1998 (μεσαίο διάγραμμα) και 18 Οκτωβρίου 1998 (κάτω διάγραμμα)



Σχ. 6.22 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 15 Σεπτεμβρίου 2000 (άνω διάγραμμα), 3 Αυγούστου 2001 (μεσαίο διάγραμμα) και 25 Αυγούστου 2002 (κάτω διάγραμμα).

Στη συνέχεια για το γεγονός της 10<sup>ης</sup> Αυγούστου 1998 (Σχ. 6.21, μεσαίο διάγραμμα) η προ-μείωση ξεκινά λίγες ώρες μετά τις 12:00 UT της 9<sup>ης</sup> Αυγούστου και διαρκεί περίπου 8 ώρες μέχρι το SSC. Η προ-μείωση για τη μείωση της 18<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1998 (Σχ. 6.21, κάτω διάγραμμα) διαρκεί κάτι λιγότερο από μία ημέρα (Papaïliou et al., 2012b), ενώ για το γεγονός της 15<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2000 (Σχ. 6.22, άνω διάγραμμα) η προ-μείωση παρατηρείται για πολύ πιο σύντομο χρονικό διάστημα (λιγότερο από 6 ώρες).

Τέλος, για τα παραδείγματα της 3<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001 (Σχ. 6.22, μεσαίο διάγραμμα) και 25<sup>ης</sup> Αυγούστου 2002 (Σχ. 6.22, κάτω διάγραμμα) οι προ-μειώσεις γίνονται αντιληπτές περίπου 20 και 12 ώρες πριν το SSC αντίστοιχα (Papaïliou et al., 2012b).

### 6.3 Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση των γεγονότων, τα οποία επελέγησαν από τη βάση των μειώσεων Forbush για το χρονικό διάστημα 1967 – 2006 και τα οποία σχετίζονται με δυτικές πηγές ( $50^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < 70^\circ$ ) και γεωμαγνητικές καταιγίδες ( $Kp_{\max} \geq 5$ ). Τα γεγονότα αυτά μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλης έντασης ή τόσο σαφώς εκφρασμένα στις μεταβολές των κοσμικών ακτίνων κοντά στη Γη σε σχέση με αυτά που σχετίζονται με ανατολικές ή κεντρικές πηγές, αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανισοτροπία πριν το κρουστικό κύμα.

Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κυριότερες παράμετροι, διαπλανητικές και γεωμαγνητικές, που αφορούν στα υπό εξέταση γεγονότα. Τα πλάτη των μειώσεων αυτής της κατηγορίας κυμάνθηκαν σε χαμηλές τιμές (από 0.6% έως 3.9%), εκτός από τις περιπτώσεις των γεγονότων της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000, 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005 και 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005 (7.7%, 9% και 6.4% αντίστοιχα). Η μέγιστη τιμή της ανισοτροπίας, για την πλειοψηφία των γεγονότων, δεν ξεπέρασε το ~3%, εκτός από τις περιπτώσεις της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000 και 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005 για τις οποίες είχε τιμή 3.49% και 5.26%, αντίστοιχα. Επίσης, ο γεωμαγνητικός δείκτης Dst δεν ξεπέρασε τα -51nT (12<sup>ης</sup> Αυγούστου 1985), ενώ οι χαμηλότερες τιμές του σημειώθηκαν για τις μειώσεις της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000 (-127nT), 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005 (-216nT) και 6<sup>ης</sup> Απριλίου 2000 (-288nT). Όσον αφορά στην ένταση

του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου οι μέγιστες τιμές (52.2nT και 950 km s<sup>-1</sup>) καταγράφηκαν για τα γεγονότα της 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005 και 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005 αντίστοιχα.

Η πλειοψηφία των γεγονότων αυτής της κατηγορίας εξελίχθησαν σε ήρεμο υπόβαθρο. Για παράδειγμα, για τη μείωση της 10<sup>ης</sup> Μαΐου 1978 αν και καταγράφηκε ένα GLE την 7<sup>η</sup> Μαΐου και επίσης μία μικρή μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (~0.4%) την 8<sup>η</sup> Μαΐου και το γεγονός εξελίχθηκε κατά τη διάρκεια επαναφοράς του GLE, το συγκεκριμένο γεγονός είναι ένα καλό παράδειγμα προειδοποιητικού σήματος. Περαιτέρω, για τη μείωση της 28<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1980 παρατηρήθηκαν γεωμαγνητικές διαταραχές την 27<sup>η</sup> Ιανουαρίου, οι οποίες σχετίζονται με ένα άλλο SSC που καταγράφηκε την 25<sup>η</sup> Ιανουαρίου στις 11:09 UT, αλλά μέχρι τη συγκεκριμένη μείωση αυτές οι διαταραχές είχαν ήδη ολοκληρωθεί. Ως αποτέλεσμα η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε σε ήρεμες συνθήκες. Σε ήρεμες συνθήκες (ήρεμο γεωμαγνητικό υπόβαθρο και χωρίς έντονες μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας) εξελίχθησαν και οι μειώσεις της 30<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1980, 23<sup>ης</sup> Ιουλίου 1981, 12<sup>ης</sup> Αυγούστου 1985, 19<sup>ης</sup> Μαρτίου 1989, 29<sup>ης</sup> Μαΐου 1998, 6<sup>ης</sup> Απριλίου 2000 και 4<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003.

Από το σύνολο των 25 μειώσεων Forbush που μελετήθηκαν, οι 15 (60%) βρέθηκαν να είναι ικανοποιητικά παραδείγματα προειδοποιητικών σημάτων (10 Μαΐου 1978, 28 Ιανουαρίου 1980, 30 Οκτωβρίου 1980, 23 Ιουλίου 1981, 4 Οκτωβρίου 1983, 12 Αυγούστου 1985, 19 Μαρτίου 1989, 26 Μαΐου 1990, 27 Ιουνίου 1992, 29 Μαΐου 1998, 6 Απριλίου 2000, 28 Οκτωβρίου 2000, 4 Νοεμβρίου 2003, 21 Ιανουαρίου 2005, 24 Αυγούστου 2005) γι' αυτό και παρουσιάζονται με κριτήριο τη συμπεριφορά τους στα διαγράμματα κατανομής ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου της κοσμικής ακτινοβολίας (Parrillou et al., 2013).

### 6.3.1 Ανάλυση γεγονότων

Ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή κάποιων γεγονότων αυτής της ομάδας.



Σχ. 6.23 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 4<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1983.

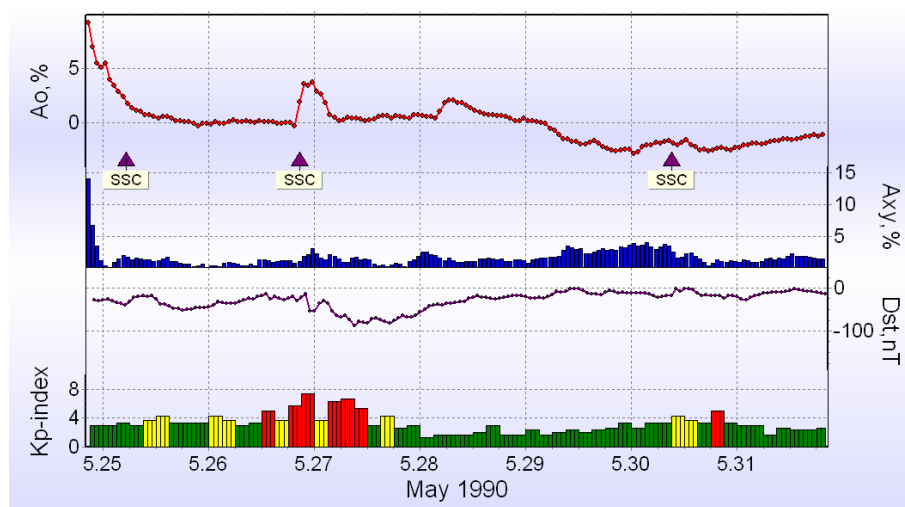
### 1) Μείωση Forbush 4<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1983

Το SSC σημειώθηκε την 4<sup>η</sup> Οκτωβρίου 1983 στις 5:41 UT (Σχ. 6.23, άνω διάγραμμα). Η ηλιακή έκλαμψη (S18W53), που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη μείωση, ήταν τάξης M1.1, της ενεργού περιοχής 4324 και σημειώθηκε την 2<sup>η</sup> Οκτωβρίου στις 6:12 UT. Αν και τις ημέρες πριν το υπό εξέταση γεγονός παρατηρείται γεωμαγνητική δραστηριότητα με άγνωστη πηγή, αυτή δεν επηρεάζει το γεγονός γιατί έχει ολοκληρωθεί πριν την έναρξη αυτού. Γι' αυτό και μπορεί να ειπωθεί ότι το γεγονός εξελίσσεται κάτω από ήρεμες συνθήκες. Κατά τη διάρκεια αυτής της μείωσης η μέγιστη ένταση του IMF και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 23.6nT και 533 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.23, άνω διάγραμμα). Η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 1.1% και η μέγιστη ανισοτροπία 1.91% (Σχ. 6.23, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν μέτριας έντασης ( $Kp_{max} = 6.7$  και  $Dst_{min} = -71nT$ ), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.23 (κάτω διάγραμμα).



## 2) Μείωση Forbush 26<sup>ης</sup> Μαΐου 1990

Το SSC σημειώθηκε την 26<sup>η</sup> Μαΐου 1990 στις 20:37 UT. Η ηλιακή έκλαμψη (N33W55) που σχετίζεται με αυτό το γεγονός σημειώθηκε την 23<sup>η</sup> Μαΐου στις 4:01 UT, ανήκει στην ενεργό περιοχή 6063 και είναι τάξης M8.7. Αν και δεν είναι εμφανής κάποια μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας αυτό είναι ένα καλό παράδειγμα προειδοποιητικού σήματος. Πριν το καταγεγραμμένο SSC σημειώθηκαν μία μικρή αύξηση και μία μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτές οι μεταβολές πρέπει να είναι προειδοποιητικά σήματα μείωσης Forbush, η οποία, όμως, δεν είναι ορατή στις καταγραφές των μετρητών νετρονίων λόγω του GLE της 26<sup>ης</sup> Μαΐου. Παρ' όλα αυτά, οι κοσμικές ακτίνες την αισθάνονται στο διαπλανητικό μέσο. Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 0.8% και η μέγιστη ανισοτροπία είχε τιμή 2.61% (Σχ. 6.24, άνω διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν έντονη, αφού οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή 7.3 και -87nT αντίστοιχα (Σχ. 6.24, κάτω διάγραμμα).



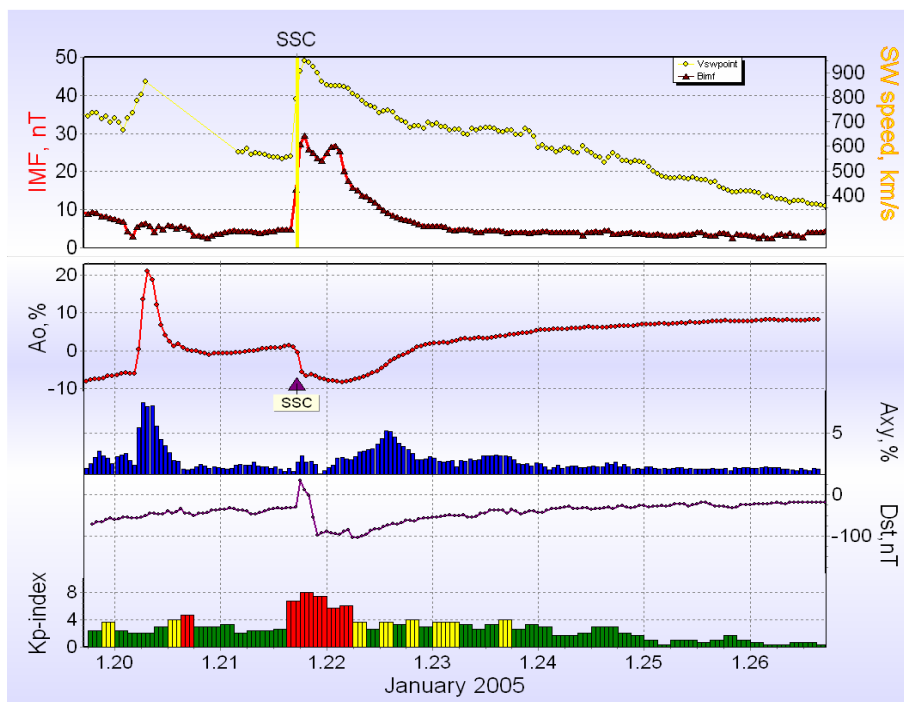
Σχ. 6.24 Μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (άνω διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Μαΐου 1990.

## 3) Μείωση Forbush 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000

Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.1.1).

#### 4) Μείωση Forbush 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005

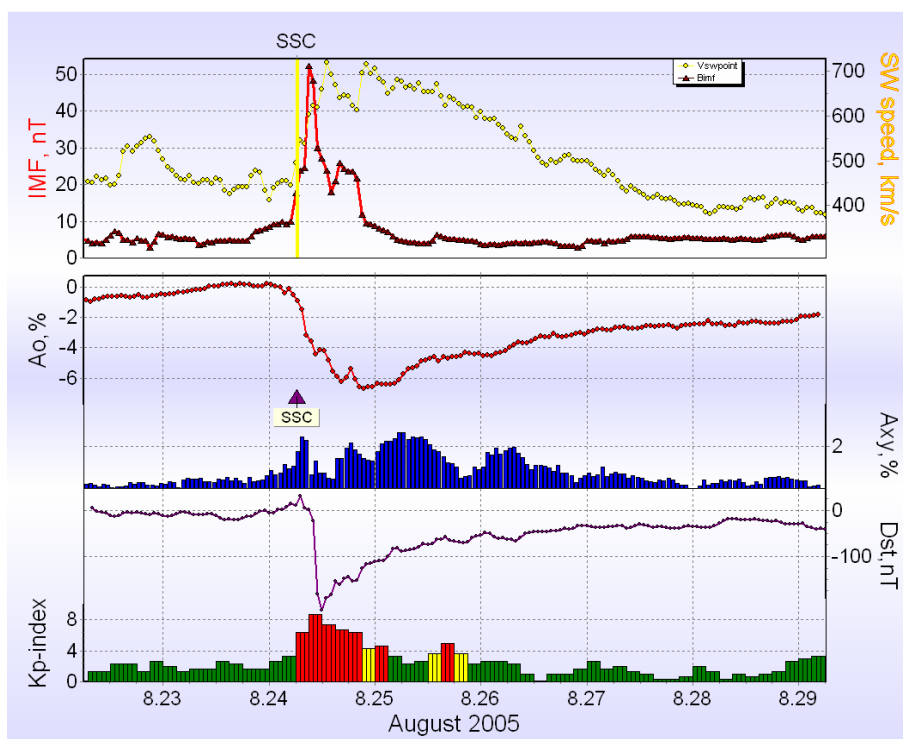
Το SSC για το συγκεκριμένο γεγονός σημειώθηκε την 21<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2005 στις 17:11 UT. Η έκλαμψη που σχετίζεται με αυτό το γεγονός (N14W61) ήταν της ενεργού περιοχής του Ήλιου 10720 και τάξης X7.1 και καταγράφηκε την 20<sup>η</sup> Ιανουαρίου στις 18:36 UT. Αν και πριν αυτό το γεγονός, την 20<sup>η</sup> Ιανουαρίου, έχει καταγραφεί GLE πρόκειται για ένα καλό παράδειγμα. Επίσης, το γεωμαγνητικό υπόβαθρο πριν από το γεγονός ήταν ήρεμο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.25 (άνω διάγραμμα) η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε την τιμή 29.5nT και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου την τιμή 950 km s<sup>-1</sup>. Η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 9% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 5.26% (Σχ. 6.25, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.25 (κάτω διάγραμμα) ήταν ισχυρή ( $Kp_{max} = 8$  και  $Dst_{min} = -105nT$ ).



Σχ. 6.25 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005.

### 5) Μείωση Forbush 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005

Σε αυτή την περίπτωση το SSC καταγράφηκε την 24<sup>η</sup> Αυγούστου 2005 στις 6:13 UT. Με αυτό το γεγονός σχετίζεται μία ηλιακή έκλαμψη (S11W54), τάξης M2.6 στην ενεργό περιοχή 10798, που σημειώθηκε την 22<sup>α</sup> Αυγούστου στις 00:44 UT και η στεμματική οπή 183. Πρόκειται για ένα καλό παράδειγμα, αφού δεν σημειώθηκαν γεωμαγνητικές διαταραχές και το υπόβαθρο στις κοσμικές ακτίνες ήταν, επίσης, ήσυχο. Οι μέγιστες τιμές για την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν 52.2nT και 720 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.26, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 6.4% και η μέγιστη ανισοτροπία είχε τιμή 2.66% (Σχ. 6.26, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν ισχυρής έντασης, αφού οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή 8.7 και -216nT αντίστοιχα (Σχ. 6.26, κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.26 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $K_p$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005.

### 6.3.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων

Στο σχήμα 6.27 που ακολουθεί παρουσιάζεται η χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα της 10<sup>ης</sup> Μαΐου 1978 (Σχ. 6.27, άνω διάγραμμα), 28<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1980 (Σχ. 6.27, μεσαίο διάγραμμα) και 30<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1980 (Σχ. 6.27, κάτω διάγραμμα). Όπως φαίνεται μία μικρή προ-αύξηση άνω των 180° προηγείται 4 – 6 ώρες των γεγονότων.

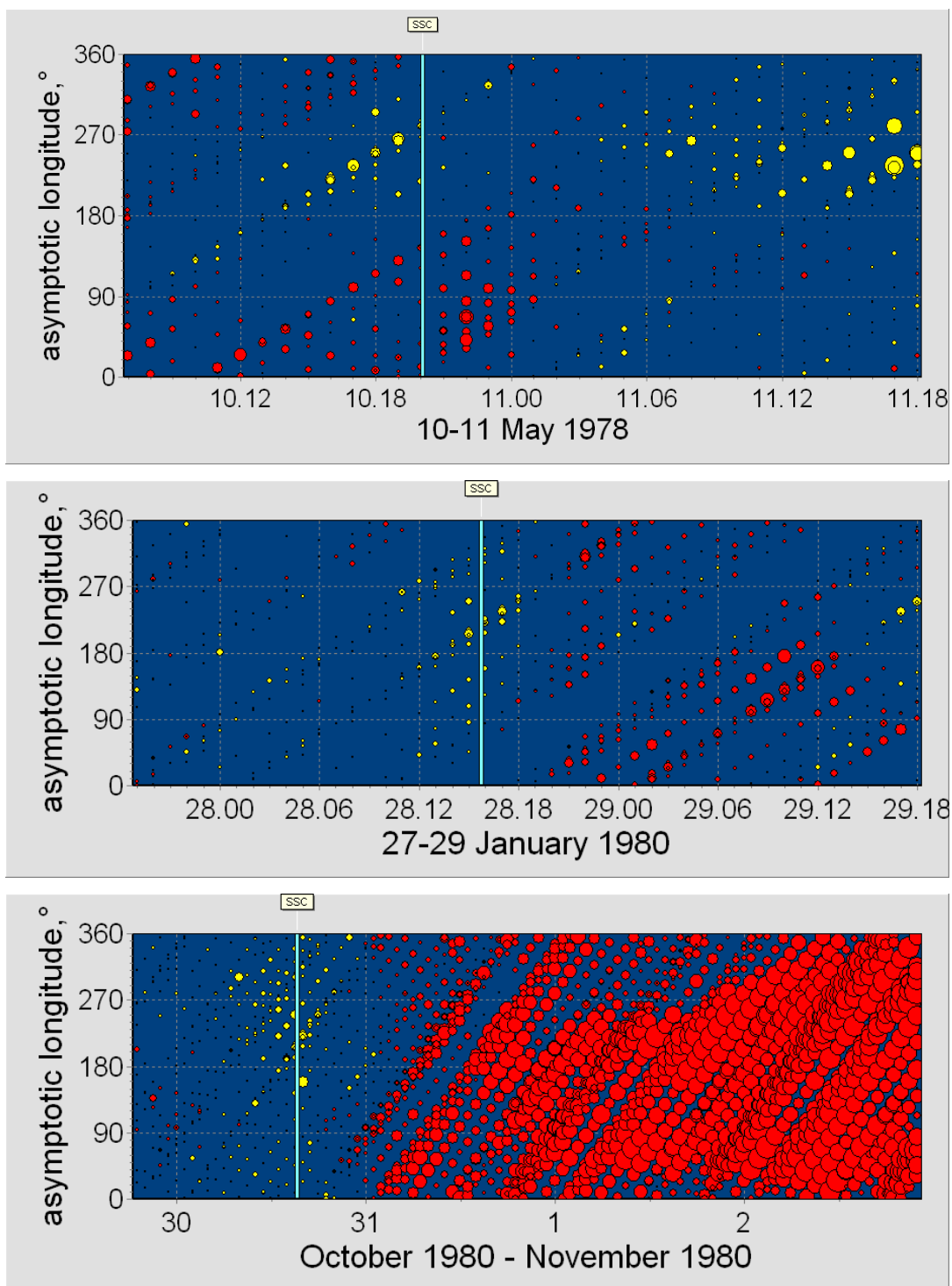
Η προ-μείωση για τη μείωση της 23<sup>ης</sup> Ιουλίου 1981 (Σχ. 6.28, άνω διάγραμμα) διαρκεί περίπου 7 ώρες μέχρι το κύριο γεγονός, ενώ για το γεγονός της 4<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1983 (Σχ. 6.28, μεσαίο διάγραμμα) τόσο η προ-μείωση κάτω των 180° όσο και η προ-αύξηση άνω των 180° διαρκούν περίπου 5 ώρες (Papaïliou et al., 2013). Σχετικά με το γεγονός της 12<sup>ης</sup> Αυγούστου 1985 (Σχ. 6.28, κάτω διάγραμμα), αν και πρόκειται για μείωση μικρού πλάτους, η προ-αύξηση είναι εμφανής ~10 ώρες πριν το γεγονός.

Για το γεγονός της 19<sup>ης</sup> Μαρτίου 1989 η προ-αύξηση είναι εμφανής περίπου 6 ώρες πριν από τη μείωση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.29 (άνω διάγραμμα), ενώ ξεκάθαρη προ-μείωση γύρω από τις 90° και διάρκειας περίπου 6 ωρών μέχρι το SSC (Σχ. 6.29, μεσαίο διάγραμμα) παρατηρείται για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Μαΐου 1990 (Papaïliou et al., 2013). Μία μικρή αλλά εμφανής προ-αύξηση περίπου 8 – 10 ώρες πριν το SSC παρατηρείται και για τη μείωση της 27<sup>ης</sup> Ιουνίου 1992 (Σχ. 6.29, κάτω διάγραμμα).

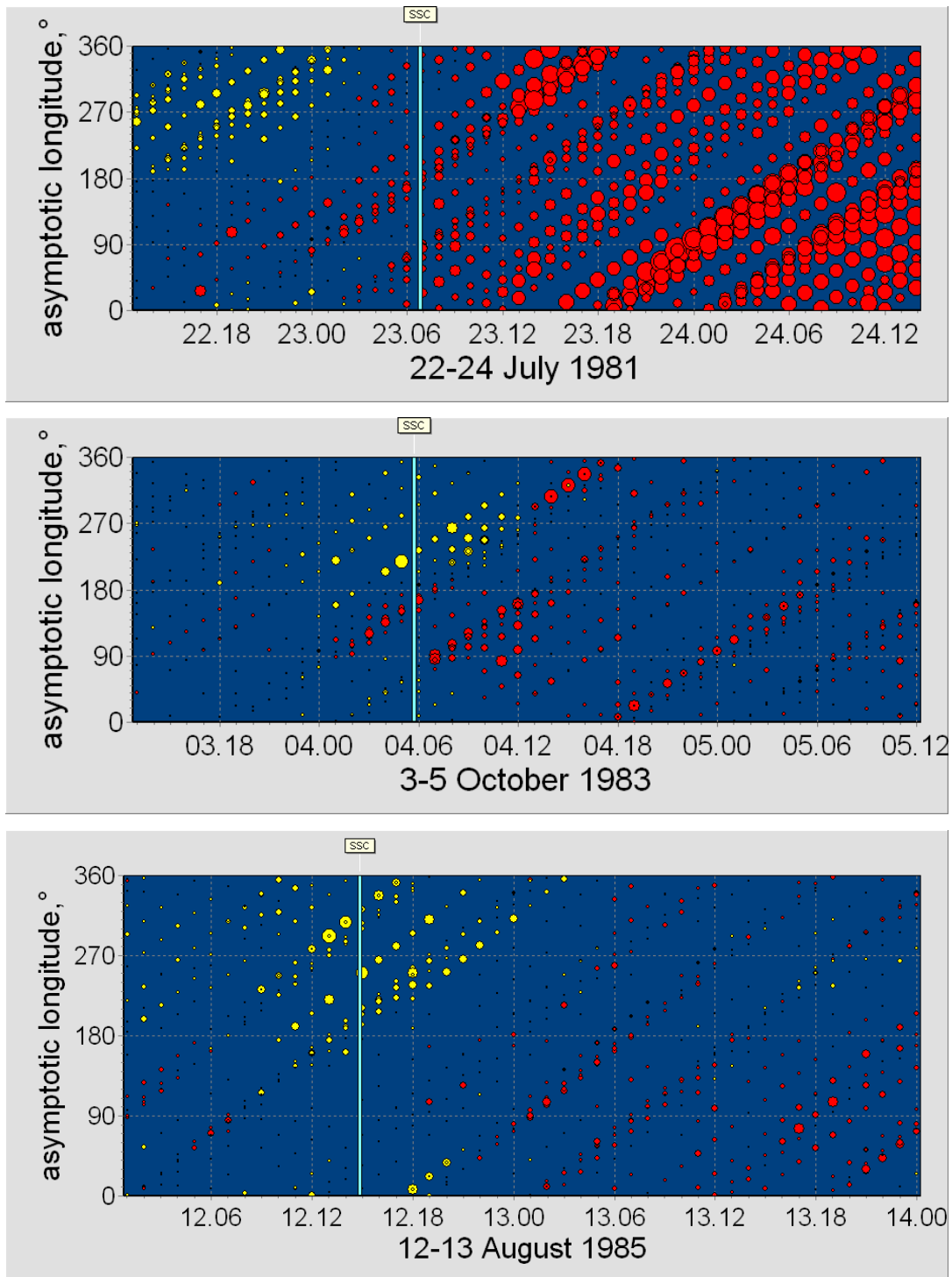
Στο σχήμα 6.30 (άνω διάγραμμα) απεικονίζεται το γεγονός της 29<sup>ης</sup> Μαΐου 1998, όπου το προειδοποιητικό σήμα υπάρχει αλλά είναι πολύ μικρής έντασης. Αντίθετα, για τη μείωση της 6<sup>ης</sup> Απριλίου 2000 (Σχ. 6.30, μεσαίο διάγραμμα) η προ-αύξηση είναι έντονη και εμφανής περίπου 6 ώρες πριν το κύριο γεγονός, ενώ για τη μείωση της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000 (Σχ. 6.3, κάτω διάγραμμα) η προ-μείωση διαρκεί περίπου 24 ώρες μέχρι το SSC (βλ. Κεφ. VI § 6.2.1.2).

Για τα γεγονότα της 4<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003 (Σχ. 6.30, κάτω διάγραμμα), 21<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2005 (Σχ. 6.31, άνω διάγραμμα) και 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005 (Σχ. 6.31, κάτω διάγραμμα) οι προ-αυξήσεις είναι αρκετά έντονες και διαρκούν περίπου 6 ώρες

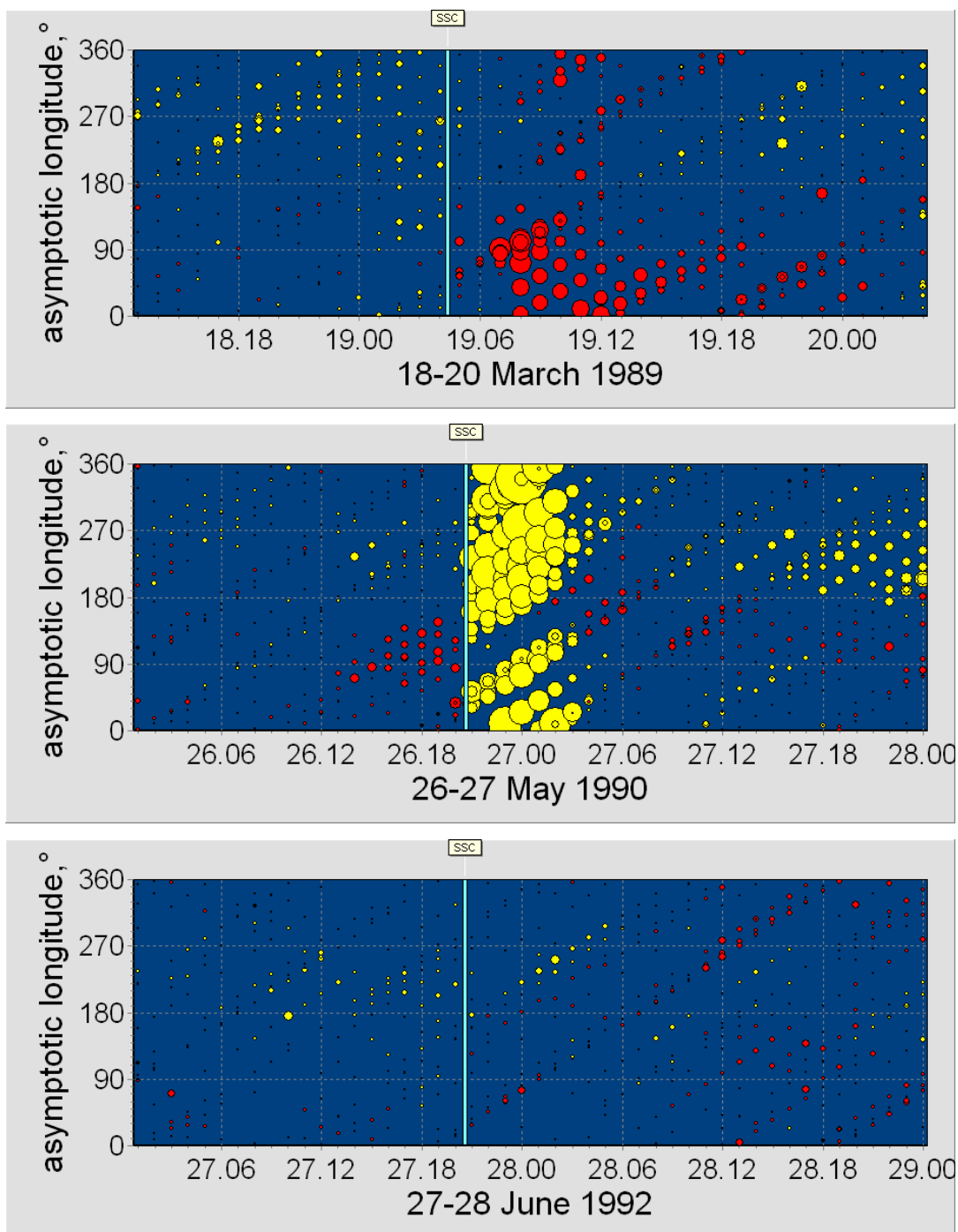
μέχρι την έναρξη του γεγονότος, ενώ για το γεγονός της 24<sup>ης</sup> Αυγούστου 2005 σημειώνεται και προ-μείωση (Papailiou et al., 2013).



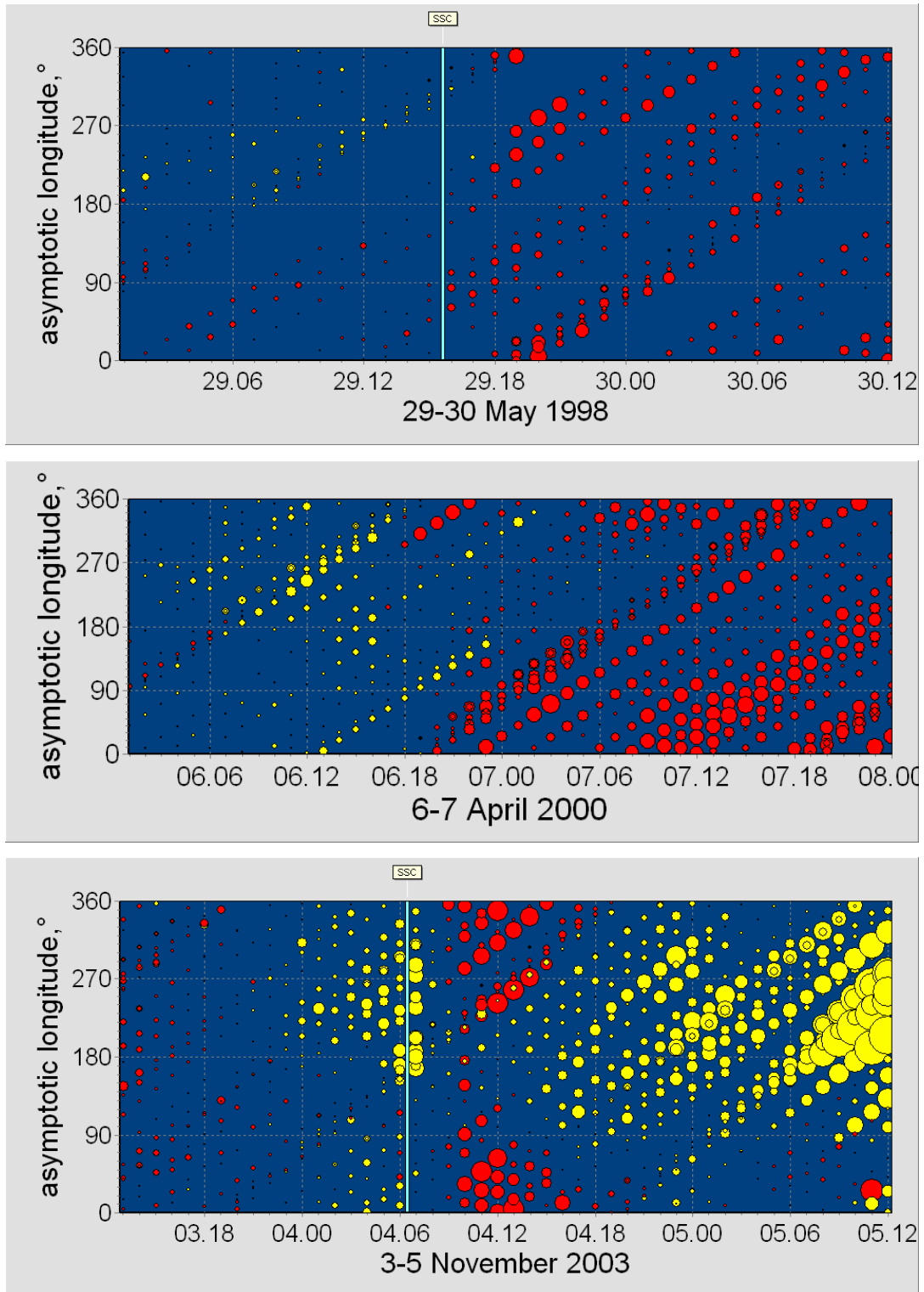
Σχ. 6.27 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 10 Μαΐου 1978 (άνω διάγραμμα), 28 Ιανουαρίου 1980 (μεσαίο διάγραμμα) και 30 Οκτωβρίου 1980 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.28 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 23 Ιουλίου 1981 (άνω διάγραμμα), 4 Οκτωβρίου 1983 (κάτω διάγραμμα) και 12 Αυγούστου 1985 (κάτω διάγραμμα).

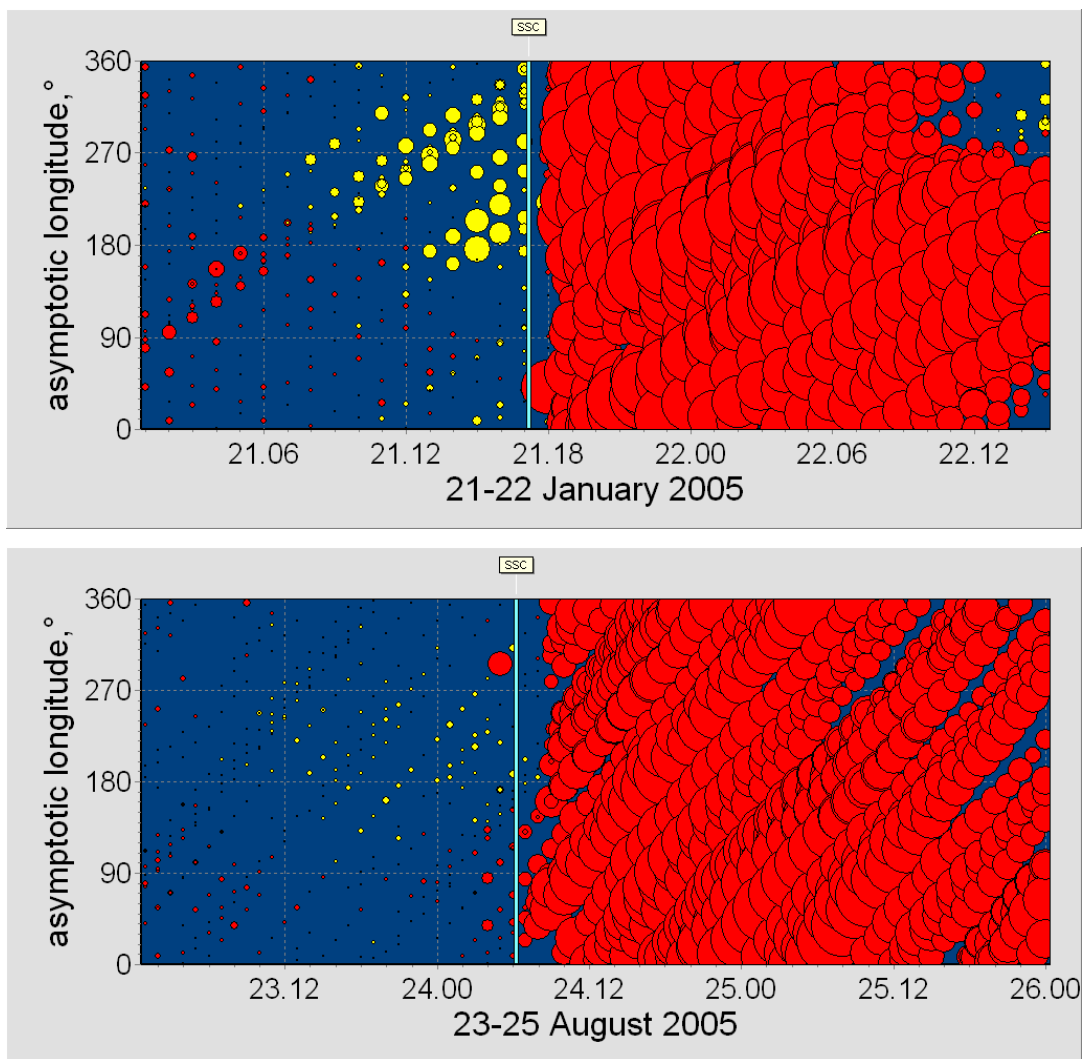


Σχ. 6.29 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 19 Μαρτίου 1989 (άνω διάγραμμα), 26 Μαΐου 1990 (μεσαίο διάγραμμα) και 27 Ιουνίου 1992 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.30 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 29 Μαΐου 1998 (άνω διάγραμμα), 6 Απριλίου 2000 (μεσαίο διάγραμμα), και 4 Νοεμβρίου 2003 (κάτω διάγραμμα).





Σχ. 6.31 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 21 Ιανουαρίου 2005 (άνω διάγραμμα) και 24 Αυγούστου 2005 (κάτω διάγραμμα).

#### 6.4 Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση γεγονότων, τα οποία επελέγησαν από τη βάση των μειώσεων Forbush για το χρονικό διάστημα 1967 – 2006. Πρόκειται για μεγάλες μειώσεις Forbush (πλάτος > 3.99%), οι οποίες έλαβαν χώρα σε ήρεμο υπόβαθρο (επελέγησαν 48 και 18 ώρες διαφορά από το προηγούμενο και το επόμενο γεγονός αντίστοιχα). Ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος των ηλιακών πηγών τα γεγονότα αυτά ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες, δυτικές πηγές ( $20^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < 60^\circ$ ), ανατολικές πηγές ( $-60^\circ < \text{ηλιογραφικό μήκος} < -20^\circ$ ) και κεντρικές

πηγές ( $-21^{\circ} < \text{ηλιογραφικό μήκος} < 21^{\circ}$ ). Συνολικά εξετάστηκαν 67 γεγονότα (14 γεγονότα με δυτικές πηγές, 22 γεγονότα με ανατολικές πηγές και 31 γεγονότα με κεντρικές πηγές).

Στη συνέχεια δίνονται τα γεγονότα τα οποία, μετά από λεπτομερή ανάλυση και προσεκτική μελέτη, έδωσαν προειδοποιητικά σήματα:

- ❖ Η ομάδα των δυτικών πηγών περιλαμβάνει 11 γεγονότα (12 Ιουνίου 1982, 7 Μαΐου 1989, 30 Μαρτίου 1990, 9 Σεπτεμβρίου 1992, 28 Απριλίου 2001, 17 Αυγούστου 2001, 24 Νοεμβρίου 2001, 20 Μαρτίου 2002, 26 Ιουλίου 2004, 9 Ιουλίου 2006, 14 Δεκεμβρίου 2006).
- ❖ Η ομάδα των ανατολικών πηγών περιλαμβάνει 15 γεγονότα (13 Ιουλίου 1978, 6 Ιουνίου 1979, 1 Μαρτίου 1981, 24 Απριλίου 1982, 9 Ιουνίου 1982, 13 Ιουλίου 1982, 27 Δεκεμβρίου 1982, 11 Απριλίου 1989, 4 Σεπτεμβρίου 1989, 31 Μαΐου 1991, 26 Φεβρουαρίου 1992, 27 Αυγούστου 2001, 25 Σεπτεμβρίου 2001, 7 Σεπτεμβρίου 2002, 13 Σεπτεμβρίου 2004).
- ❖ Η ομάδα των κεντρικών πηγών περιλαμβάνει 20 γεγονότα (3 Ιανουαρίου 1978, 10 Απριλίου 1978, 25 Ιουνίου 1978, 25 Ιουλίου 1980, 6 Αυγούστου 1982, 4 Φεβρουαρίου 1983, 4 Ιανουαρίου 1988, 13 Ιανουαρίου 1988, 30 Ιουνίου 1991, 8 Ιουλίου 1991, 8 Ιουνίου 2000, 11 Οκτωβρίου 2001, 6 Νοεμβρίου 2001, 17 Απριλίου 2002, 18 Αυγούστου 2002, 29 Μαΐου 2003, 20 Νοεμβρίου 2003, 22 Ιανουαρίου 2004, 5 Δεκεμβρίου 2004, 15 Μαΐου 2005).

#### 6.4.1 Δυτικές πηγές

Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κυριότερες παράμετροι, διαπλανητικές και γεωμαγνητικές, που αφορούν στα υπό εξέταση γεγονότα. Δίνονται μεταξύ άλλων η τάξη της ηλιακής έκλαμψης, όπως επίσης οι ηλιογραφικές συντεταγμένες αυτής καθώς και η ημερομηνία και η ώρα καταγραφής της. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μειώσεις με πλάτος που κυμαίνεται από 4% (μείωση 7<sup>ης</sup> Μαΐου 1989) έως 13.5% (μείωση 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2004), ενώ η τιμή της ανισοτροπίας ξεπερνά το 4% για τρία γεγονότα αυτής της ομάδας (9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992, 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001 και 14<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2006). Σημειώνεται έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα για την πλειοψηφία των γεγονότων, με τον δείκτη Kp να παίρνει τιμές άνω του 6 (εκτός δύο περιπτώσεων) και μέγιστη τιμή 8.7 (μείωση της 26<sup>ης</sup> Ιουλίου

2004), ενώ χαμηλές είναι και οι τιμές του δείκτη Dst. Για παράδειγμα για πέντε μειώσεις αυτής της κατηγορίας (9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992, 14<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2006, 30<sup>ης</sup> Μαρτίου 1990, 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2004 και 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001) ο δείκτης Dst παίρνει τις τιμές -135nT, -146nT, -187nT, -197nT και -221nT. Επίσης, υψηλές τιμές κατεγράφησαν τόσο για την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (η μέγιστη τιμή ήταν 56.9nT και σημειώθηκε για τη μείωση της 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001) όσο και για την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου, η οποία ξεπέρασε τα 1000 km s<sup>-1</sup> σε δύο περιπτώσεις. Συγκριμένα παρατηρήθηκε για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2004 (1027 km s<sup>-1</sup>) και της 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001 (1040 km s<sup>-1</sup>).

#### **6.4.1.1 Ανάλυση γεγονότων ομάδας δυτικών πηγών**

Στη συνέχεια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή μερικών γεγονότων της ομάδας των δυτικών πηγών.

##### **1) Μείωση Forbush 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992**

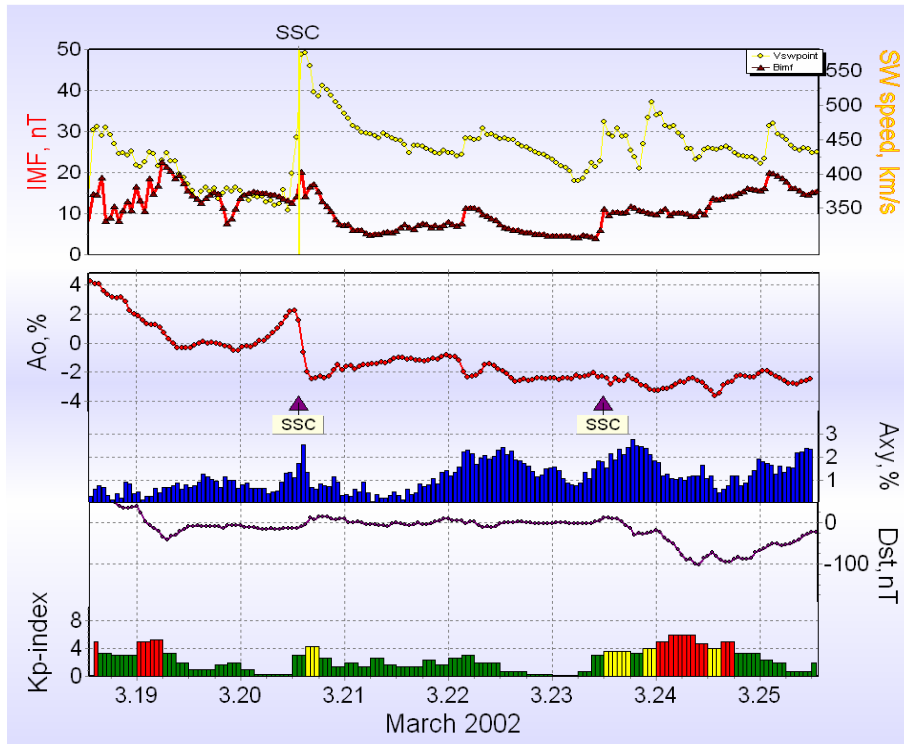
Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).

##### **2) Μείωση Forbush 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001**

Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.1.1).

##### **3) Μείωση Forbush 20<sup>ης</sup> Μαρτίου 2002**

Το SSC για το συγκεκριμένο γεγονός σημειώθηκε την 20<sup>η</sup> Μαρτίου 2002 στις 13:28 UT. Η ηλιακή έκλαμψη, τάξης M1.0, η οποία σημειώθηκε την 18<sup>η</sup> Μαρτίου 2002 στις 2:16 UT και είχε συντεταγμένες S08W31 σχετίζεται με αυτό το γεγονός. Κατά τη διάρκειά του η μέγιστη ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν 20.1nT και η μέγιστη ταχύτητα του ηλιακού ανέμου είχε τιμή 576 km s<sup>-1</sup> (Σχ. 6.32, άνω διάγραμμα). Η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 4.4% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 2.55% (Σχ. 6.32, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική δραστηριότητα ήταν χαμηλή (η μέγιστη τιμή για τον δείκτη Kp και η ελάχιστη για τον δείκτη Dst ήταν 4.3 και -14nT αντίστοιχα), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.32 (κάτω διάγραμμα).



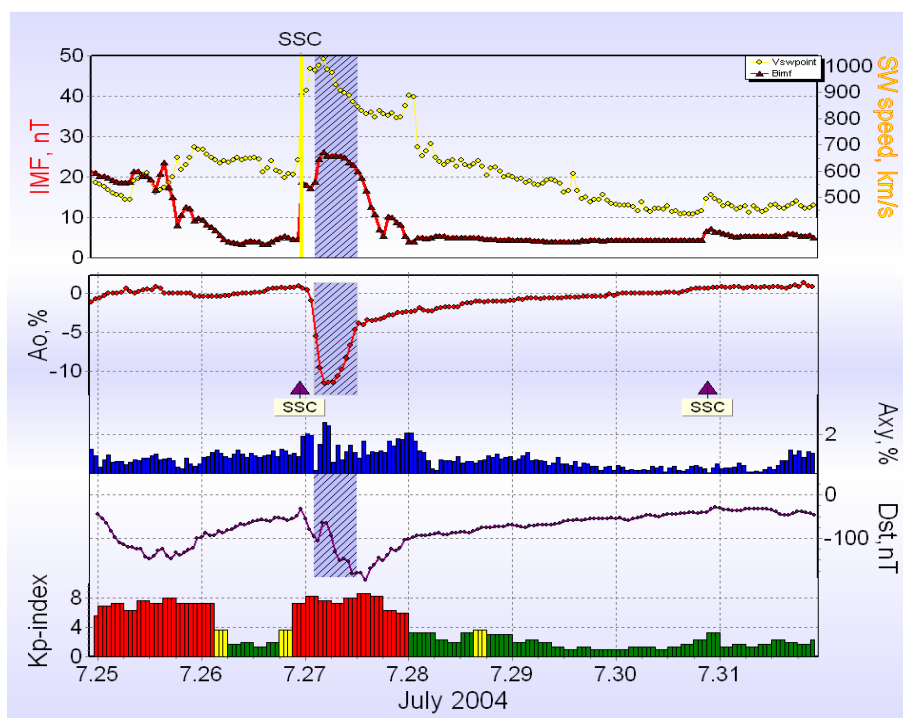
Σχ. 6.32 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $K_p$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 20<sup>ης</sup> Μαρτίου 2002.

#### 4) Μείωση Forbush 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2004

Στις 22:49 UT την 26<sup>η</sup> Ιουλίου 2004 σημειώθηκε το SSC για το υπό εξέταση γεγονός. Η σχετιζόμενη ηλιακή έκλαμψη (N08W33) σημειώθηκε την 25<sup>η</sup> Ιουλίου 2004 στις 14:19 UT και ήταν τάξης M1.1. Η μέγιστη τιμή της έντασης του IMF ήταν 26.1nT και η μέγιστη ταχύτητα ηλιακού ανέμου 1027 km s<sup>-1</sup> (Σχ. 6.33, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 13.5% και η μέγιστη ανισοτροπία 2.6% (Σχ. 6.33, μεσαίο διάγραμμα). Σχετικά με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα αυτή ήταν ισχυρή (η μέγιστη και ελάχιστη τιμή των δεικτών  $K_p$  και  $Dst$  ήταν 8.7 και -197nT αντίστοιχα), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.33 (κάτω διάγραμμα).

#### 5) Μείωση Forbush 9<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006

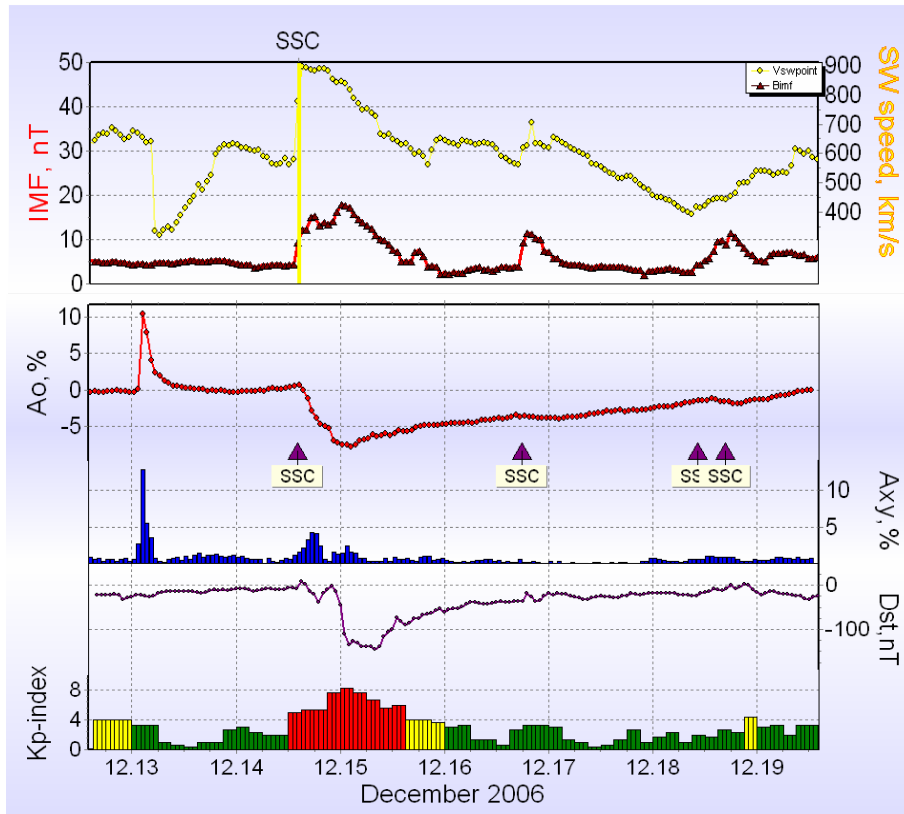
Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).



Σχ. 6.33 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $K_p$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2004.

## 6) Μείωση Forbush 14<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2006

Το SSC, για το υπό εξέταση γεγονός, σημειώθηκε την 14<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2006 στις 14:14 UT. Με αυτό το γεγονός σχετίζεται η ηλιακή έκλαμψη, τάξης X3.4, η οποία καταγράφηκε την 13<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2006 στις 2:14 UT και είχε συντεταγμένες S06W23. Οι μέγιστες τιμές της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 17.9nT και 896 km s<sup>-1</sup> (Σχ. 6.34, άνω διάγραμμα), ενώ η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 8.6% και 4.35% αντίστοιχα (Σχ. 6.34, μεσαίο διάγραμμα). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες  $K_p$  και  $Dst$  είχαν τιμές 8.3 και -146nT αντίστοιχα (Σχ. 6.34, κάτω διάγραμμα).

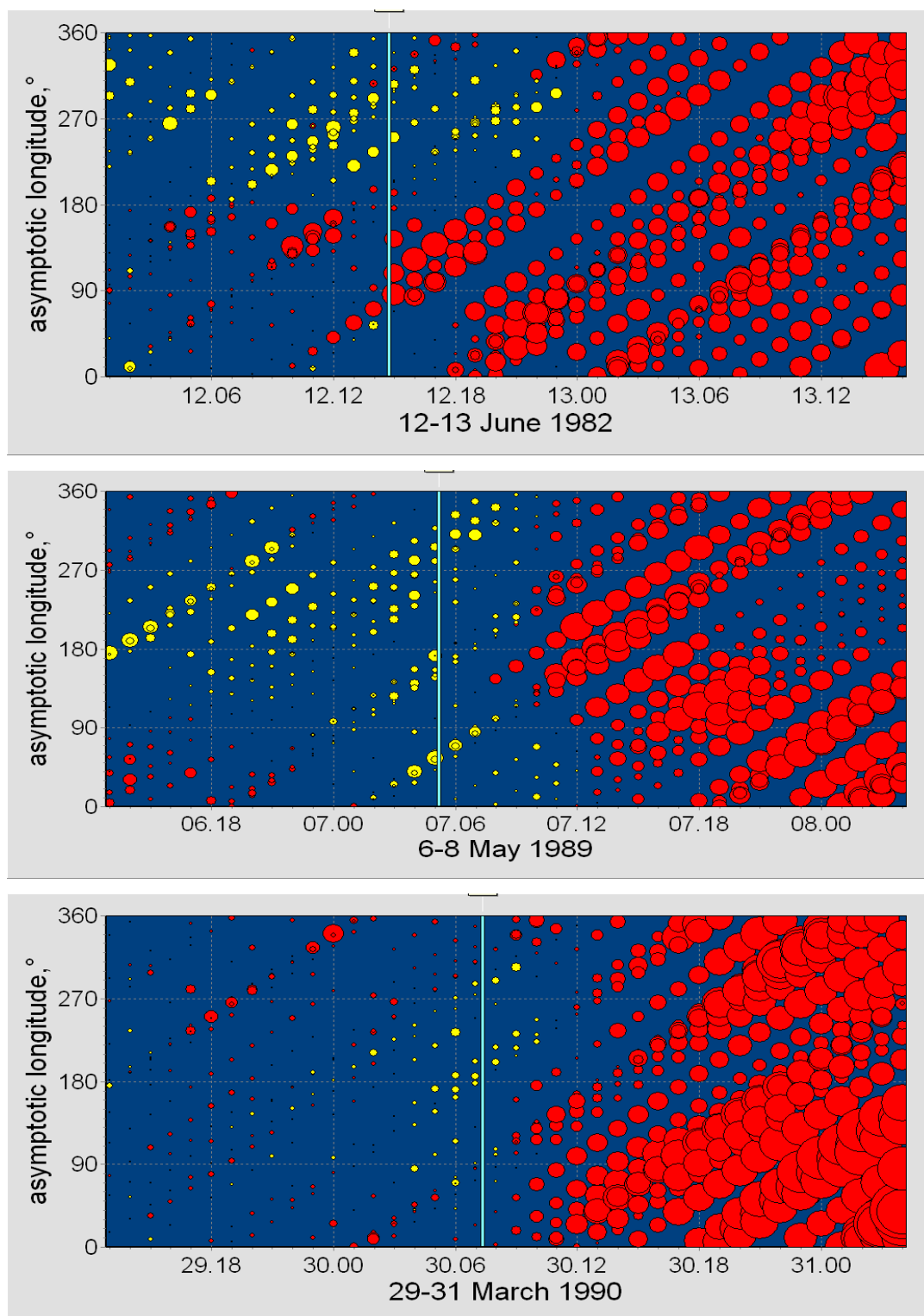


Σχ. 6.34 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 14<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2006.

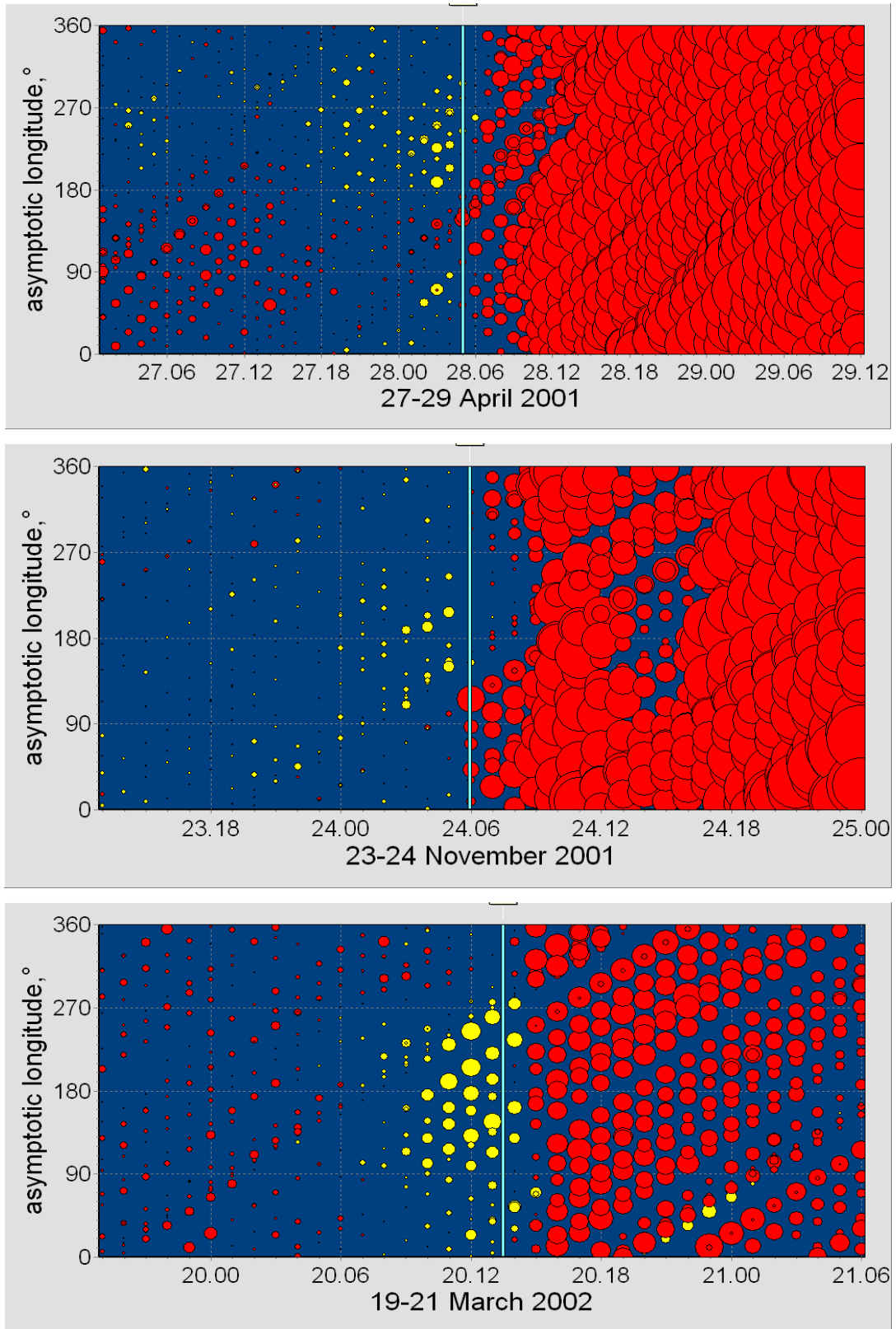
#### 6.4.1.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων ομάδας δυτικών πηγών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους για τα παραδείγματα των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας αυτής της ομάδας.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.35 (άνω διάγραμμα) για το γεγονός της 12<sup>ης</sup> Ιουνίου 1982 το προειδοποιητικό σήμα είναι μία προ-μείωση στη ζώνη μηκών 120° – 180° και μία προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° διάρκειας περίπου 5 ωρών. Για τις μειώσεις της 7<sup>ης</sup> Μαΐου 1989 (Σχ. 6.35, μεσαίο διάγραμμα) και της 30<sup>ης</sup> Μαρτίου 1990 (Σχ. 6.35, κάτω διάγραμμα) η προ-αύξηση, στην περιοχή μηκών γύρω από τις 180°, ξεκινά περίπου 6 και 3 ώρες αντίστοιχα πριν το SSC.

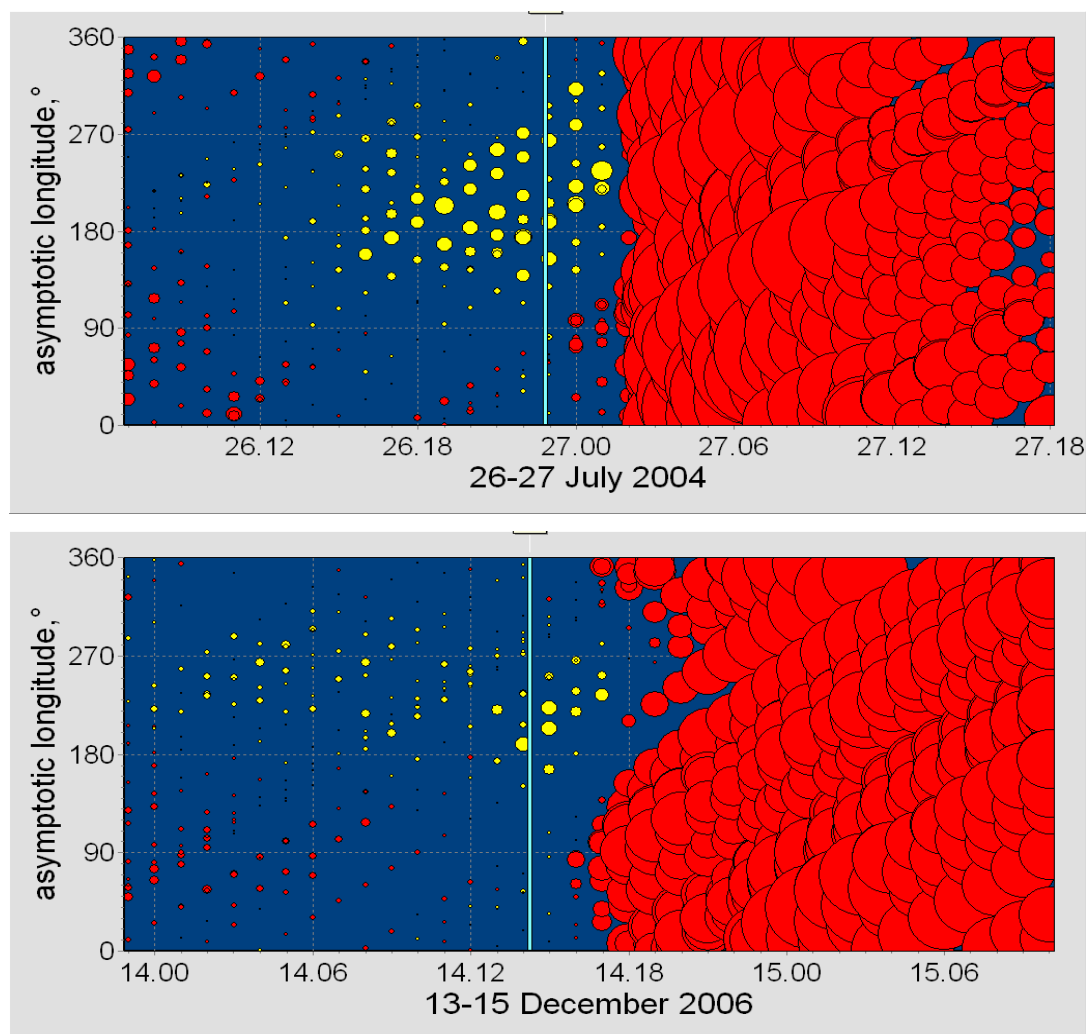


Σχ. 6.35 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 12 Ιουνίου 1982 (άνω διάγραμμα), 7 Μαΐου 1989 (μεσαίο διάγραμμα) και 30 Μαρτίου 1990 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.36 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 28 Απριλίου 2001 (άνω διάγραμμα), 24 Νοεμβρίου 2001 (μεσαίο διάγραμμα) και 20 Μαρτίου 2002 (κάτω διάγραμμα).





Σχ. 6.37 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 26 Ιουλίου 2004 (άνω διάγραμμα) και 14 Δεκεμβρίου 2006 (κάτω διάγραμμα).

Η χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τη μείωση Forbush της 9<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1992 (Σχ. 6.16, άνω διάγραμμα) έχει παρουσιαστεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.2). Το προειδοποιητικό σήμα για τη μείωση της 28<sup>ης</sup> Απριλίου 2001, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.36 (άνω διάγραμμα), είναι μία προ-μείωση από 90° έως 180° και μία προ-αύξηση στην περιοχή 180° – 270° διάρκειας ~5 ωρών. Το γεγονός της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001 (Σχ. 6.4, άνω διάγραμμα), ως προς το προειδοποιητικό σήμα, έχει αναλυθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.1.2). Προ-αυξήσεις, επίσης, παρατηρούνται και στις περιπτώσεις των γεγονότων 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001 (Σχ. 6.36, μεσαίο διάγραμμα) και 20<sup>ης</sup> Μαρτίου 2002 (Σχ. 6.36,

κάτω διάγραμμα). Εντοπίζονται στη ζώνη μηκών  $110^{\circ} - 200^{\circ}$  και  $0^{\circ} - 270^{\circ}$  και διαρκούν περίπου 6 ώρες.

Το σχήμα 6.37 περιγράφει τα γεγονότα της 26<sup>ης</sup> Ιουλίου 2004 (άνω διάγραμμα) και της 14<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2006 (κάτω διάγραμμα). Και στις δύο περιπτώσεις σημειώνεται μία προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις  $180^{\circ}$  και διάρκειας περίπου 6 και 3 ωρών αντίστοιχα. Το γεγονός της 9<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006 (Σχ. 6.17, κάτω διάγραμμα) έχει περιγραφεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.2).

#### 6.4.2 Ανατολικές πηγές

Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κυριότερες παράμετροι διαπλανητικές και γεωμαγνητικές που αφορούν στα υπό εξέταση γεγονότα. Μεταξύ άλλων, δίνονται οι τιμές των γεωμαγνητικών δεικτών  $K_p$  και  $Dst$ , οι οποίες συνδέονται με τις μειώσεις Forbush αυτής της κατηγορίας. Όπως προκύπτει οι τιμές του δείκτη  $K_p$  κυμαίνονται από 4.3 έως 9 (μείωση 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1982), ενώ ο δείκτης  $Dst$  παίρνει από αρκετά υψηλές τιμές (-11nT για τη μείωση της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1978) έως πολύ χαμηλές, όπως για παράδειγμα -170nT, -193nT και -325nT για τις μειώσεις της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002, 26<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 1992 και 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1982 αντίστοιχα. Το τελευταίο γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1982 είχε και το μέγιστο πλάτος (19.8%), τη μέγιστη ανισοτροπία (4.71%) καθώς επίσης και τη μέγιστη ταχύτητα ηλιακού ανέμου ( $986 \text{ km s}^{-1}$ ) σε σχέση με τα υπόλοιπα της ομάδας. Για το γεγονός της 6<sup>ης</sup> Ιουνίου 1979 σημειώθηκε η μέγιστη ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου (54.4nT).

##### 6.4.2.1 Ανάλυση γεγονότων ομάδας ανατολικών πηγών

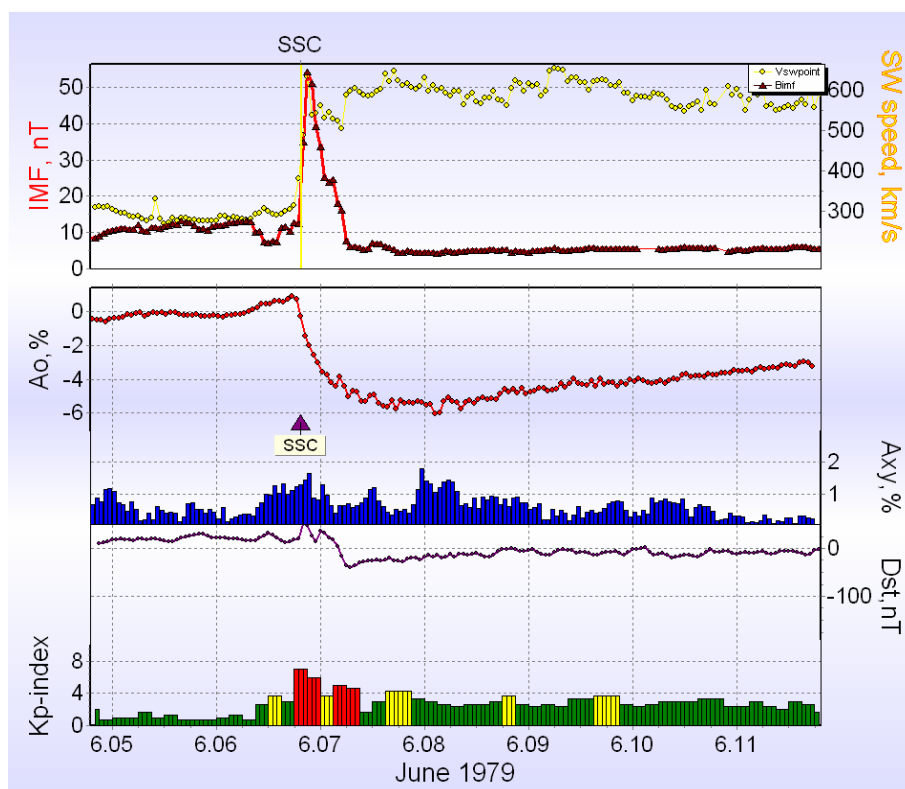
Στη συνέχεια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή μερικών γεγονότων της ομάδας των ανατολικών πηγών.

##### 1) Μείωση Forbush 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1978

Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).

## 2) Μείωση Forbush 6<sup>ης</sup> Ιουνίου 1979

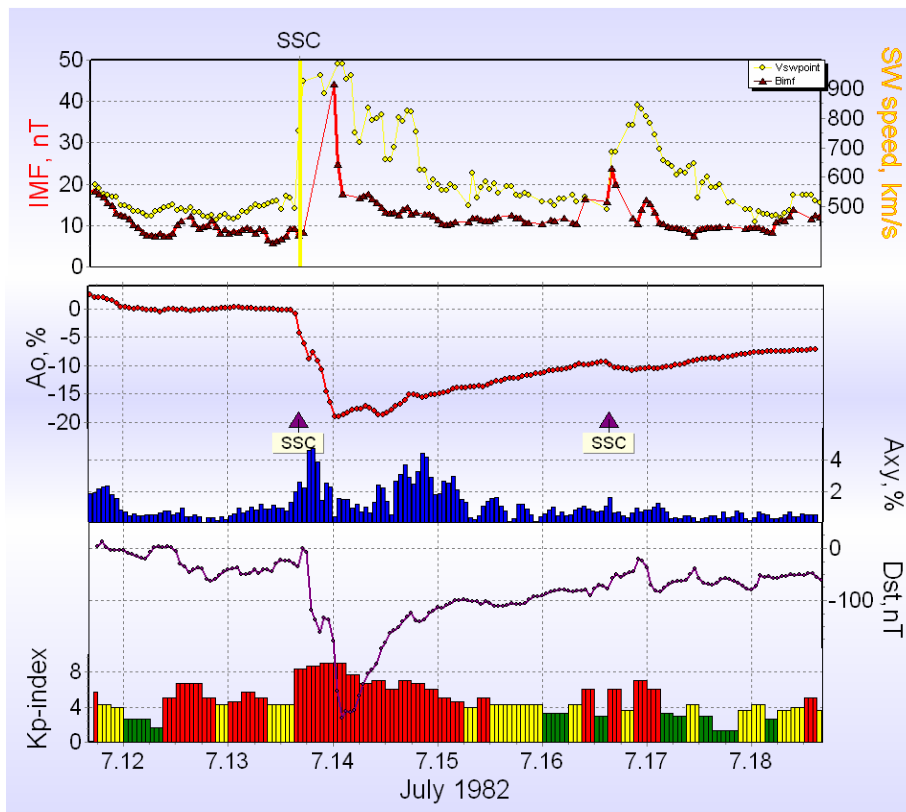
Σε αυτή την περίπτωση το SSC καταγράφηκε την 6<sup>η</sup> Ιουνίου 1979 στις 19:27 UT. Η τάξης X1.0 ηλιακή έκλαμψη με συντεταγμένες N20E34, η οποία σημειώθηκε την 4<sup>η</sup> Ιουνίου 1979 στις 3:55 UT, σχετίζεται με αυτό το γεγονός. Οι μέγιστες τιμές για την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν 54.4nT και 655 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.38, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 7% και η μέγιστη ανισοτροπία είχε τιμή 1.79% (Σχ. 6.38, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν έντονη, αφού οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα 7 και -40nT (Σχ. 6.38, κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.38 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών Dst και Kp (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 6<sup>ης</sup> Ιουνίου 1979.

### 3) Μείωση Forbush 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1982

Το SSC καταγράφηκε την 13<sup>η</sup> Ιουλίου 1982 στις 16:17 UT. Η ηλιακή έκλαμψη τάξης X7.1, η οποία καταγράφηκε την 12<sup>η</sup> Ιουλίου 1982 στις 9:16 UT και είχε συντεταγμένες N11E37, σχετίζεται με αυτό το γεγονός. Οι μέγιστες τιμές για την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου ήταν 44.3nT και 986 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.39, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 19.8% και η μέγιστη ανισοτροπία είχε τιμή 4.71% (Σχ. 6.39, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν ισχυρής έντασης, αφού οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή 9 και -325nT αντίστοιχα (Σχ. 6.39, κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.39 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1982.

#### 4) Μείωση Forbush 25<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001

Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).

#### 5) Μείωση Forbush 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002

Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).



Σχ. 6.40 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 13<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2004.

#### 6) Μείωση Forbush 13<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2004

Το SSC, για το υπό εξέταση γεγονός, σημειώθηκε την 13<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2004 στις 20:03 UT. Με αυτό το γεγονός σχετίζεται η ηλιακή έκλαμψη (N03E49) η οποία σημειώθηκε την 12<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2004 στις 00:04 UT και ήταν τάξης M4.8. Οι μέγιστες τιμές της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας

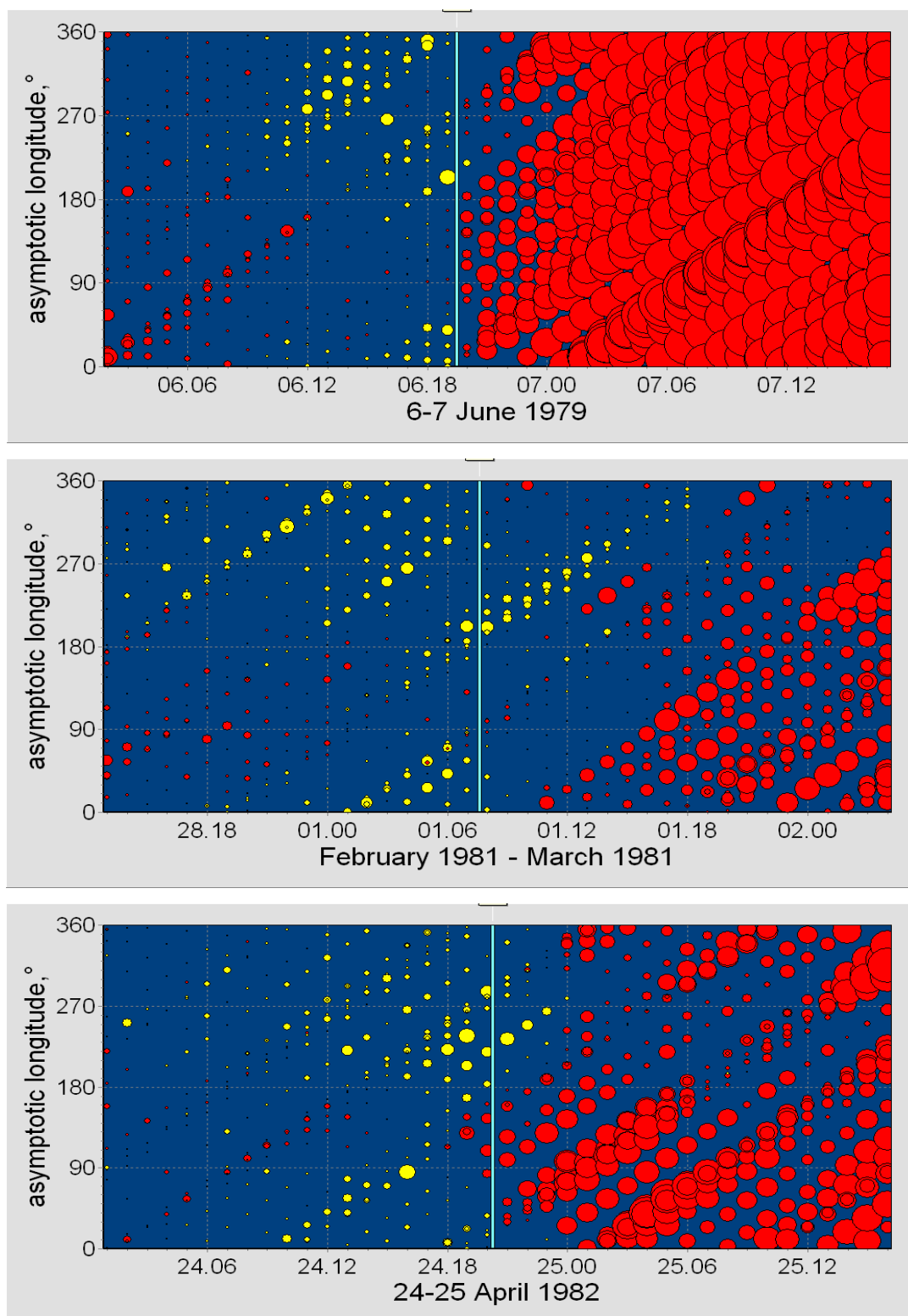
του ηλιακού ανέμου ήταν  $25.1\text{nT}$  και  $603\text{ km s}^{-1}$  (Σχ. 6.40, άνω διάγραμμα), ενώ η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 5% και 2.6% αντίστοιχα (Σχ. 6.40, μεσαίο διάγραμμα). Οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν τιμές 5.3 και  $-50\text{nT}$  αντίστοιχα (Σχ. 6.40, κάτω διάγραμμα).

#### 6.4.2.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων ομάδας ανατολικών πηγών

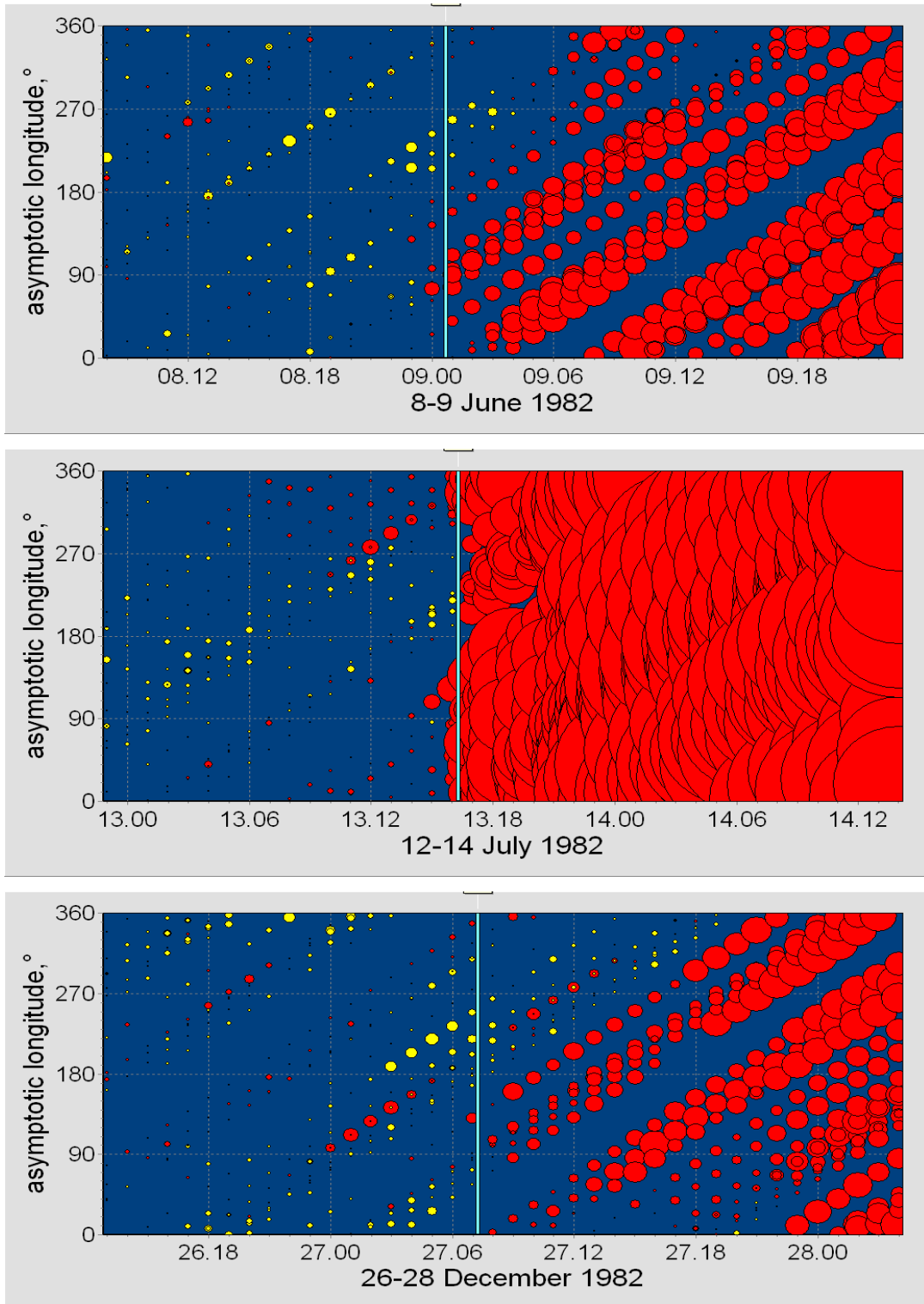
Τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας απεικονίστηκαν, επίσης, μέσω της χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, ώστε να μελετηθούν και να καθοριστούν οι προειδοποιήσεις σε κάθε γεγονός.

Για την περίπτωση της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1978 (Σχ. 6.13, κάτω διάγραμμα) το προειδοποιητικό σήμα έχει περιγραφεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.2). Στο σχήμα 6.50 δίνονται οι κατανομές ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου για τις μειώσεις της 6<sup>ης</sup> Ιουνίου 1979 (Σχ. 6.41, άνω διάγραμμα), 1<sup>ης</sup> Μαρτίου 1981 (Σχ. 6.41, μεσαίο διάγραμμα) και 24<sup>ης</sup> Απριλίου 1982 (Σχ. 6.41, κάτω διάγραμμα). Το προειδοποιητικό σήμα γι' αυτές τις περιπτώσεις ήταν μία προ-αύξηση σε μήκη άνω των  $180^\circ$  και διάρκειας περίπου 4 ωρών. Ειδικά για το τελευταίο γεγονός παρατηρείται για 2 ώρες περίπου και προ-μείωση στη ζώνη  $90^\circ - 180^\circ$ .

Στο σχήμα 6.42 (άνω διάγραμμα) παρουσιάζεται το γεγονός της 9<sup>ης</sup> Ιουνίου 1982. Το προειδοποιητικό σήμα είναι μία προ-αύξηση, η οποία ξεκινά ~3 ώρες πριν το SSC, στην περιοχή μηκών  $180^\circ - 270^\circ$ . Για τη μείωση της 13<sup>ης</sup> Ιουλίου 1982 η προ-αύξηση (για μήκη από  $180^\circ$  έως  $220^\circ$ ) ξεκινά 2 ώρες πριν το SSC, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 6.42 (μεσαίο διάγραμμα). Επίσης, σημειώνεται προ-μείωση για μήκη από  $150^\circ$  και κάτω, αλλά και άνω των  $270^\circ$ . Η συγκεκριμένη ασυνήθιστη, για ανατολικές πηγές, περίπτωση προειδοποιητικού σήματος πιθανώς να οφείλεται στη θέση, το μέγεθος και τη μορφή της διαταραχής. Επίσης, 4 ώρες περίπου πριν το γεγονός της 27<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 1982 καταγράφηκε προ-αύξηση στη ζώνη  $180^\circ - 270^\circ$  (Σχ. 6.42, κάτω διάγραμμα).

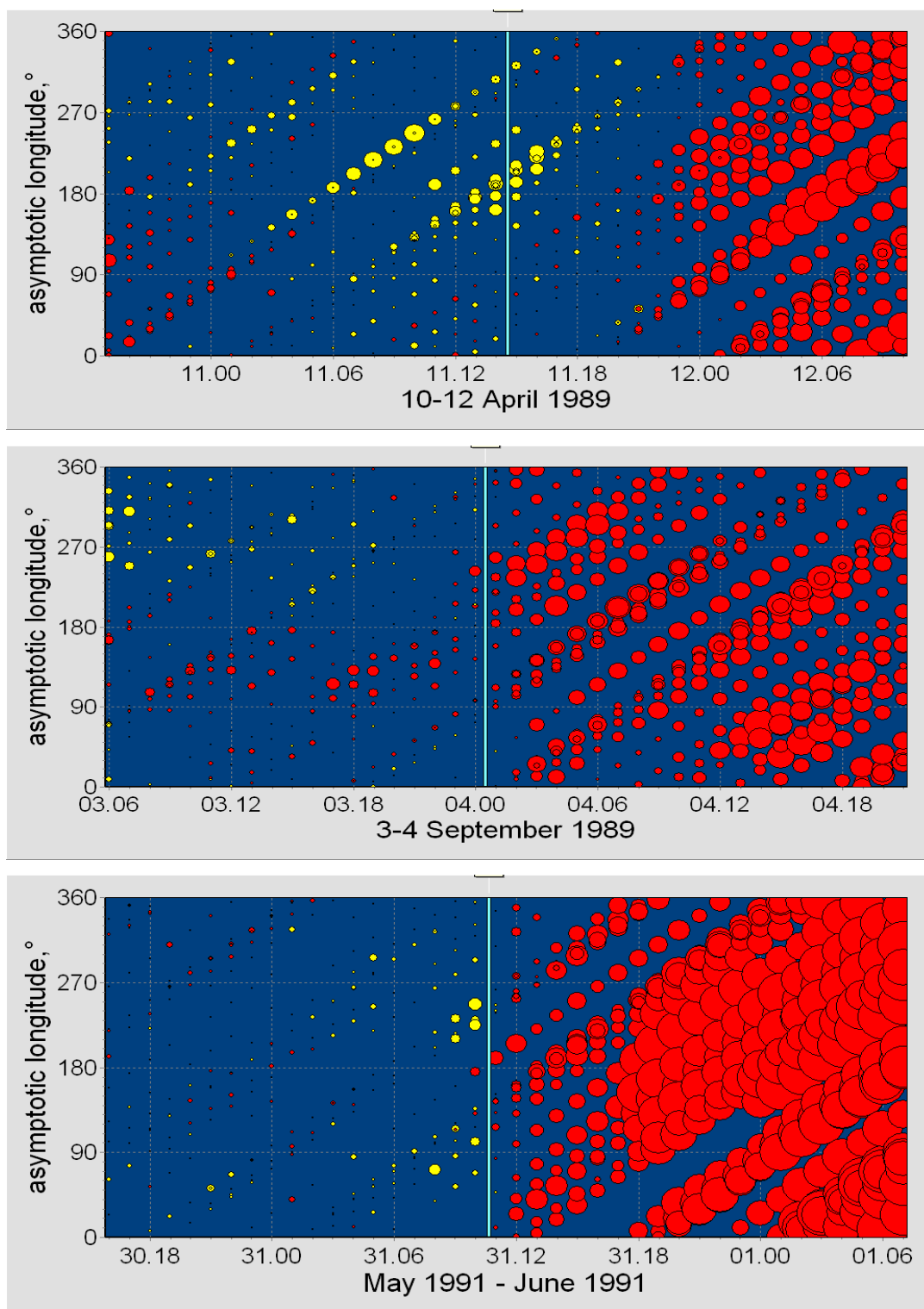


Σχ. 6.41 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 6 Ιουνίου 1979 (άνω διάγραμμα), 1 Μαρτίου 1981 (μεσαίο διάγραμμα) και 24 Απριλίου 1982 (κάτω διάγραμμα).

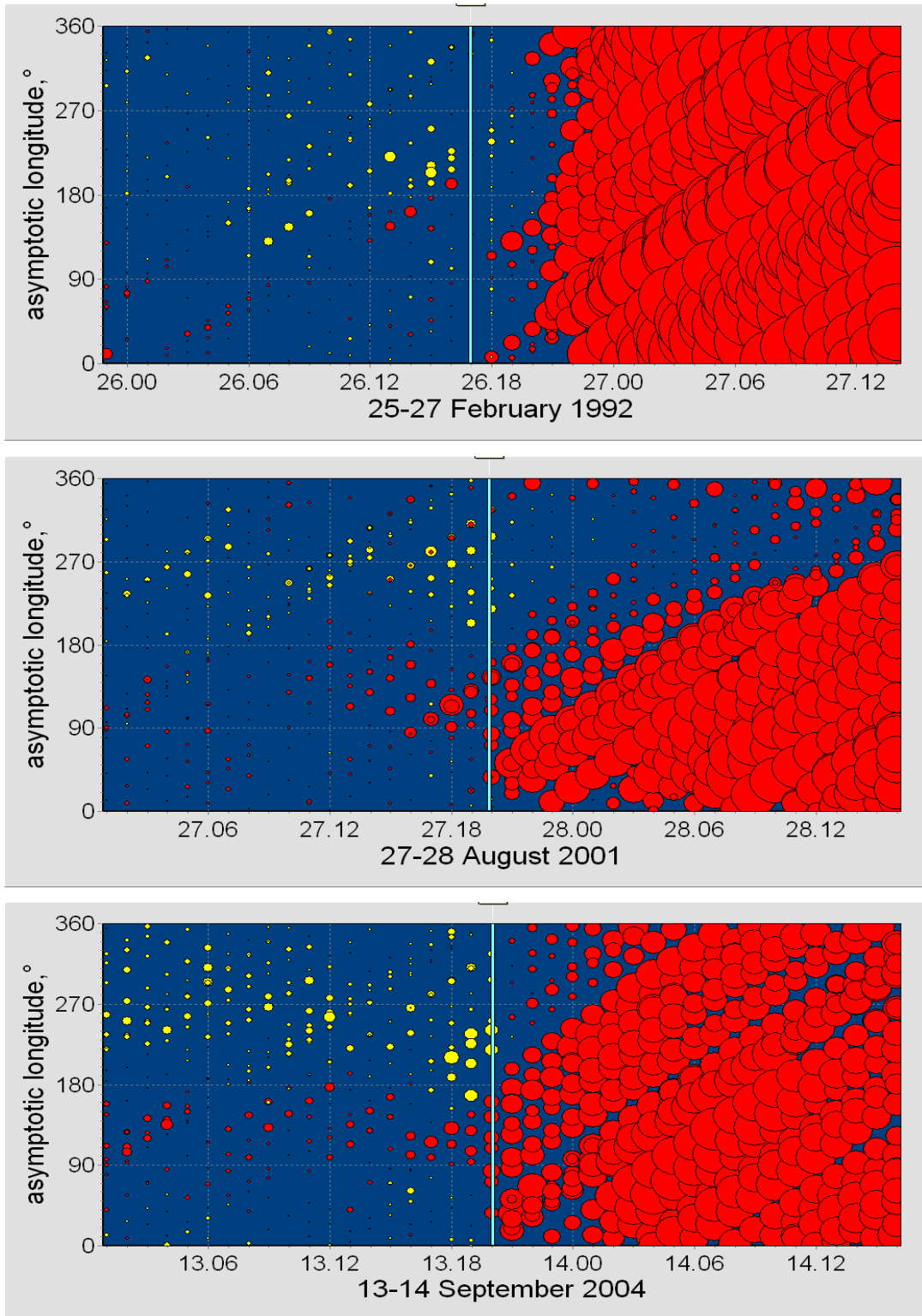


Σχ. 6.42 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 9 Ιουνίου 1982 (άνω διάγραμμα), 13 Ιουλίου 1982 (μεσαίο διάγραμμα) και 27 Δεκεμβρίου 1982 (κάτω διάγραμμα).





Σχ. 6.43 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 11 Απριλίου 1989 (άνω διάγραμμα), 4 Σεπτεμβρίου 1989 (μεσαίο διάγραμμα) και 31 Μαΐου 1991 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.44 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 26 Φεβρουαρίου 1992 (άνω διάγραμμα), 27 Αυγούστου 2001 (μεσαίο διάγραμμα) και 13 Σεπτεμβρίου 2004 (κάτω διάγραμμα).

Το προειδοποιητικό σήμα για τη μείωση της 11<sup>ης</sup> Απριλίου 1989 (Σχ. 6.43, άνω διάγραμμα) είναι μία προ-αύξηση, η οποία διαρκεί περίπου 3 ώρες μέχρι το SSC, σε μία περιοχή μήκων γύρω από τις 180°. Για την περίπτωση της 4<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1989, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.43 (μεσαίο διάγραμμα), έχει καταγραφεί προ-μείωση διάρκειας περίπου 17 ωρών για μήκη από 90° έως 180°. Προ-αύξηση σε ευρύ φάσμα μηκών σημειώνεται και για το γεγονός της 31<sup>ης</sup> Μαΐου 1991 (Σχ. 6.43, κάτω διάγραμμα) διάρκειας περίπου 3 ωρών.

Οι χρονικές κατανομές του ασυμπτωτικού μήκους για τις μειώσεις της 26<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 1992 (άνω διάγραμμα), 27<sup>ης</sup> Αυγούστου 2001 (μεσαίο διάγραμμα) και 13<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2004 (κάτω διάγραμμα) δίνονται στο σχήμα 6.44. Το προειδοποιητικό σήμα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μία προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και μία προ-μείωση σε μήκη από 90° έως 180° διάρκειας περίπου 4, 7 και 5 ωρών αντίστοιχα. Οι κατανομές ασυμπτωτικού μήκους – χρόνου των μειώσεων Forbush της 25<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001 (Σχ. 6.17, άνω διάγραμμα) και της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2002 (Σχ. 6.17, μεσαίο διάγραμμα) έχουν συμπεριληφθεί και σχολιαστεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.2).

### 6.4.3 Κεντρικές πηγές

Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κυριότερες παράμετροι διαπλανητικές και γεωμαγνητικές που αφορούν στα υπό εξέταση γεγονότα. Δίνονται, μεταξύ άλλων, οι τιμές της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου για καθένα γεγονός της παρούσας κατηγορίας, οι οποίες κυμάνθηκαν από 16nT (μείωση της 25<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980) έως 65.6nT (μείωση της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001) και 457 km s<sup>-1</sup> (μείωση της 5<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2004) έως 959 km s<sup>-1</sup> (μείωση της 15<sup>ης</sup> Μαΐου 2005). Η πλειοψηφία των γεγονότων αυτής της κατηγορίας σχετίζεται με μέτριας ή ισχυρής έντασης γεωμαγνητικές καταιγίδες με τον δείκτη Kp να έχει μέγιστη τιμή 8.7 (μείωση της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001 και 20<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003) και τον δείκτη Dst να παίρνει αρκετά χαμηλές τιμές για έναν σημαντικό αριθμό γεγονότων. Για παράδειγμα οι χαμηλότερες τιμές του Dst σημειώθηκαν για τα γεγονότα της 13<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1988 (-147nT), 22<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2004 (-149nT), 6<sup>ης</sup> Αυγούστου 1982 (-155nT), 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 1991 (-194nT), 15<sup>ης</sup> Μαΐου 2005 (-263nT), 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001 (-292nT) και 20<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003 (-472nT).

Επίσης, το πλάτος για δύο μειώσεις αυτής της κατηγορίας ξεπερνά το 10% (10.5% για τη μείωση της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 1991 και 12.4% για τη μείωση της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001), ενώ η μέγιστη ανισοτροπία έχει τιμή άνω του 4% για τέσσερα γεγονότα της κατηγορίας (4.25% για τη μείωση της 4<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1988, 4.45% για τη μείωση της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 1991, 4% για τη μείωση της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001 και 4.32% για τη μείωση της 22<sup>ας</sup> Ιανουαρίου 2004).

#### **6.4.3.1 Ανάλυση γεγονότων ομάδας κεντρικών πηγών**

Στη συνέχεια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή μερικών γεγονότων της ομάδας των κεντρικών πηγών.

##### **1) Μείωση Forbush 3<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1978**

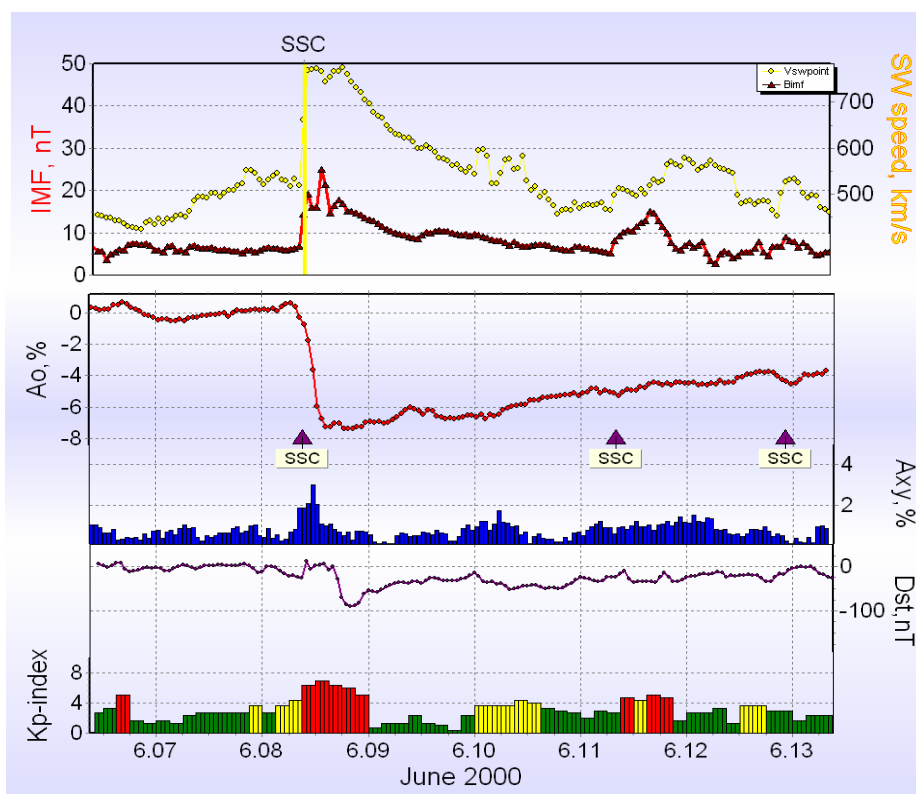
Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).

##### **2) Μείωση Forbush 25<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980**

Η ανάλυση του παρόντος γεγονότος έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.1).

##### **3) Μείωση Forbush 8<sup>ης</sup> Ιουνίου 2000**

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.57 (άνω διάγραμμα) το SSC καταγράφηκε την 8<sup>η</sup> Ιουνίου 2000 στις 9:10 UT. Η σχετική ηλιακή έκλαμψη ήταν τάξης X2.3, καταγράφηκε την 6<sup>η</sup> Ιουνίου 2000 στις 14:58 UT και είχε συντεταγμένες N20E18. Κατά τη διάρκεια αυτής της μείωσης η μέγιστη ένταση του IMF και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 24.9nT και 774 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.45, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 7.6% και η μέγιστη ανισοτροπία είχε τιμή 3% (Σχ. 6.45, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν έντονη, αφού οι γεωμαγνητικοί δείκτες Kp και Dst είχαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή 7 και -90nT αντίστοιχα (Σχ. 6.45, κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.45 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 8<sup>ης</sup> Ιουνίου 2000.

#### 4) Μείωση Forbush 11<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2001

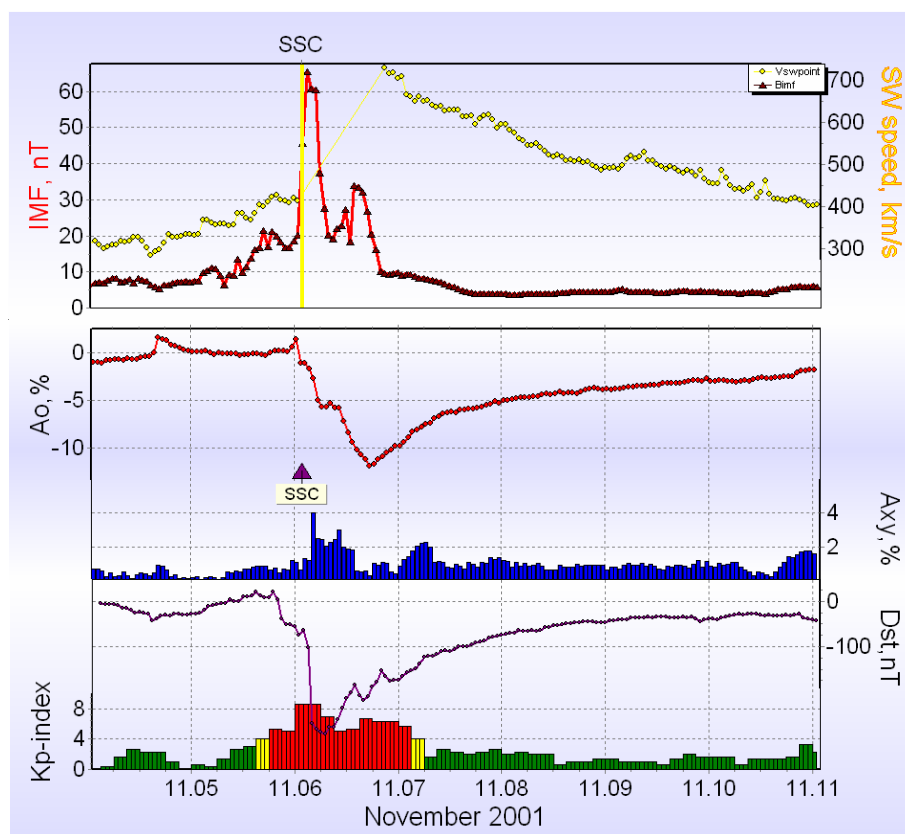
Το SSC καταγράφηκε την 11<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2001 στις 17:01 UT. Η τάξης M1.4 ηλιακή έκλαμψη, η οποία σημειώθηκε την 9<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2001 στις 10:46 UT είχε συντεταγμένες S28E08. Οι μέγιστες τιμές για την ταχύτητα του ηλιακού ανέμου και την ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου ήταν  $571 \text{ km s}^{-1}$  και  $26.5 \text{ nT}$  αντίστοιχα (Σχ. 6.46, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 7% και η μέγιστη ανισοτροπία είχε τιμή 3.81% (Σχ. 6.46, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα ήταν μέτριας έντασης, αφού οι γεωμαγνητικοί δείκτες  $Kp$  και  $Dst$  είχαν μέγιστη και ελάχιστη τιμή 6 και  $-71 \text{ nT}$  αντίστοιχα (Σχ. 6.46, κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.46 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 11<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2001.

### 5) Μείωση Forbush 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001

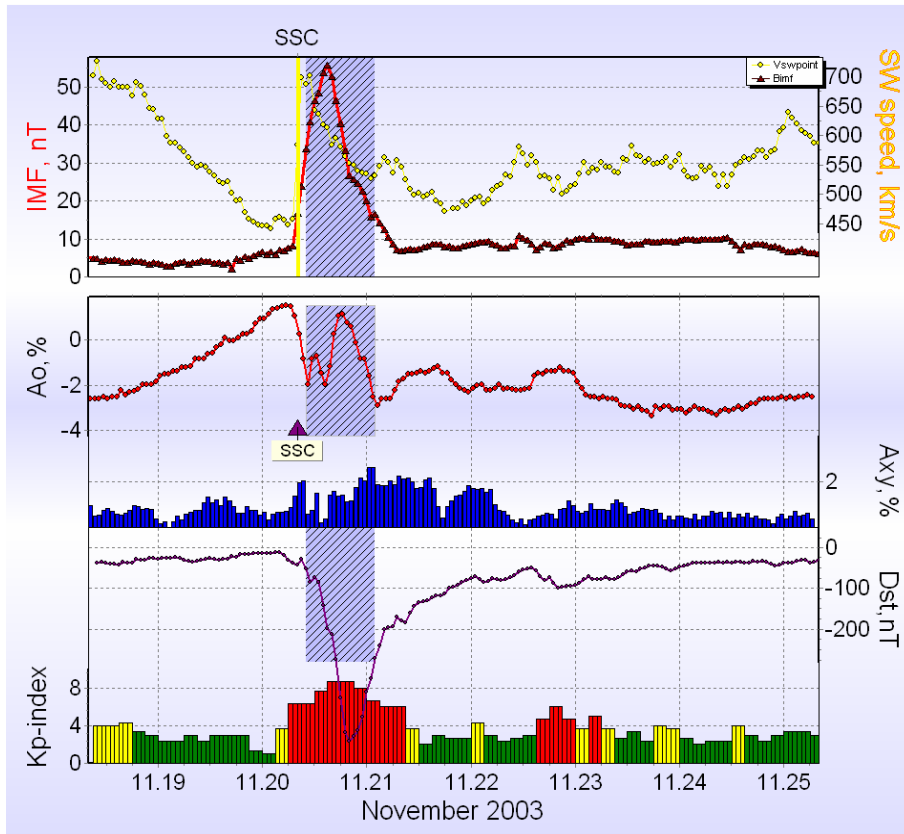
Στις 1:52 UT την 6<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2001 σημειώνεται το SSC αυτού του γεγονότος. Η ηλιακή έκλαμψη, τάξης X1.0, η οποία καταγράφηκε την 4<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2001 στις 16:03 UT, είχε συντεταγμένες N06W18. Η μέγιστη τιμή της έντασης του IMF ήταν 65.6nT και η μέγιστη ταχύτητα ηλιακού ανέμου,  $729 \text{ km s}^{-1}$  (Σχ. 6.47, άνω διάγραμμα). Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 12.4% και η μέγιστη ανισοτροπία 4% (Σχ. 6.47, μεσαίο διάγραμμα). Σχετικά με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα αυτή ήταν ισχυρή (η μέγιστη και ελάχιστη τιμή των δεικτών  $Kp$  και  $Dst$  ήταν 8.7 και -292nT αντίστοιχα), όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.47 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.47 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001.

## 6) Μείωση Forbush 20<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003

Την 20<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2003 στις 8:03 UT σημειώθηκε το SSC για το παρόν γεγονός. Η ηλιακή έκλαμψη (00E18) σημειώθηκε την 18<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2003 στις 7:23 UT και ήταν τάξης M3.2. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.48 (άνω διάγραμμα), η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου είχε την τιμή 55.8nT και η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου την τιμή 703 km s<sup>-1</sup>. Η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 4.7% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 2.65% (Σχ. 6.48, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.48 (κάτω διάγραμμα) ήταν ισχυρή ( $Kp_{max} = 8.7$  και  $Dst_{min} = -472nT$ ).

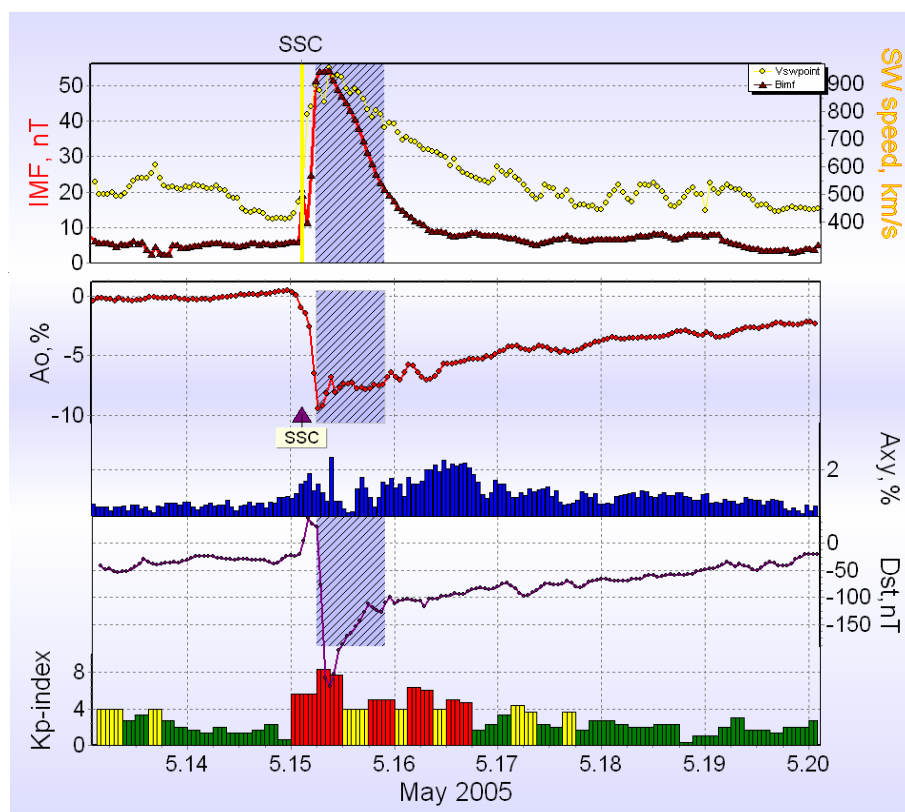


Σχ. 6.48 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 20<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003.

## 7) Μείωση Forbush 15<sup>ης</sup> Μαΐου 2005

Την 15<sup>η</sup> Μαΐου 2005 στις 2:38 UT σημειώθηκε το SSC για το παρόν γεγονός. Η ηλιακή έκλαμψη, τάξης M8.0, η οποία σημειώθηκε την 13<sup>η</sup> Μαΐου 2005 στις 16:13 UT, είχε συντεταγμένες N12E11. Κατά τη διάρκεια αυτής της μείωσης η μέγιστη ένταση του IMF και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 54.2nT και 959 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα (Σχ. 6.49, άνω διάγραμμα). Η μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου 9.5% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 2.53% (Σχ. 6.49, μεσαίο διάγραμμα). Η γεωμαγνητική καταιγίδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.49 (κάτω διάγραμμα) ήταν ισχυρή ( $Kp_{max} = 8.3$  και  $Dst_{min} = -263nT$ ).





Σχ. 6.49 Μεταβολές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου (άνω διάγραμμα), της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (μεσαίο διάγραμμα) και των δεικτών  $Dst$  και  $Kp$  (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 15<sup>ης</sup> Μαΐου 2005.

#### 6.4.3.2 Προειδοποιητικά σήματα γεγονότων ομάδας κεντρικών πηγών

Στα σχήματα 6.50, 6.51, 6.52, 6.53, 6.54 και 6.55 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας.

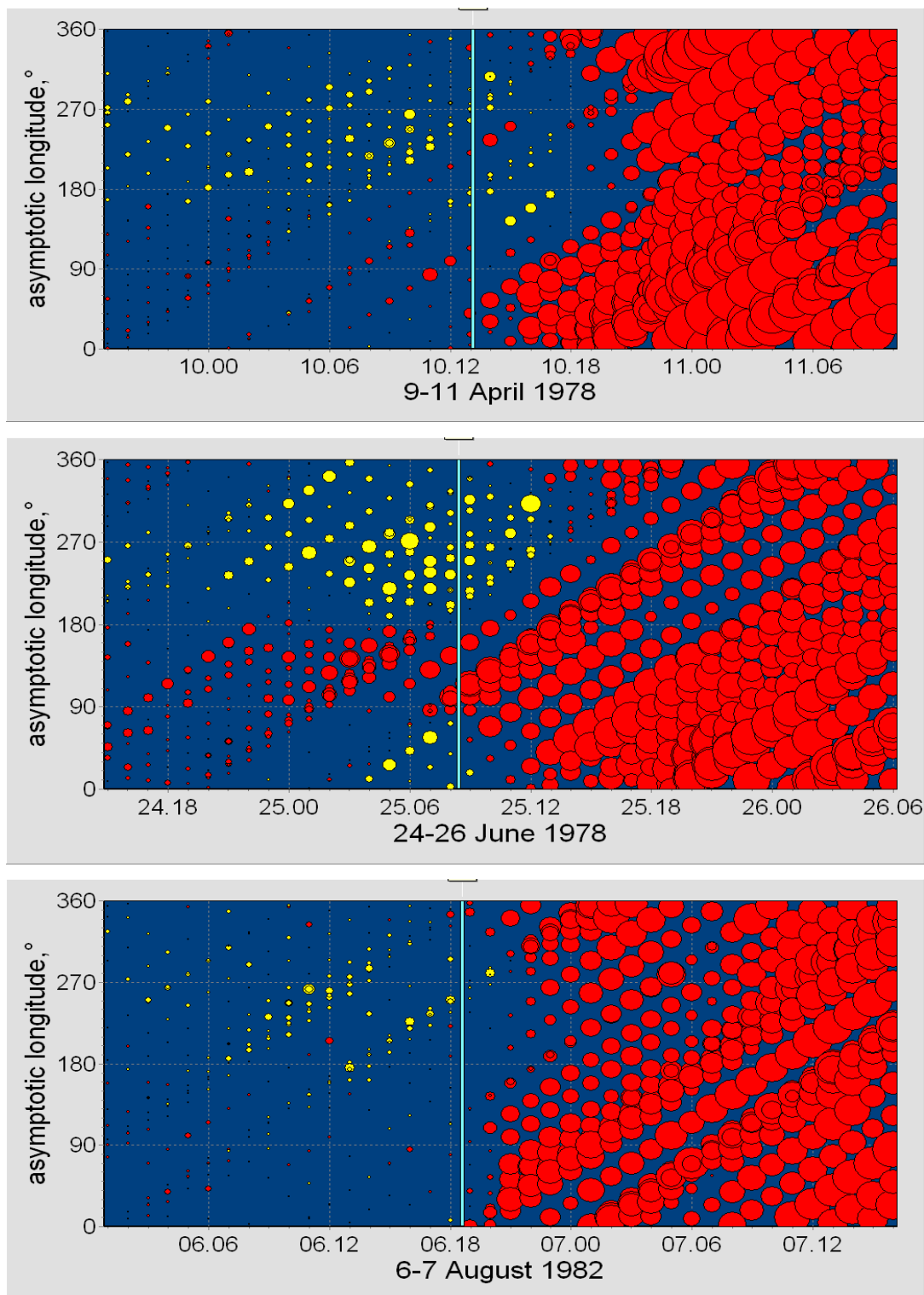
Το προειδοποιητικό σήμα για το γεγονός της 3<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1978 (Σχ. 6.13, άνω διάγραμμα) έχει συμπεριληφθεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.2). Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.50 (άνω διάγραμμα), το προειδοποιητικό σήμα για τη μείωση Forbush της 10<sup>ης</sup> Απριλίου 1978 είναι μία προ-μείωση και μία προ-αύξηση, οι οποίες εντοπίζονται στην περιοχή κάτω και άνω των 180<sup>ο</sup> αντίστοιχα και διαρκούν περίπου 6 ώρες μέχρι το SSC. Για το γεγονός της 25<sup>ης</sup> Ιουνίου 1978 (Σχ. 6.50, μεσαίο διάγραμμα) παρατηρείται συνδυασμός προ-μείωσης (στην περιοχή μηκών 90<sup>ο</sup> – 180<sup>ο</sup>)

διάρκειας ~12 ωρών και προ-αύξησης (στην περιοχή μηκών  $180^\circ - 310^\circ$ ) διάρκειας περίπου 9 ωρών. Η περίπτωση της μείωσης Forbush της 25<sup>ης</sup> Ιουλίου 1980 (Σχ. 6.14, κάτω διάγραμμα) έχει ήδη σχολιαστεί στα προηγούμενα (βλ. Κεφ. VI § 6.2.2.2). Για το γεγονός της 6<sup>ης</sup> Αυγούστου 1982 (Σχ. 6.50, κάτω διάγραμμα) καταγράφηκε προ-αύξηση σε μήκη κάτω των  $180^\circ$ , η οποία διήρκησε περίπου 6 ώρες.

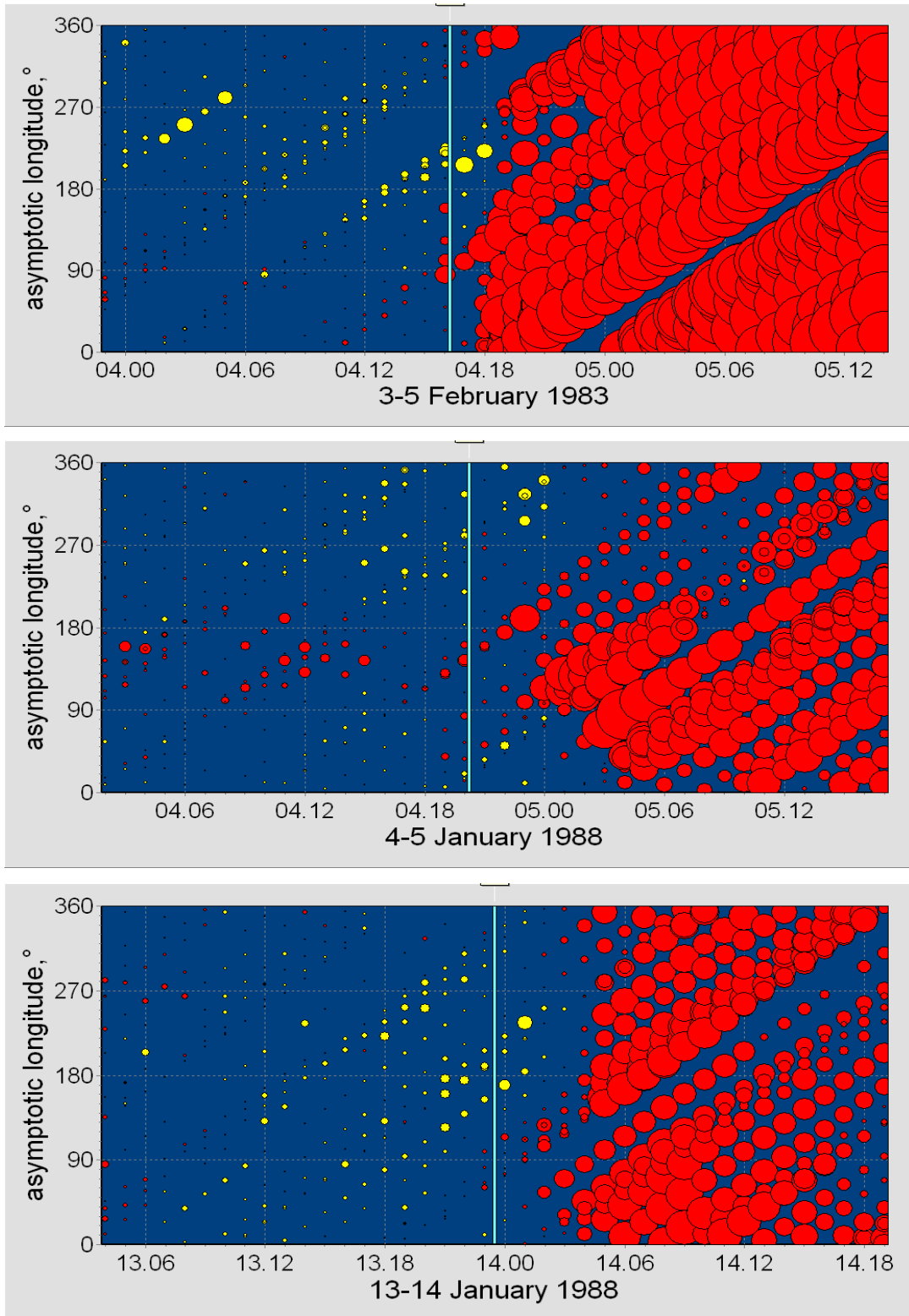
Προ-αύξηση σημειώνεται για τη μείωση της 4<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 1983 (Σχ. 6.51, άνω διάγραμμα) στα μήκη από  $180^\circ$  έως  $240^\circ$  για ~4 ώρες. Προ-μείωση (κάτω των  $180^\circ$ ) και προ-αύξηση (άνω των  $180^\circ$ ) παρατηρείται για το γεγονός της 4<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1988 (Σχ. 6.51, μεσαίο διάγραμμα), ενώ προ-αύξηση στην περιοχή γύρω από τις  $180^\circ$  και διάρκειας περίπου 5 ωρών καταγράφεται για το γεγονός της 13<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1988, όπως προκύπτει από το σχήμα 6.51 (κάτω διάγραμμα).

Το γεγονός της 30<sup>ης</sup> Ιουνίου 1991 απεικονίζεται στο σχήμα 6.52 (άνω διάγραμμα). Η προ-μείωση, η οποία εντοπίζεται στη ζώνη μηκών  $90^\circ - 180^\circ$ , ξεκινά περίπου 6 ώρες πριν το SSC. Το προειδοποιητικό σήμα για τη μείωση της 8<sup>ης</sup> Ιουλίου 1991 (Σχ. 6.52, μεσαίο διάγραμμα) είναι μία προ-μείωση (σε μήκη κάτω των  $180^\circ$ ) και μία προ-αύξηση (σε μήκη άνω των  $180^\circ$ ) διάρκειας ~3 και 5 ωρών αντίστοιχα. Η προ-αύξηση για τη μείωση της 8<sup>ης</sup> Ιουνίου 2000 (Σχ. 6.52, κάτω διάγραμμα) καταγράφηκε στην περιοχή μηκών  $90^\circ - 270^\circ$  και ξεκίνησε περίπου 10 ώρες πριν το SSC.

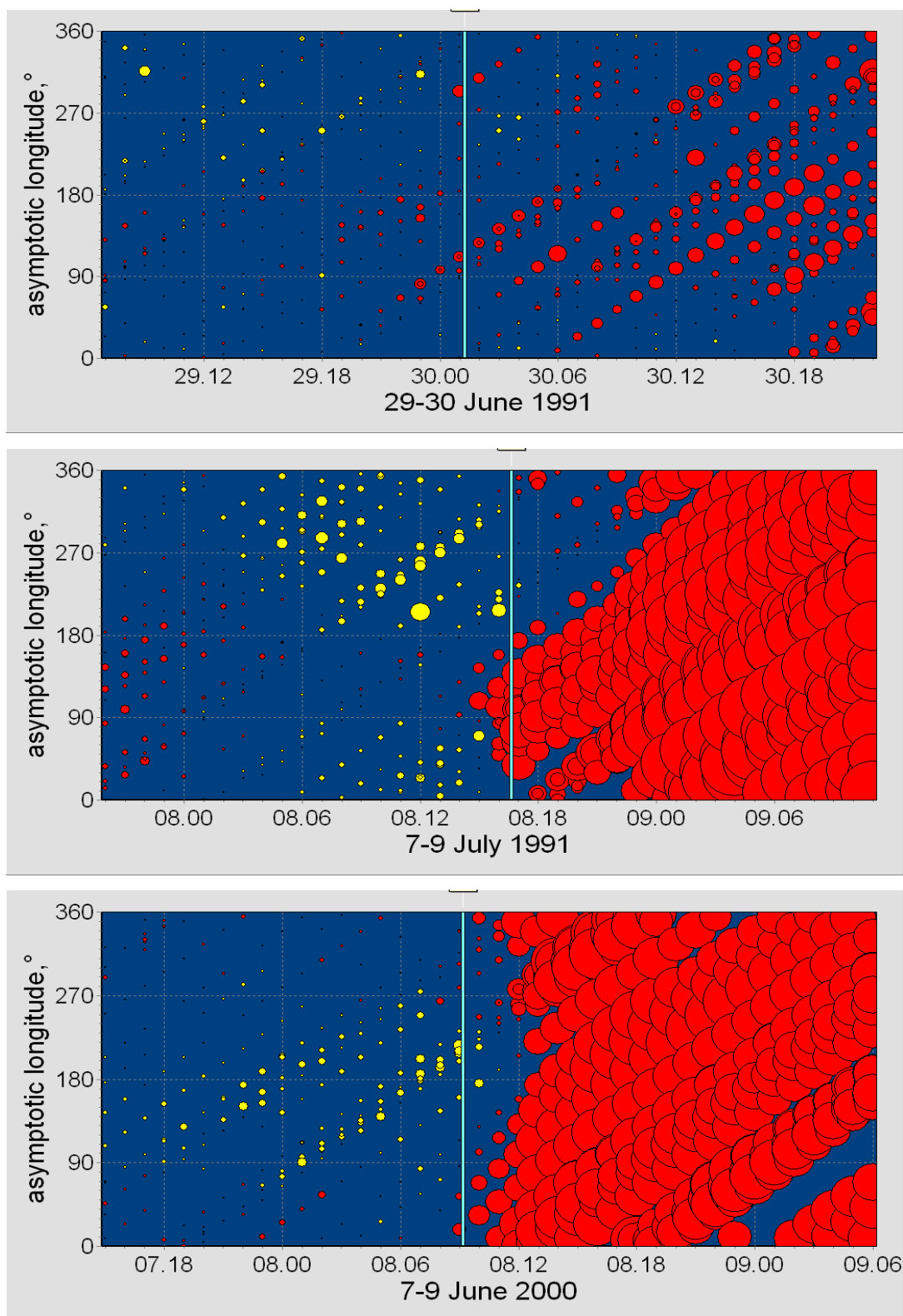
Σχετικά με το γεγονός της 11<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2001 (Σχ. 6.53, άνω διάγραμμα) παρατηρείται συνδυασμός προ-μείωσης (σε μήκη από  $90^\circ$  έως  $180^\circ$ ) και προ-αύξησης (άνω των  $180^\circ$ ) διάρκειας περίπου 8 ωρών. Προ-αύξηση, η οποία ξεκινά περίπου 2 ώρες πριν το SSC και εκτείνεται σε μήκη από  $90^\circ$  έως  $270^\circ$  σημειώνεται στη μείωση της 6<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2001 (Σχ. 6.53, μεσαίο διάγραμμα), ενώ για την περίπτωση της 17<sup>ης</sup> Απριλίου 2002 (Σχ. 6.53, κάτω διάγραμμα), αυτή διαρκεί περίπου 6 ώρες και παρατηρείται στην περιοχή  $170^\circ - 270^\circ$ .



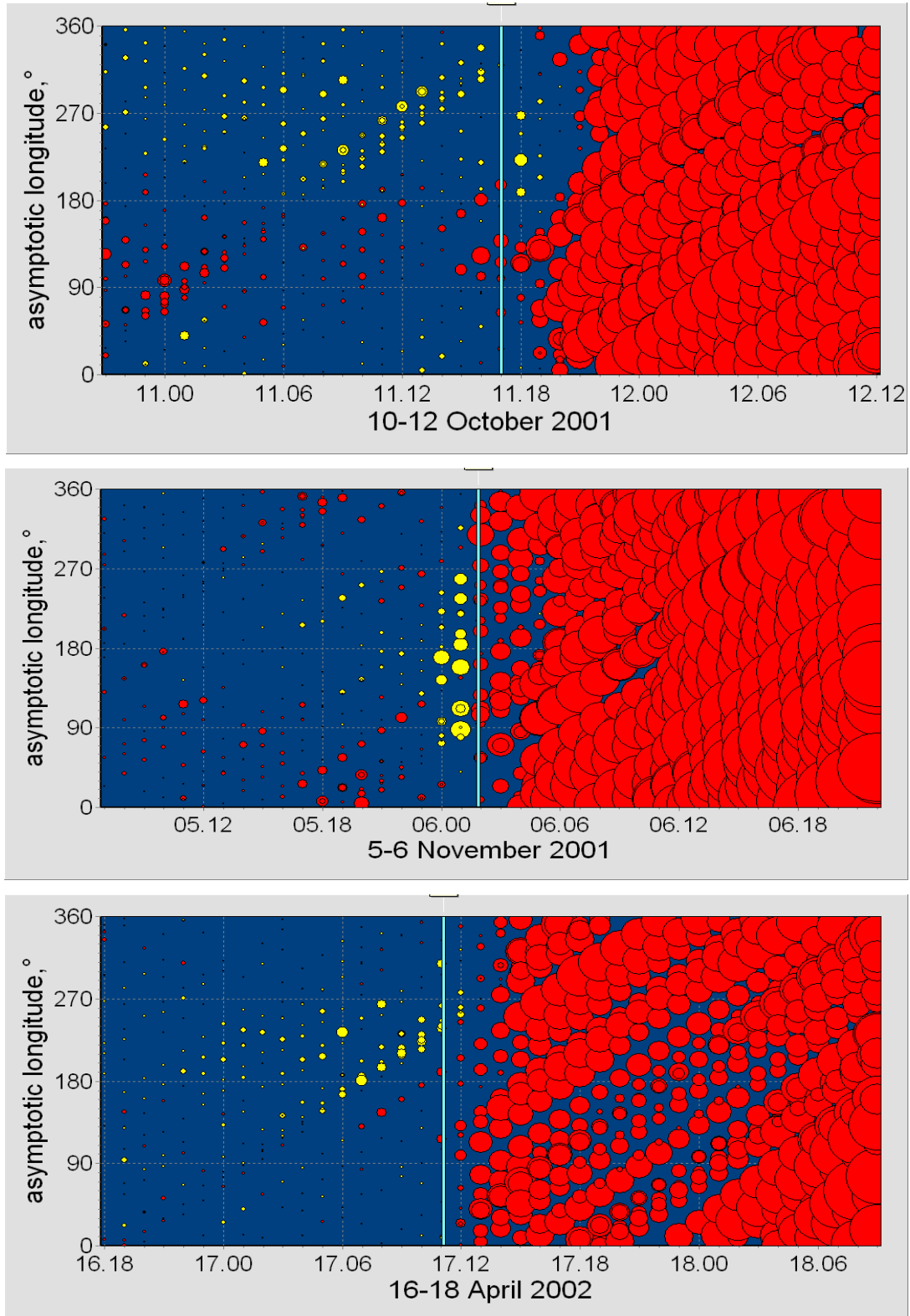
Σχ. 6.50 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 10 Απριλίου 1978 (άνω διάγραμμα), 25 Ιουνίου 1978 (μεσαίο διάγραμμα) και 6 Αυγούστου 1982 (κάτω διάγραμμα).



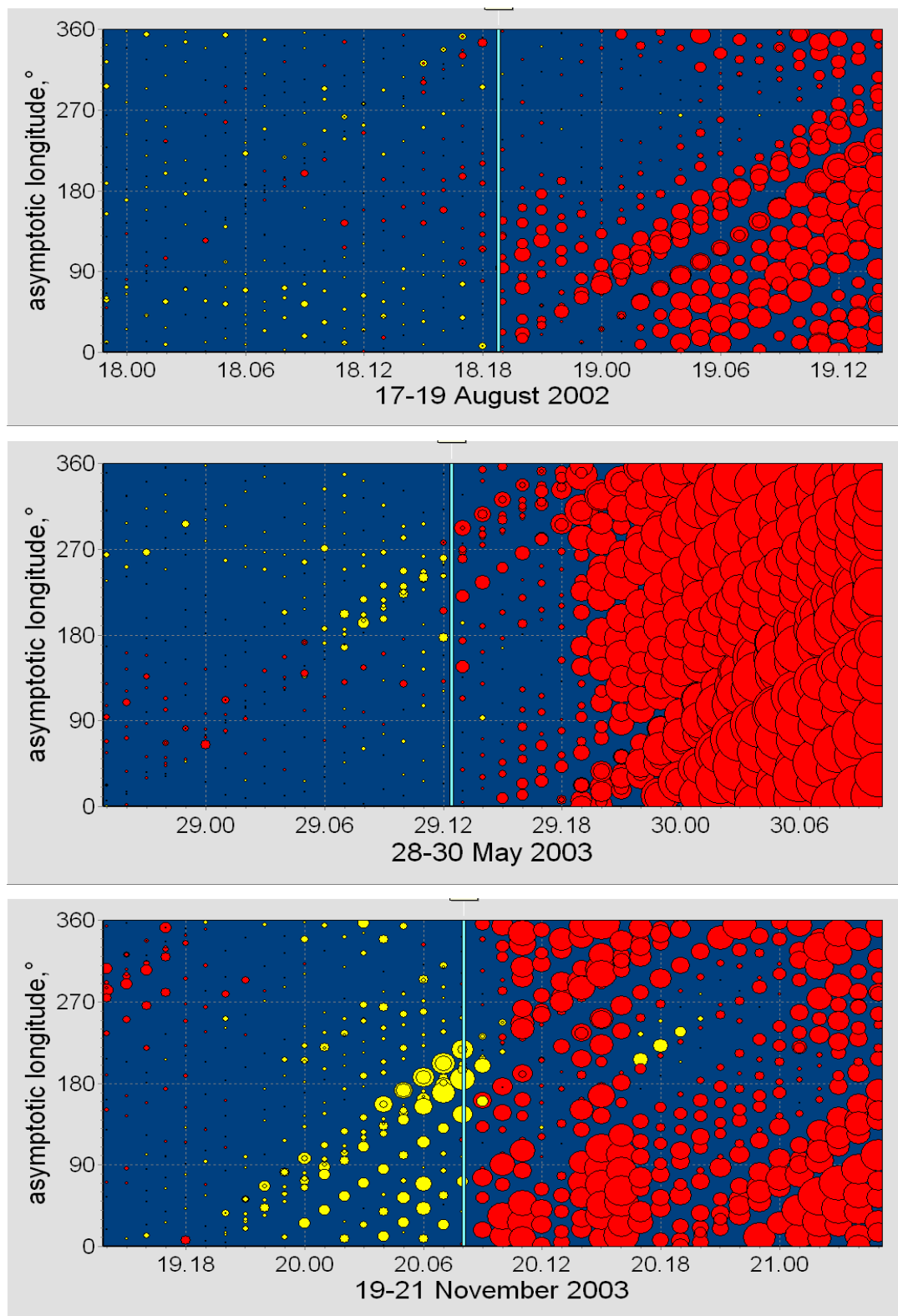
Σχ. 6.51 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 4 Φεβρουαρίου 1983 (άνω διάγραμμα), 4 Ιανουαρίου 1988 (μεσαίο διάγραμμα) και 13 Ιανουαρίου 1988 (κάτω διάγραμμα).



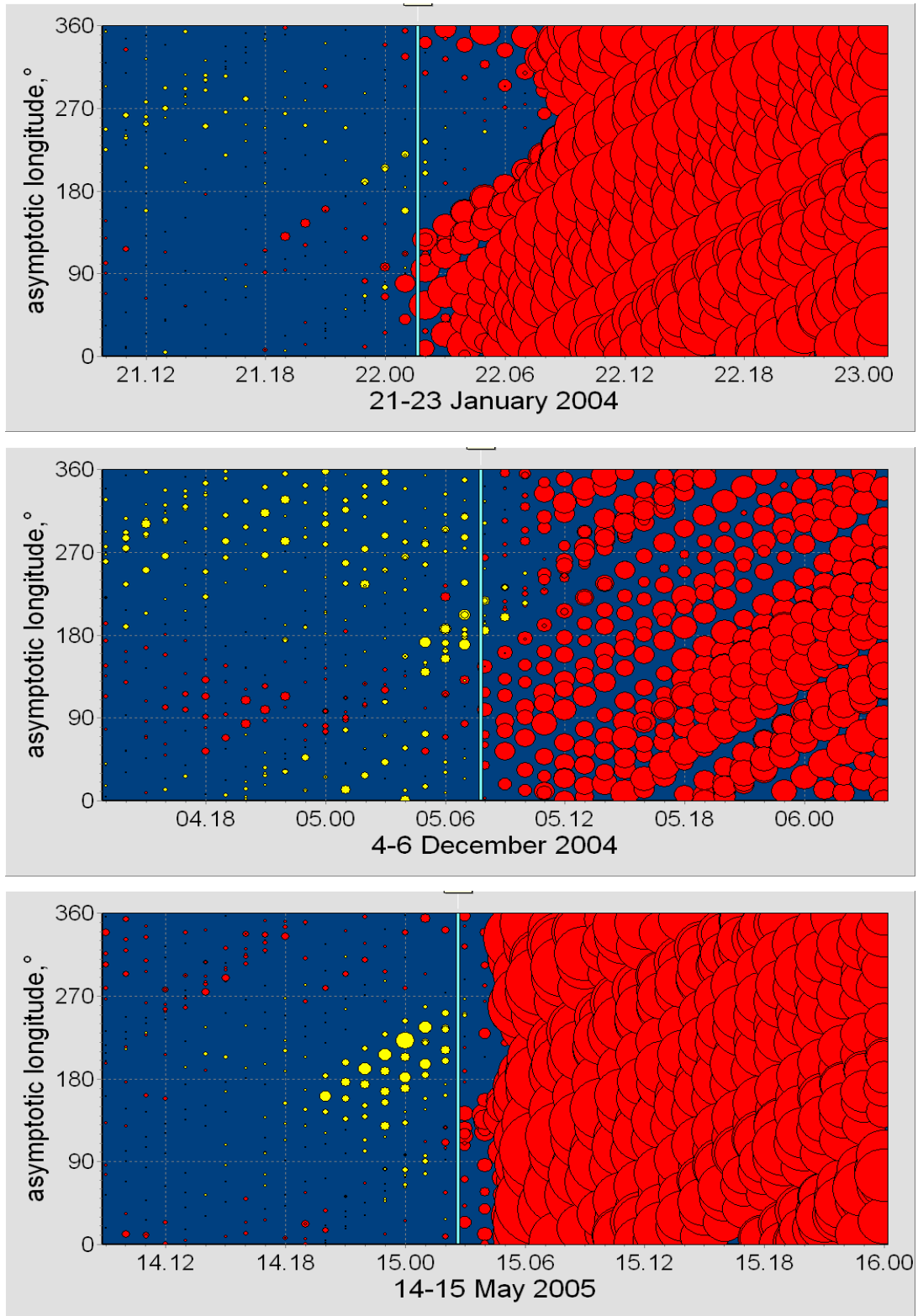
Σχ. 6.52 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 30 Ιουνίου 1991 (άνω διάγραμμα), 8 Ιουλίου 1991 (μεσαίο διάγραμμα) και 8 Ιουνίου 2000 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.53 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 11 Οκτωβρίου 2001 (άνω διάγραμμα), 6 Νοεμβρίου 2001 (μεσαίο διάγραμμα) και 17 Απριλίου 2002 (κάτω διάγραμμα).



Σχ. 6.54 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 18 Αυγούστου 2002 (άνω διάγραμμα), 29 Μαΐου 2003 (μεσαίο διάγραμμα) και 20 Νοεμβρίου 2003 (κάτω διάγραμμα).



*Σχ. 6.55 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 22 Ιανουαρίου 2004 (άνω διάγραμμα), 5 Δεκεμβρίου 2004 (μεσαίο διάγραμμα) και 15 Μαΐου 2005 (κάτω διάγραμμα).*



Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.54 (άνω διάγραμμα) για τη μείωση της 18<sup>ης</sup> Αυγούστου 2002 το προειδοποιητικό σήμα είναι μία προ-μείωση ~4 ωρών στη ζώνη μηκών 90° – 180°. Για τα γεγονότα της 29<sup>ης</sup> Μαΐου 2003 (Σχ. 6.54, μεσαίο διάγραμμα) και 20<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2003 (Σχ. 6.54, κάτω διάγραμμα) έχει καταγραφεί μία προ-αύξηση στην περιοχή 180° – 270° και διάρκειας 6 ωρών για την πρώτη περίπτωση και σε μήκη κάτω των 240° και διάρκειας 8 ωρών για τη δεύτερη περίπτωση.

Για το γεγονός της 22<sup>ας</sup> Ιανουαρίου 2004 (Σχ. 6.55, άνω διάγραμμα) το προειδοποιητικό σήμα, το οποίο είναι συνδυασμός προ-μείωσης (σε μήκη κάτω των 180°) και προ-αύξησης (σε μήκη άνω των 180°), ξεκινά περίπου 8 ώρες πριν το SSC. Προ-αύξηση διάρκειας ~3 ωρών στην περιοχή μηκών γύρω από τις 180° σημειώνεται και στην περίπτωση της μείωσης της 5<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2004 (Σχ. 6.55, μεσαίο διάγραμμα). Τέλος, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.55 (κάτω διάγραμμα) για την περίπτωση της 15<sup>ης</sup> Μαΐου 2005 καταγράφηκε προ-αύξηση από 120° έως 250°, η οποία διήρκησε 7 ώρες μέχρι το SSC.

## 6.5 Άλλες περιπτώσεις

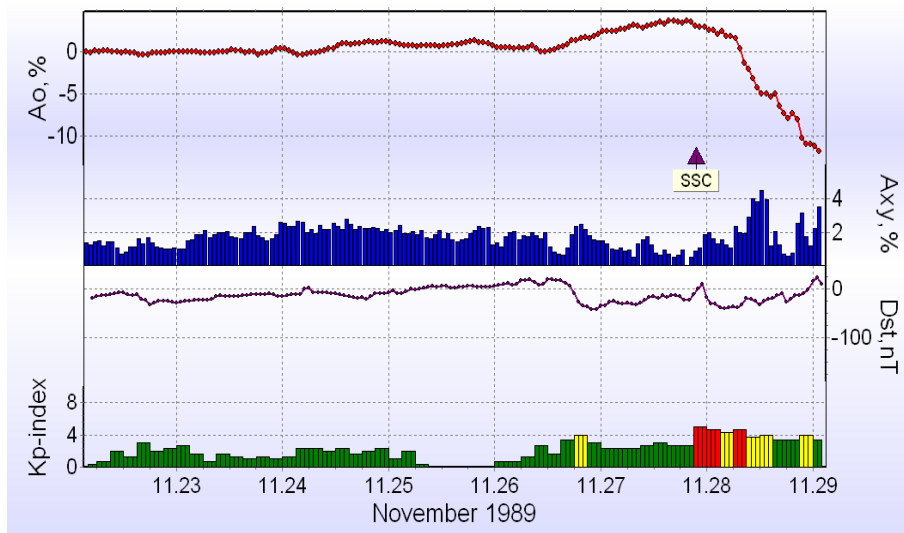
Τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σχεδιάστηκαν για όλα τα γεγονότα (93 σύμφωνα με το κριτήριο της ανισοτροπίας, 25 σύμφωνα με το κριτήριο δυτικών ηλιακών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων και 67 σύμφωνα με το κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush). Εκτός από τις κατηγορίες των μειώσεων Forbush με προειδοποιητικά σήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως, από τα υπόλοιπα γεγονότα (97), παρουσιάζονται δύο κατηγορίες, της ημερήσιας μεταβολής (19 γεγονότα) και των θετικών μειώσεων Forbush (17 γεγονότα). Στη συνέχεια ακολουθούν μερικά ενδεικτικά παραδείγματα αυτών των περιπτώσεων. Τα υπόλοιπα γεγονότα παρουσίασαν μία ασαφή εικόνα.

### A) Ημερήσια μεταβολή

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται περιπτώσεις όπου η μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσίασε ημερήσια μεταβολή, δηλαδή κατά τη

διάρκεια μίας ημέρας σημειώθηκαν διαδοχικά μειώσεις και αυξήσεις. Στη συνέχεια, έχουν ενδεικτικά συμπεριληφθεί και παρουσιάζονται πέντε γεγονότα αυτής της κατηγορίας, πιο συγκριμένα τα γεγονότα της 16<sup>ης</sup> Αυγούστου 1978, 22<sup>ας</sup> Μαρτίου 1985, 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1989, 21<sup>ης</sup> Ιουνίου 2005 και 4<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006.

Στον Πίνακα 6.8 δίνονται οι κυριότερες διαπλανητικές και γεωμαγνητικές παράμετροι για τα υπό εξέταση γεγονότα, καθώς και το πλάτος της μείωσης και ο χρόνος έναρξης. Όπως παρατηρείται, το πλάτος των γεγονότων είναι μικρό, αφού δεν ξεπερνά το 1.3% (γεγονός της 4<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006), ενώ τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας δεν συνοδεύονται από γεωμαγνητική δραστηριότητα. Συγκεκριμένα, ο δείκτης Kp έχει μέγιστη τιμή 5 μόνο σε μία περίπτωση (γεγονός της 4<sup>ης</sup> Ιουλίου 2006), ενώ η ελάχιστη τιμή του δείκτη Dst (-20nT) σημειώθηκε για το γεγονός της 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1989. Για το ίδιο γεγονός παρατηρήθηκε και η μέγιστη τιμή ανισοτροπίας (2.78%). Οι τιμές της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου κυμάνθηκαν από 9.6nT έως 18.5nT και 354 km s<sup>-1</sup> έως 623 km s<sup>-1</sup> αντίστοιχα.

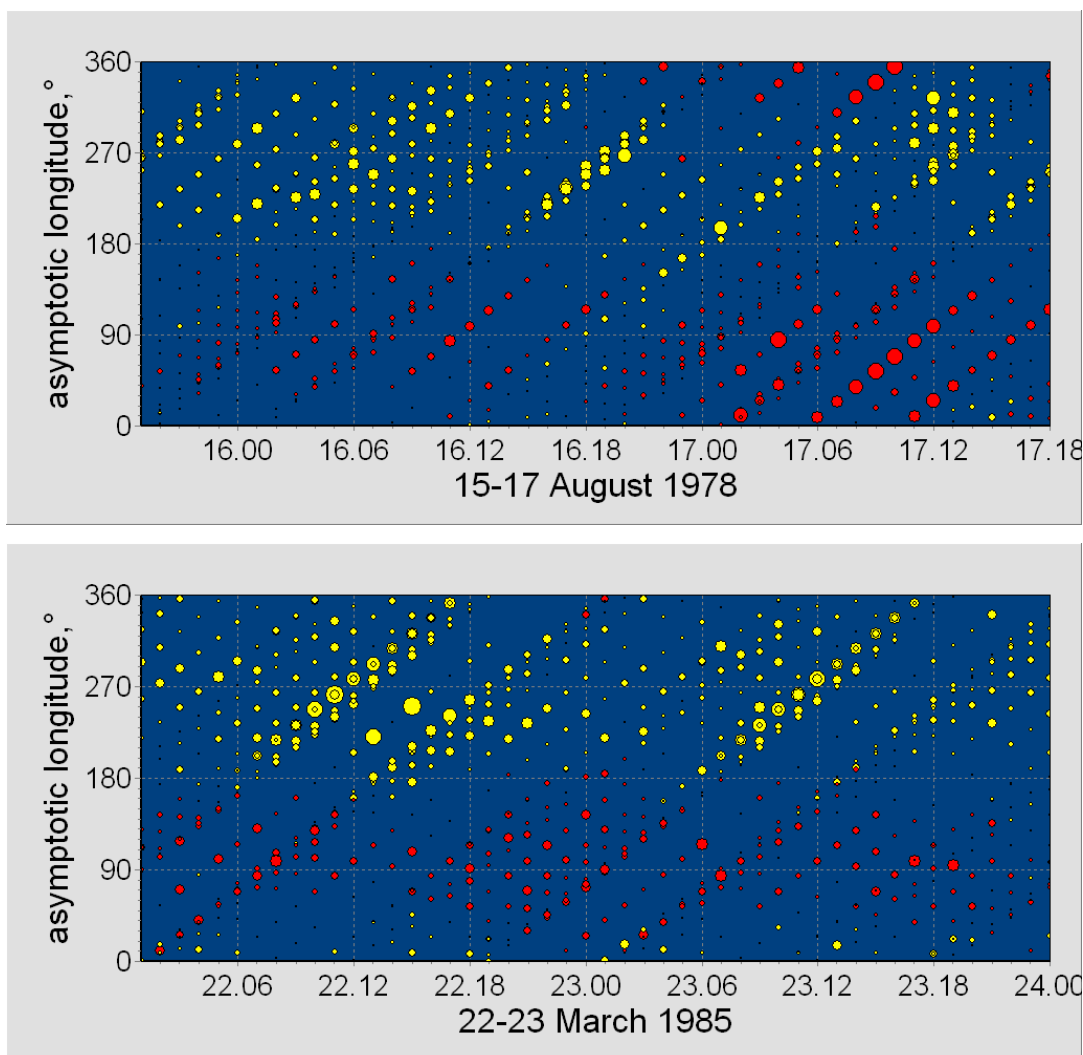


Σχ. 6.56 Μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (άνω διάγραμμα) και των δεικτών Dst και Kp (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1989.

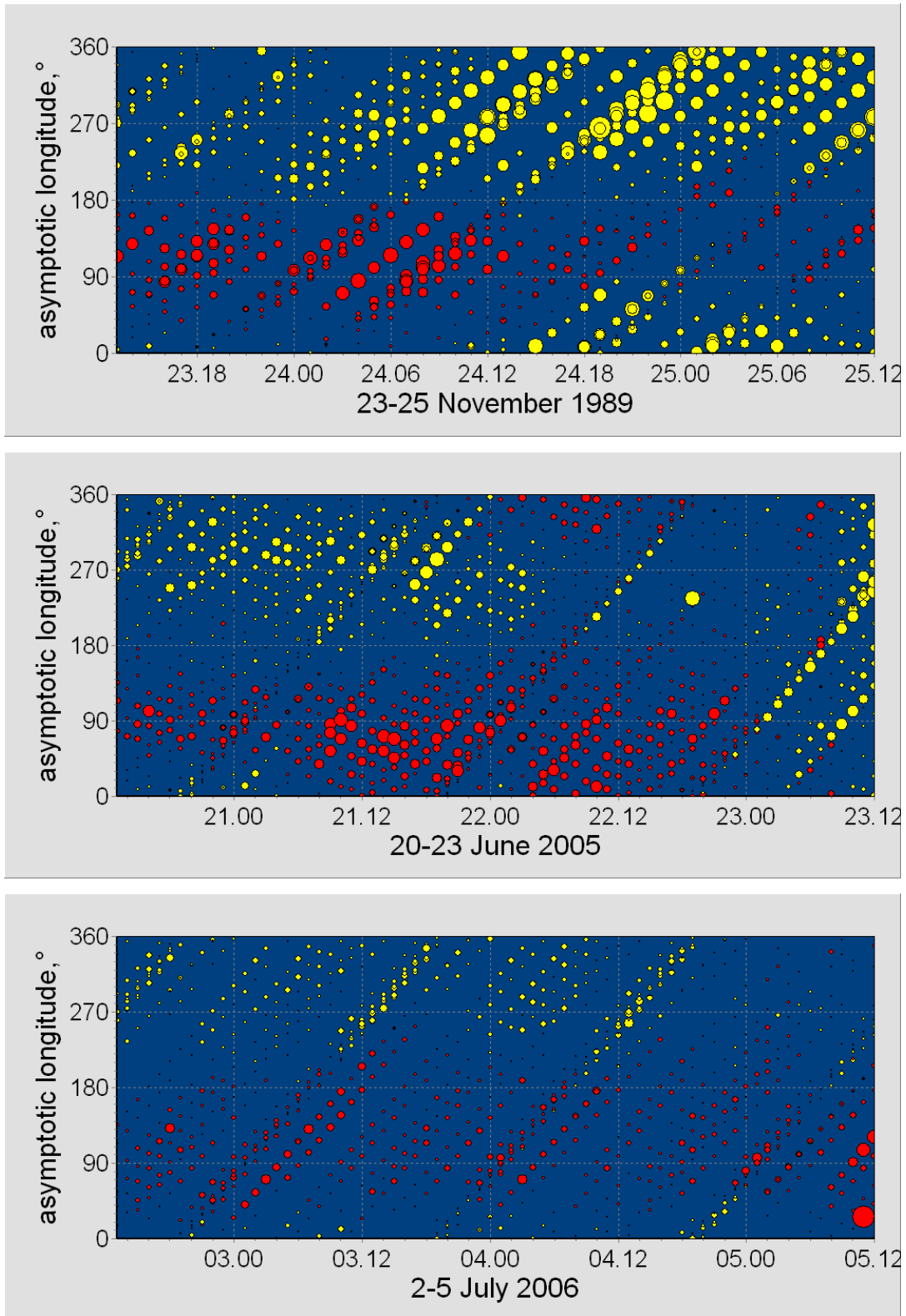
Το σχήμα 6.56 αναφέρεται στο παράδειγμα του γεγονότος της 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1989. Ο χρόνος έναρξης για το συγκεκριμένο γεγονός σημειώθηκε στις 03:00 UT και

η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 1.6% (Σχ. 6.56, άνω διάγραμμα). Οι τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 10.1nT και  $430 \text{ km s}^{-1}$ . Η μέγιστη τιμή του δείκτη Kp και η ελάχιστη τιμή του δείκτη Dst ήταν 2.3 και -20nT αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.56 (κάτω διάγραμμα).

Στα σχήματα 6.57 και 6.58 παρουσιάζονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα για όλα τα γεγονότα έχει καταγραφεί μία μείωση κάτω των  $180^\circ$  και μία αύξηση άνω των  $180^\circ$ . Δηλαδή, κάθε σταθμός καταγράφει περιοδικά μειωμένες και αυξημένες τιμές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.



Σχ. 6.57 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 16 Αυγούστου 1978 (άνω διάγραμμα) και 22 Μαρτίου 1985 (κάτω διάγραμμα).

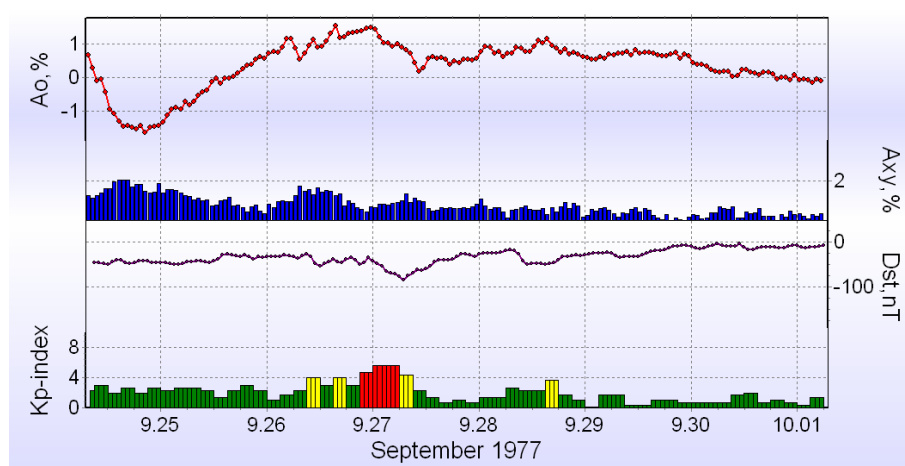


Σχ. 6.58 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 24 Νοεμβρίου 1989 (άνω διάγραμμα), 21 Ιουνίου 2005 (μεσαίο διάγραμμα) και 4 Ιουλίου 2006 (κάτω διάγραμμα).

## B) Θετικές μειώσεις Forbush

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας οι οποίες, λόγω διαταραγμένου υποβάθρου, παρουσιάζονται σαν αυξήσεις. Στη συνέχεια έχουν συγκεντρωθεί και περιγράφονται ενδεικτικά πέντε τέτοιες περιπτώσεις, της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977, 7<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1978, 15<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 1978, 10<sup>ης</sup> Απριλίου 1991 και 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1998.

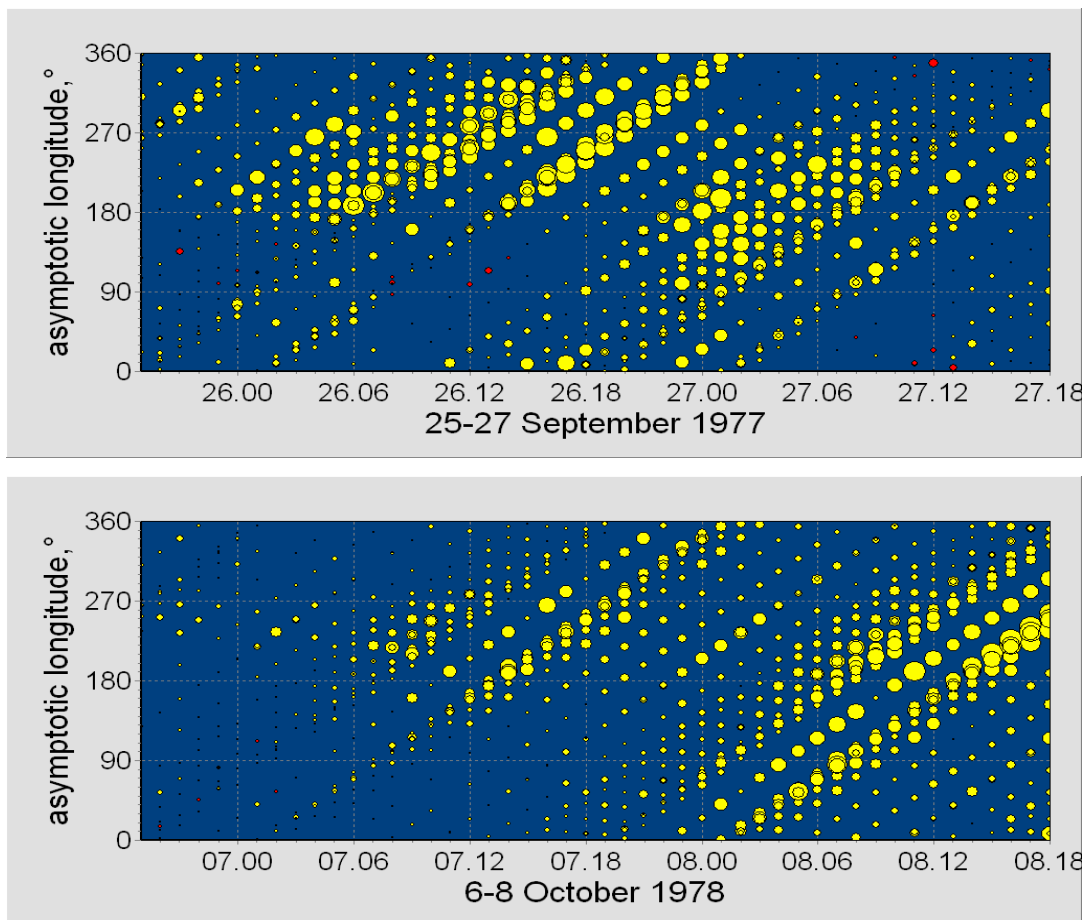
Οι τιμές των κυριότερων παραμέτρων, διαπλανητικών και γεωμαγνητικών, για τα γεγονότα αυτής της κατηγορίας δίνονται στον Πίνακα 6.9. Πρόκειται για μικρά σε πλάτος γεγονότα, όλα έχουν πλάτος μικρότερο του 1% πλην ενός (1.4% για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977) με τιμές μέγιστης ανισοτροπίας που κυμαίνονται από 1.39% (γεγονός της 3<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1998) έως 2.29% (γεγονός της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977). Δεν σημειώθηκε έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα, αφού τόσο η ελάχιστη τιμή του δείκτη Dst (-84nT) όσο και η μέγιστη τιμή του δείκτη Kp (5.7) αναφέρεται σε ένα μόνο γεγονός (γεγονός της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977). Η ένταση του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου κυμάνθηκε από 6.7nT (γεγονός της 7<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1978) έως 13.9nT (γεγονός της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977), ενώ η ταχύτητα του ηλιακού ανέμου από 375 km s<sup>-1</sup> έως 506 km s<sup>-1</sup>.



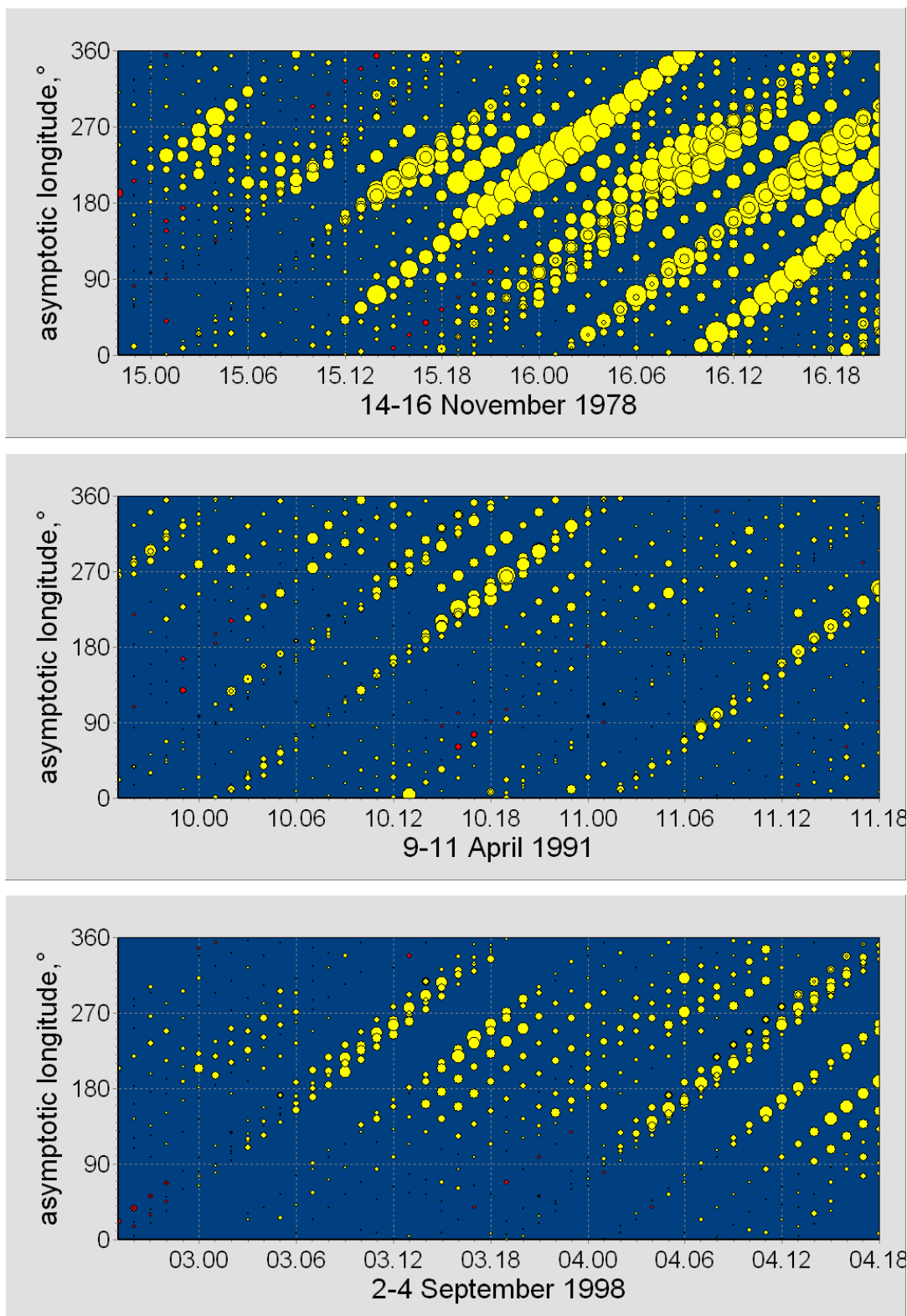
Σχ. 6.59 Μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας  $A_0$  και της ανισοτροπίας  $A_{xy}$  (άνω διάγραμμα) και των δεικτών Dst και Kp (κάτω διάγραμμα) για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977.

Συγκεκριμένα για το γεγονός της 26<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1977 ο χρόνος έναρξης σημειώθηκε την 26<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 1977 στις 07:00 UT. Οι τιμές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου ήταν 13.9nT και 427 km s<sup>-1</sup>. Η μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν 1.4% και η μέγιστη ανισοτροπία ήταν 2.29% (Σχ. 6.59, άνω διάγραμμα). Ακόμη, η μέγιστη τιμή του δείκτη Kp και η ελάχιστη τιμή του δείκτη Dst ήταν 5.7 και -84nT αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.59 (κάτω διάγραμμα).

Για τα γεγονότα που αναφέρθηκαν παραπάνω δίνονται τα διαγράμματα χρονικής κατανομής του ασυμπτωτικού μήκους στα σχήματα 6.60 και 6.61. Πιο συγκεκριμένα, για όλα τα γεγονότα έχει καταγραφεί αύξηση σε όλα τα μήκη. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτό οφείλεται στο ότι σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις η περίοδος πριν το γεγονός είναι διαταραγμένη με αποτέλεσμα αυτό που θεωρείται ως ήρεμη περίοδος να βρίσκεται πιο χαμηλά από το γεγονός.



Σχ. 6.60 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 26 Σεπτεμβρίου 1977 (άνω διάγραμμα) και 7 Οκτωβρίου 1978 (κάτω διάγραμμα).



*Σχ. 6.61 Χρονική κατανομή του ασυμπτωτικού μήκους για τα γεγονότα στις 15 Νοεμβρίου 1978 (άνω διάγραμμα), 10 Απριλίου 1991 (μεσαίο διάγραμμα) και 3 Σεπτεμβρίου 1998 (κάτω διάγραμμα).*

## 6.6 Συμπεράσματα

Η επίδραση των στεμματικών και διαπλανητικών (interplanetary) στεμματικών εκτινάξεων μάζας (CMEs και ICMEs) και/ή των ταχέως κινούμενων ρευμάτων ηλιακού ανέμου (CIRs) από τις στεμματικές οπές στο υπόβαθρο των κοσμικών ακτίνων μπορεί να οδηγήσει σε μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, τις γνωστές μειώσεις Forbush. Αυτά τα γεγονότα χαρακτηρίζονται από μία σχετικά γρήγορη μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που ακολουθείται από μία πιο αργή επαναφορά, η οποία διαρκεί έως και μερικές ημέρες (Forbush, 1958; Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2008).

Σημαντικός είναι ο αριθμός των ερευνών που έχουν διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια και αφορούν στα προειδοποιητικά σήματα στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία καταγράφονται κάποιες ώρες πριν τη μείωση Forbush (Nagashima et al., 1993; Belov et al., 1995a; Dorman et al., 1995; Ruffolo et al., 1999; Leerungnavarat et al., 2003; Dorman, 2005 και άλλες αναφορές; Kudela & Storini, 2006; Mavromichalaki et al., 2011). Μία σειρά ισχυρών γεγονότων έχουν μελετηθεί ώστε να προκύψουν εμπειριστατωμένα και ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με αυτά τα σήματα.

Η περιπλοκότητα των μηχανισμών που οδηγούν στον σχηματισμό των προειδοποιητικών σημάτων, η ποικιλία των διαπλανητικών στεμματικών εκτινάξεων μάζας, αλλά και οι διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν στον διαπλανητικό χώρο έχουν ως αποτέλεσμα την ποικιλία στη συμπεριφορά των κοσμικών ακτίνων. Οι μεταβολές αυτές στη συμπεριφορά της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρατηρούνται πριν την άφιξη στη Γη του διαπλανητικού κρουστικού κύματος ή της διαταραχής του ηλιακού ανέμου.

Η επίδραση του κρουστικού κύματος που πλησιάζει είναι ένας περίπλοκος συνδυασμός προ-αυξήσεων και προ-μειώσεων των κοσμικών ακτίνων και προϋποθέτει μία συγκεκριμένη γωνιακή κατανομή της έντασης των κοσμικών ακτίνων (Belov, 2008). Όπως αναφέρεται στους Kudela & Storini (2006), σωματίδια με μεγάλες γωνίες ρεύματος που πλησιάζουν το κρουστικό κύμα από την αντίθετη κατεύθυνση και ανακλώνται από αυτό, συνήθως, καταγράφονται ως προ-αυξήσεις. Οι



προ-μειώσεις σχετίζονται με μικρές γωνίες ρεύματος και οφείλονται στο φαινόμενο του ‘κώνου απώλειας’.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκαν προειδοποιητικά σήματα, τα οποία παρουσιάζονται λίγο πριν την έναρξη των μειώσεων Forbush. Τα υπό μελέτη γεγονότα έχουν επιλεγεί από την πλήρη βάση των μειώσεων Forbush που έχει δημιουργήσει η ομάδα του IZMIRAN σε συνεργασία με την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Καλύπτουν το εκτεταμένο χρονικό διάστημα 1967 – 2006 και έχουν κατηγοριοποιηθεί με βάση τρία κριτήρια.

Αρχικά αναλύθηκαν 93 γεγονότα με ανισοτροπία  $A_{xy} > 1.2\%$ , στη συνέχεια 25 γεγονότα που σχετίζονταν με δυτικές ηλιακές πηγές και γεωμαγνητικές καταιγίδες και τέλος 67 γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush (πλάτος  $> 3.99\%$ ). Παρακάτω δίνονται συνοπτικά τα σημαντικότερα αποτελέσματα.

#### ❖ Ως προς το κριτήριο της ανισοτροπίας

Παρατηρήθηκε ότι το ~29% των μειώσεων Forbush που μελετήθηκαν εμφάνισαν προειδοποιητικά σήματα. Συγκεκριμένα:

- Παρατηρήθηκε μία προ-μείωση στη ζώνη μηκών  $90^\circ - 180^\circ$  διάρκειας περίπου 24 ωρών στο ~18% των γεγονότων.
- Παρατηρήθηκε μία προ-αύξηση σε μήκη άνω των  $180^\circ$  διάρκειας περίπου 12 ωρών στο ~52% των γεγονότων.
- Παρατηρήθηκε μία προ-μείωση σε διαφορετικά μήκη και διαφορετικής διάρκειας στο ~30% των γεγονότων.

#### ❖ Ως προς το κριτήριο των δυτικών πηγών και των γεωμαγνητικών καταιγίδων

- Για το 60% των μειώσεων Forbush παρατηρήθηκε προειδοποιητικό σήμα διαφορετικής διάρκειας.

### ❖ Ως προς το κριτήριο των μεγάλων μειώσεων Forbush

Παρατηρήθηκε ότι το ~69% των μειώσεων Forbush που μελετήθηκαν εμφάνισαν προειδοποιητικά σήματα. Συγκεκριμένα:

- Για το ~79% των μειώσεων Forbush, οι οποίες σχετίζονται με δυτικές πηγές, παρατηρήθηκε προειδοποιητικό σήμα.
- Για το ~68% των μειώσεων Forbush, οι οποίες σχετίζονται με ανατολικές πηγές, παρατηρήθηκε προειδοποιητικό σήμα.
- Για το ~65% των μειώσεων Forbush, οι οποίες σχετίζονται με κεντρικές πηγές, παρατηρήθηκε προειδοποιητικό σήμα.

Στον Πίνακα 6.10 έχουν συγκεντρωθεί και σημειώνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης. Αναφέρονται όλα τα γεγονότα τα οποία μελετήθηκαν και έδωσαν προειδοποιητικό σήμα πριν το κύριο γεγονός της μείωσης, το είδος του προειδοποιητικού σήματος αλλά και η διάρκειά του.

Γενικά μπορεί να σημειωθεί ότι κάθε μείωση Forbush είναι μοναδική και εξελίσσεται κάτω από συγκεκριμένες διαπλανητικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα τα προειδοποιητικά σήματα εμφανίζονται με διαφορετικούς τρόπους κάθε φορά. Γι' αυτό και είναι σημαντικό να αναλυθούν λεπτομερώς περισσότερα γεγονότα ώστε να προκύψει ένα ασφαλές συμπέρασμα χρήσιμο για την παρακολούθηση των φαινομένων του διαστημικού καιρού.

*Πίνακας 6.1* Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας (1<sup>η</sup> ομάδα).

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ωρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ωρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	24.06.1980	02:48	21.06.1980	00:03	S12E17	M2.3	14.0	453	3.7	-18	3.7	2.62
2	28.10.2000	09:54	25.10.2000	08:45	N10W66	C4.0	18.8	415	6.0	-127	7.7	3.49
3	17.08.2001	11:03	14.08.2001	11:30	N16W36	C2.3	32.1	599	7.0	-105	6.3	4.41
4	23.04.2002	04:48	21.04.2002	00:43	S14W84	X1.5	15.1	592	6.0	-56	2.2	1.49
5	10.05.2002	11:23	07.05.2002	03:37	S08E28	M1.4	10.8	420	4.0	-11	2.2	1.96

*Πίνακας 6.2 Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας (2<sup>η</sup> ομάδα).*

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	03.01.1978	20:42	01.01.1978	21:47	S18E05	M3.0	17.9	756	7.3	-121	4.2	2.97
2	13.07.1978	00:15	10.07.1978	06:20	N18E58	X3.0	13.4	442	4.3	-11	5.0	2.62
3	11.01.1980	07:57	08.01.1980	10:10	S11E29	X1.0	11.1	442	3.0	-20	2.2	1.51
4	30.03.1980	23:54	26.03.1980	00:02	N14E52	C6.0	11.9	397	4.0	-39	1.4	2.25
5	25.07.1980	11:11	23.07.1980	00:58	S17E13	M8.9	16.0	503	7.0	-88	4.9	1.97
6	11.12.1980	10:09	08.12.1980	19:14	N50W08	C3.0	18.0	640	4.7	-27	3.7	3.30
7	02.10.1981	20:22	30.09.1981	17:11	S16E47	C7.6	19.4	710	6.3	-50	3.7	2.65
8	10.10.1988	02:32	05.10.1988	06:21	S23W36	M3.3	27.4	-	7.7	-156	3.2	2.17
9	09.09.1992	01:39	06.09.1992	06:57	S13W32	M1.3	25.0	589	7.3	-135	6.6	4.10
10	26.08.1998	07:00	24.08.1998	21:50	N35E09	X1.0	18.9	847	8.0	-188	7.2	4.85
11	20.02.2000	21:39	17.02.2000	20:17	S29E07	M1.3	16.9	455	4.7	-26	2.1	2.45
12	25.09.2001	20:25	24.09.2001	09:32	S16E23	X2.6	26.1	677	7.3	-102	8.3	1.84
13	07.09.2002	16:36	05.09.2002	16:18	N09E28	C5.2	22.9	550	7.3	-170	4.6	1.64
14	09.07.2006	21:36	06.07.2006	08:13	S09W34	M2.5	9.7	433	3.3	-23	4.5	1.95

*Πίνακας 6.3 Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας (3<sup>η</sup> ομάδα).*

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	08.09.1981	21:46	03.09.1981	22:57	S13E16	M7.4	14.7	444	4.3	-12	2.8	3.06
2	16.04.1982	17:02	14.04.1982	02:36	S27W03	M1.8	17.1	518	5.0	-60	2.6	1.97
3	04.03.1995	01:15	-	-	-	-	-	-	2.7	-27	1.1	1.33
4	10.08.1998	00:46	07.08.1998	14:17	N18E52	C2.9	10.7	498	3.7	-37	1.7	1.91
5	18.10.1998	19:52	13.10.1998	19:29	N16E03	C1.0	26.2	430	6.7	-139	1.6	1.24
6	15.09.2000	04:50	09.09.2000	08:28	N07W67	M1.6	9.6	401	2.7	-18	3.4	3.30
7	03.08.2001	07:16	-	-	-	-	11.0	437	4.3	-18	1.1	3.00
8	25.08.2002	22:00	22.08.2002	01:47	S07W62	M5.4	-	-	3.3	-7	0.8	2.35

*Πίνακας 6.4 Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα της ομάδας δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων.*

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	10.05.1978	20:05	07.05.1978	03:33	N22W68	X2.0	10.2	641	6.0	-78	0.7	0.89
2	28.01.1980	15:43	25.01.1980	19:17	S19W51	M7.0	23.8	515	5.3	-69	2.5	1.22
3	30.10.1980	15:20	27.10.1980	21:47	S19W60	C4.2	16.4	548	5.3	-58	3.6	2.18
4	23.07.1981	06:46	19.07.1981	05:32	S37W56	X2.7	16.8	487	5.7	-89	3.9	1.27
5	04.10.1983	05:41	02.10.1983	06:12	S18W53	M1.1	23.6	533	6.7	-71	1.1	1.91
6	12.08.1985	14:51	08.08.1985	07:44	S11W69	C5.4	20.9	640	6.3	-51	1.1	1.19
7	19.03.1989	04:23	17.03.1989	17:29	N33W60	X6.5	22.7	880	6.7	-106	2.2	2.81
8	26.05.1990	20:37	23.05.1990	04:01	N33W55	M8.7	-	-	7.3	-87	0.8	2.61
9	27.06.1992	20:35	25.06.1992	19:47	N09W67	X3.9	13.3	597	6.7	-98	0.6	1.36
10	29.05.1998	15:36	27.05.1998	13:30	N18W58	C7.5	17.3	716	6.7	-58	1.8	1.35
11	06.04.2000	16:32	04.04.2000	15:12	N16W66	C9.7	31.4	625	8.7	-288	2.8	2.79
12	28.10.2000	09:54	25.10.2000	08:45	N10W66	C4.0	18.8	415	6.0	-127	7.7	3.49
13	04.11.2003	06:25	02.11.2003	17:03	S14W56	X8.3	19.7	754	7.0	-89	2.6	2.66
14	21.01.2005	17:11	20.01.2005	06:36	N14W61	X7.1	29.5	950	8.0	-105	9.0	5.26
15	24.08.2005	06:13	22.08.2005	00:44	S11W54	M2.6	52.2	720	8.7	-216	6.4	2.66

*Πίνακας 6.5 Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush και δυτικών πηγών.*

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	12.06.1982	14:43	09.06.1982	22:12	S08W21	M2.0	17.1	681	6.7	-56	4.5	2.62
2	07.05.1989	05:12	03.05.1989	19:27	S19W26	M1.4	14.7	514	6.0	-90	4.0	2.30
3	30.03.1990	07:20	28.03.1990	07:31	S04W37	M4.2	18.4	616	8.0	-187	5.5	3.68
4	09.09.1992	01:39	06.09.1992	06:57	S13W32	M1.3	25.0	589	7.3	-135	6.6	4.10
5	28.04.2001	05:00	26.04.2001	11:26	N17W31	M7.8	19.9	724	6.0	-47	7.9	2.59
6	17.08.2001	11:03	14.08.2001	11:30	N16W36	C2.3	32.1	599	7.0	-105	6.3	4.41
7	24.11.2001	05:56	22.11.2001	22:32	S15W34	M9.9	56.9	1040	8.3	-221	9.2	3.19
8	20.03.2002	13:28	18.03.2002	02:16	S08W31	M1.0	20.1	576	4.3	-14	4.4	2.55
9	26.07.2004	22:49	25.07.2004	14:19	N08W33	M1.1	26.1	1027	8.7	-197	13.5	2.60
10	09.07.2006	21:36	06.07.2006	08:13	S09W34	M2.5	9.7	433	3.3	-23	4.5	1.95
11	14.12.2006	14:14	13.12.2006	02:14	S06W23	X3.4	17.9	896	8.3	-146	8.6	4.35

**Πίνακας 6.6** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush και ανατολικών πηγών.

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	13.07.1978	00:15	10.07.1978	06:20	N18E58	X3.0	13.4	442	4.3	-11	5.0	1.79
2	06.06.1979	19:27	04.06.1979	03:55	N20E34	X1.0	54.4	655	7.0	-40	7.0	1.79
3	01.03.1981	07:37	26.02.1981	14:21	S12E53	X1.8	15.4	531	5.0	-58	4.8	1.63
4	24.04.1982	20:16	22.04.1982	12:48	N09E36	M1.9	23.0	675	6.7	-78	5.2	2.57
5	09.06.1982	00:40	05.06.1982	17:21	S10E38	M1.9	30.7	521	6.3	-66	5.4	2.36
6	13.07.1982	16:17	12.07.1982	09:16	N11E37	X7.1	44.3	986	9.0	-325	19.8	4.71
7	27.12.1982	07:15	25.12.1982	07:43	S14E31	X2.2	-	-	4.7	-26	4.2	1.79
8	11.04.1989	14:35	09.04.1989	00:44	N35E29	X3.5	21.5	440	4.3	-56	4.4	2.24
9	04.09.1989	00:27	01.09.1989	23:50	S19E42	M5.8	-	-	6.0	-71	7.2	2.91
10	31.05.1991	10:39	29.05.1991	22:14	N05E38	X1.0	20.0	665	7.3	-84	6.6	2.39
11	26.02.1992	16:57	24.02.1992	23:16	N07E29	M4.9	-	-	8.0	-193	9.7	2.31
12	27.08.2001	19:52	25.08.2001	16:23	S17E34	X5.3	19.5	576	4.7	-24	6.5	4.29
13	25.09.2001	20:25	24.09.2001	09:32	S16E23	X2.6	26.1	677	7.3	-102	8.3	1.84
14	07.09.2002	16:36	05.09.2002	16:18	N09E28	C5.2	22.9	550	7.3	-170	4.6	1.64
15	13.09.2004	20:03	12.09.2004	00:04	N03E49	M4.8	25.1	603	5.3	-50	5.0	2.60



Πίνακας 6.7 Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush και κεντρικών πηγών.

α/α	SSC		Έκλαμψη				Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ηλιογραφικό Πλάτος/Μήκος	Τάξη	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	03.01.1978	20:42	01.01.1978	21:47	S18E05	M3.0	17.9	756	7.3	-121	4.2	3.04
2	10.04.1978	13:06	07.04.1978	20:16	N19W07	M1.0	-	662	7.7	-114	5.4	3.13
3	25.06.1978	08:25	22.06.1978	16:39	N19E18	M2.0	26.1	573	5.7	-77	6.9	2.83
4	25.07.1980	11:11	23.07.1980	00:58	S17E13	M8.9	16.0	503	7.0	-88	4.9	1.97
5	06.08.1982	18:36	03.08.1982	18:32	N15E20	M1.1	21.7	639	7.7	-155	4.8	1.71
6	04.02.1983	16:15	01.02.1983	18:33	S19E13	C5.1	-	-	8.0	-183	7.5	3.06
7	04.01.1988	20:12	02.01.1988	21:11	S34W18	X1.4	-	-	5.3	-41	4.7	4.25
8	13.01.1988	23:30	09.01.1988	23:17	N33E15	C3.7	31.1	760	7.3	-147	4.9	1.69
9	30.06.1991	01:16	27.06.1991	13:14	S07E11	M1.4	-	-	4.3	-55	4.7	2.97
10	08.07.1991	16:36	07.07.1991	00:20	N26E03	X1.9	32.5	747	8.0	-194	10.5	4.45
11	08.06.2000	09:10	06.06.2000	14:58	N20E18	X2.3	24.9	774	7.0	-90	7.6	3.00
12	11.10.2001	17:01	09.10.2001	10:46	S28E08	M1.4	26.5	571	6.0	-71	7.0	3.81
13	06.11.2001	01:52	04.11.2001	16:03	N06W18	X1.0	65.6	729	8.7	-292	12.4	4.00
14	17.04.2002	11:07	15.04.2002	03:05	S15W01	M1.2	30.4	611	7.3	-126	6.2	3.01
15	18.08.2002	18:46	16.08.2002	11:32	S14E20	M5.2	14.3	573	5.3	-58	4.7	2.50
16	29.05.2003	12:24	27.05.2003	22:56	S07W17	X1.3	28.4	764	8.3	-131	7.7	1.57
17	20.11.2003	08:03	18.11.2003	07:23	00E18	M3.2	55.8	703	8.7	-472	4.7	2.65
18	22.01.2004	01:37	19.01.2004	22:02	S13W09	C5.5	25.4	666	7.0	-149	8.6	4.32
19	05.12.2004	07:46	02.12.2004	23:44	N08W02	M1.5	34.6	457	4.3	-67	4.6	1.68
20	15.05.2005	02:38	13.05.2005	16:13	N12E11	M8.0	54.2	959	8.3	-263	9.5	2.53

**Πίνακας 6.8** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα της ομάδας της ημερήσιας μεταβολής.

α/α	Onset		Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ωρα (UT)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	16.08.1978	01:00	9.6	354	3.3	-12	1.2	2.24
2	22.03.1985	18:00	-	-	3.0	-8	1.1	1.66
3	24.11.1989	03:00	10.1	430	2.3	-20	1.6	2.78
4	21.06.2005	20:00	9.2	353	3.7	-11	0.8	2.08
5	04.07.2006	00:00	18.5	623	5.0	-34	1.3	1.61

**Πίνακας 6.9** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα θετικών μειώσεων Forbush.

α/α	Onset		Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ωρα (UT)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	26.09.1977	07:00	13.9	427	5.7	-84	1.4	2.29
2	07.10.1978	08:00	6.7	375	2.3	-21	0.4	1.60
3	15.11.1978	21:00	7.6	506	2.7	-50	0.5	2.19
4	10.04.1991	15:00	10.8	426	3.3	-26	0.8	1.77
5	03.09.1998	16:00	6.9	417	3.0	-42	0.6	1.39

**Πίνακας 6.10** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

Κριτήριο δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταγίδων	Γεγονός	Προειδοποιητικό σήμα	Διάρκεια
	10 Μαΐου 1978	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~4 - 6 ώρες
	28 Ιανουαρίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~4 - 6 ώρες
	30 Οκτωβρίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~4 - 6 ώρες
	23 Ιουλίου 1981	προ-μείωση	~7 ώρες
	4 Οκτωβρίου 1983	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και προ-μείωση σε μήκη κάτω των 180°	~5 ώρες
	12 Αυγούστου 1985	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~10 ώρες
	19 Μαρτίου 1989	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~6 ώρες
	26 Μαΐου 1990	προ-μείωση γύρω από τις 90°	~6 ώρες
	27 Ιουνίου 1992	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~8 - 10 ώρες
	29 Μαΐου 1998	προ-μείωση	~4 ώρες
	6 Απριλίου 2000	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~6 ώρες
	28 Οκτωβρίου 2000	προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180°	~24 ώρες
	4 Νοεμβρίου 2003	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~6 ώρες
	21 Ιανουαρίου 2005	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~6 ώρες
24 Αυγούστου 2005	προ-μείωση γύρω από τις 90° και προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~2 και 6 ώρες	

		Γεγονός	Προειδοποιητικό σήμα	Διάρκεια
Κριτήριο ανισοτροπίας	1 <sup>η</sup> ομάδα	24 Ιουνίου 1980	προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180°	~24 ώρες
		28 Οκτωβρίου 2000	προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180°	~24 ώρες
		17 Αυγούστου 2001	προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180° και προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~ 24 και 16 ώρες
		23 Απριλίου 2002	προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180° και προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~16 και 12 ώρες
		10 Μαΐου 2002	προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180° και προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~24 και 16 ώρες
	2 <sup>η</sup> ομάδα	3 Ιανουαρίου 1978	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~10 ώρες
		13 Ιουλίου 1978	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~12 ώρες
		11 Ιανουαρίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~12 ώρες
		30 Μαρτίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και προ-μείωση σε μήκη κάτω των 180°	~12 και 10 ώρες
		25 Ιουλίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~24 ώρες
		11 Δεκεμβρίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και προ-μείωση σε μήκη κάτω των 180°	~8-10 και 10 ώρες
		2 Οκτωβρίου 1981	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~10 ώρες
		10 Οκτωβρίου 1988	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~12 ώρες
		9 Σεπτεμβρίου 1992	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και προ-μείωση σε μήκη κάτω των 180°	~12 και 8 ώρες
		26 Αυγούστου 1998	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και προ-μείωση σε μήκη κάτω των 180°	~6 και 6 ώρες
		20 Φεβρουαρίου 2000	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180° και προ-μείωση σε μήκη κάτω των 180°	~12 και 6 ώρες
		25 Σεπτεμβρίου 2001	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~8 ώρες
		7 Σεπτεμβρίου 2002	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~12 ώρες
	9 Ιουλίου 2006	προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180°	~12 ώρες	
	3 <sup>η</sup> ομάδα	8 Σεπτεμβρίου 1981	προ-μείωση	~24 ώρες
		16 Απριλίου 1982	προ-μείωση	~10 ώρες
		4 Μαρτίου 1995	προ-μείωση	~12 ώρες
		10 Αυγούστου 1998	προ-μείωση	~ 8 ώρες
		18 Οκτωβρίου 1998	προ-μείωση	~24 ώρες
		15 Σεπτεμβρίου 2000	προ-μείωση	~ 6 ώρες
		3 Αυγούστου 2001	προ-μείωση	~20 ώρες
		25 Αυγούστου 2002	προ-μείωση	~12 ώρες

		Γεγονός	Προειδοποιητικό σήμα	Διάρκεια
Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush	Δυτικές πηγές	12 Ιουνίου 1982	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $120^{\circ} - 180^{\circ}$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~5 ώρες
		7 Μαΐου 1989	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^{\circ}$	~6 ώρες
		30 Μαρτίου 1990	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^{\circ}$	~3 ώρες
		9 Σεπτεμβρίου 1992	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$ και προ-μείωση σε μήκη κάτω των $180^{\circ}$	~12 και 8 ώρες
		28 Απριλίου 2001	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^{\circ} - 180^{\circ}$ και προ-αύξηση στη ζώνη $180^{\circ} - 270^{\circ}$	~5 ώρες
		17 Αυγούστου 2001	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^{\circ} - 180^{\circ}$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~ 24 και 16 ώρες
		24 Νοεμβρίου 2001	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $110^{\circ} - 200^{\circ}$	~ 6 ώρες
		20 Μαρτίου 2002	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $0^{\circ} - 270^{\circ}$	~ 6 ώρες
		26 Ιουλίου 2004	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^{\circ}$	~ 6 ώρες
		9 Ιουλίου 2006	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~12 ώρες
		14 Δεκεμβρίου 2006	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^{\circ}$	~3 ώρες
	Ανατολικές πηγές	13 Ιουλίου 1978	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~12 ώρες
		6 Ιουνίου 1979	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~4 ώρες
		1 Μαρτίου 1981	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~4 ώρες
		24 Απριλίου 1982	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$ και προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^{\circ} - 180^{\circ}$	~4 και 2 ώρες
		9 Ιουνίου 1982	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $180^{\circ} - 270^{\circ}$	~3 ώρες
		13 Ιουλίου 1982	προ-αύξηση στη ζώνη $180^{\circ} - 220^{\circ}$ και προ-μείωση για μήκη $< 150^{\circ}$ και $> 270^{\circ}$	~2 ώρες
		27 Δεκεμβρίου 1982	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $180^{\circ} - 270^{\circ}$	~4 ώρες
		11 Απριλίου 1989	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^{\circ}$	~ 3 ώρες
		4 Σεπτεμβρίου 1989	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^{\circ} - 180^{\circ}$	~17 ώρες
		31 Μαΐου 1991	προ-αύξηση σε ευρύ φάσμα μηκών	~3 ώρες
		26 Φεβρουαρίου 1992	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$ και προ-μείωση στη ζώνη $90^{\circ} - 180^{\circ}$	~4 ώρες
		27 Αυγούστου 2001	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$ και προ-μείωση στη ζώνη $90^{\circ} - 180^{\circ}$	~7 ώρες
		25 Σεπτεμβρίου 2001	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~8 ώρες
		7 Σεπτεμβρίου 2002	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$	~12 ώρες
13 Σεπτεμβρίου 2004	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^{\circ}$ και προ-μείωση στη ζώνη $90^{\circ} - 180^{\circ}$	~5 ώρες		

		<b>Γεγονός</b>	<b>Προειδοποιητικό σήμα</b>	<b>Διάρκεια</b>
<b>Κριτήριο μεγάλων μειώσεων Forbush</b>	<b>Κεντρικές πηγές</b>	3 Ιανουαρίου 1978	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~10 ώρες
		10 Απριλίου 1978	προ-μείωση σε μήκη κάτω των $180^\circ$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~6 ώρες
		25 Ιουνίου 1978	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^\circ - 180^\circ$ και προ-αύξηση στη ζώνη $180^\circ - 310^\circ$	~12 και 9 ώρες
		25 Ιουλίου 1980	προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~24 ώρες
		6 Αυγούστου 1982	προ-αύξηση σε μήκη κάτω των $180^\circ$	~6 ώρες
		4 Φεβρουαρίου 1983	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $180^\circ - 240^\circ$	~4 ώρες
		4 Ιανουαρίου 1988	προ-μείωση σε μήκη κάτω των $180^\circ$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~1 και 4 ώρες
		13 Ιανουαρίου 1988	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^\circ$	~ 5 ώρες
		30 Ιουνίου 1991	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^\circ - 180^\circ$	~6 ώρες
		8 Ιουλίου 1991	προ-μείωση σε μήκη κάτω των $180^\circ$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~3 και 5 ώρες
		8 Ιουνίου 2000	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $90^\circ - 270^\circ$	~10 ώρες
		11 Οκτωβρίου 2001	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^\circ - 180^\circ$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~8 ώρες
		6 Νοεμβρίου 2001	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $90^\circ - 270^\circ$	~2 ώρες
		17 Απριλίου 2002	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $170^\circ - 270^\circ$	~6 ώρες
		18 Αυγούστου 2002	προ-μείωση στη ζώνη μηκών $90^\circ - 180^\circ$	~4 ώρες
		29 Μαΐου 2003	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $180^\circ - 270^\circ$	~6 ώρες
		20 Νοεμβρίου 2003	προ-αύξηση σε μήκη κάτω των $240^\circ$	~8 ώρες
		22 Ιανουαρίου 2004	προ-μείωση σε μήκη κάτω των $180^\circ$ και προ-αύξηση σε μήκη άνω των $180^\circ$	~8 ώρες
5 Δεκεμβρίου 2004	προ-αύξηση στην περιοχή μηκών γύρω από τις $180^\circ$	~3 ώρες		
15 Μαΐου 2005	προ-αύξηση στη ζώνη μηκών $120^\circ - 250^\circ$	~7 ώρες		

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII

### ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΥ ΚΑΙΡΟΥ & ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

#### 7.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η έρευνα, η οποία έχει γίνει στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, σχετικά με τις επιδράσεις του διαστημικού καιρού στις ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους. Αρχικά, γίνεται μία εκτενής αναφορά στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία καθώς επίσης και σε εργασίες οι οποίες δημοσιεύτηκαν, κυρίως, στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Στη συνέχεια, περιγράφονται βασικές έννοιες σχετικά με τη λειτουργία της καρδιάς και ορίζονται οι ανθρώπινες φυσιολογικές παράμετροι (καρδιακός ρυθμός, διαστήματα RR, αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση) που έχουν χρησιμοποιηθεί στις συγκεκριμένες μελέτες. Παράλληλα παρουσιάζονται οι στατιστικές μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ανάλυση. Τέλος, περιγράφονται αναλυτικά τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων ηλιοβιολογίας.

#### 7.2 Βασικές πληροφορίες

Για τη μελέτη της πιθανής επίδρασης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (geomagnetic activity, GMA) και των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (cosmic ray intensity, CRI) στη φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού έχουν χρησιμοποιηθεί 'άμεσοι ή έμμεσοι δείκτες' (Palmer et al., 2006).

Όπως αναφέρεται στους Palmer et al. (2006), οι άμεσοι δείκτες είναι φυσιολογικές παράμετροι που μπορούν αντικειμενικά να επαληθευτούν και προκύπτουν είτε με απευθείας μέτρηση στον ασθενή (π.χ. καρδιακός ρυθμός, αρτηριακή πίεση, χρόνος αντίδρασης, κτλ) είτε μέσω διαγνωστικών μεθόδων στο εργαστήριο ή μέσω ανάλυσης ιστών. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι το βασικό

πρόβλημα σε σχέση με τους άμεσους δείκτες είναι ότι οι περισσότεροι από αυτούς μεταβάλλονται σημαντικά και με άλλους παράγοντες πέρα από τη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Από την άλλη, οι έμμεσοι δείκτες αφορούν σε επιδημιολογικά δεδομένα που αποτυπώνουν τη χρονική και χωρική κατανομή καθορισμένων γεγονότων ή ενοχλήσεων (π.χ. χρονική κατανομή της εισαγωγής σε νοσοκομείο, συχνότητα τροχαίων ή βιομηχανικών ατυχημάτων, κτλ). Συνήθως αναλύονται σε αναδρομικές μελέτες και αφορούν σε ένα μεγάλο αριθμό ατόμων μέσα σε διάστημα αρκετών χρόνων. Κατά την ερμηνεία, όμως, αυτών των δεικτών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλες πιθανές παράμετροι, όπως εποχή, καιρός, δημογραφικός παράγοντας, εργασιακό περιβάλλον, διατροφή κτλ, που είναι πιθανό να επηρεάσουν τις μετρήσεις (Palmer et al., 2006).

Σύμφωνα με την παραπάνω διάκριση οι έρευνες που σχετίζονται με την επίδραση των μεταβολών του διαστημικού καιρού στον ανθρώπινο οργανισμό και κατ' επέκταση στην ανθρώπινη υγεία μπορούν να ταξινομηθούν, ανάλογα με το υπό ανάλυση ιατρικό δείγμα και τα αποτελέσματά τους σε τρεις κατηγορίες:

α) έρευνες που αφορούν σε μεταβολές των ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων, όπως ο καρδιακός ρυθμός και η αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση (Usenko et al., 1989; Stoupel et al., 1995; Ghione et al., 1998; Dimitrova, 2008a; b; Stoilova & Dimitrova, 2008; Dimitrova, 2009; Dimitrova et al., 2009a) αλλά και η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού (Baevsky et al., 1997; Otsuka et al., 2001; Cornelissen et al., 2002; Oinuma et al., 2002), κτλ. Σε αυτή την κατηγορία θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και έρευνες που αναφέρονται στις επιδράσεις των παραμέτρων του διαστημικού καιρού στο κεντρικό και αυτόνομο νευρικό σύστημα μέσω αλλαγών της λειτουργικής κατάστασης του ανθρώπινου εγκεφάλου και της ψυχο – συναισθηματικής κατάστασης (Babayev et al., 2007; Babayev & Allahverdiyeva, 2007; Babayev, 2008)

β) έρευνες που αφορούν στη συχνότητα εμφραγμάτων του μυοκαρδίου, εγκεφαλικών επεισοδίων και αιφνίδιων καρδιακών θανάτων (Stoupel, 1999; 2002; Stoupel et al., 2002b; 2005; 2006) και τέλος

γ) έρευνες που αφορούν σε τροχαία ατυχήματα (Dorman et al., 1999; 2001; Dorman, 2005; Stoupel et al., 2009).



Όσον αφορά στην **πρώτη κατηγορία** υπάρχουν αρκετά ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, στην πόλη Σόφια της Βουλγαρίας διεξήχθη έρευνα σε ομάδα 86 εθελοντών (33 άνδρες και 53 γυναίκες με μέσο όρο ηλικίας  $47.8 \pm 11.9$  έτη) για τις χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2001 έως 9<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2001 και 8<sup>η</sup> Απριλίου 2002 έως 28<sup>η</sup> Μαΐου 2002, δηλαδή περιόδους υψηλής ηλιακής και γεωμαγνητικής δραστηριότητας (Dimitrova et al., 2004a; b; Dimitrova, 2006a; b; 2007; 2008a; b; 2009; Dimitrova et al., 2009a). Όπως αναφέρεται, ημερήσιες τιμές καρδιακού ρυθμού, μέσης αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης και ψυχο – φυσιολογικών παραπόνων μελετήθηκαν σε συνδυασμό με μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (γεωμαγνητικοί δείκτες Ap και Dst) και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Συνολικά αναλύθηκαν 2799 μετρήσεις για κάθε παράμετρο (Dimitrova et al., 2004a; 2009a). Όπως προκύπτει από τη συγκεκριμένη μελέτη η μέση αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση αυξήθηκαν στατιστικά σημαντικά κατά τη διάρκεια αυξημένης γεωμαγνητικής δραστηριότητας και μειώσεων της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας (Dimitrova et al., 2004a; Dimitrova, 2007; 2008a; b; 2009). Περαιτέρω βρέθηκε ότι η επίδραση των μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου στην ανθρώπινη κατάσταση φαίνεται να επηρεάζεται από το φύλο, με τις γυναίκες να είναι πιο ευαίσθητες (Stoupelet et al., 2005; Dimitrova, 2008a) καθώς επίσης και από τη λήψη φαρμακευτικής αγωγής σχετική με την υπέρταση (Dimitrova 2006a; b; 2008a).

Επιπλέον από την ίδια έρευνα προκύπτει ότι ενώ η δυναμική της αρτηριακής πίεσης παρουσιάζει αντισταθμιστική αντίδραση του οργανισμού για προσαρμογή, ο καρδιακός ρυθμός για υγιείς ανθρώπους (κυρίως σε μεσαία πλάτη) μπορεί να θεωρηθεί ως μία σταθερή καρδιαγγειακή παράμετρος, η οποία δεν είναι τόσο ευαίσθητη σε μεταβολές του περιβάλλοντος, δηλαδή δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αντίδραση στις γεωμαγνητικές μεταβολές ή στις διάφορες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Babayev, 2008; Dimitrova, 2009; Dimitrova et al., 2009a).

Επίσης, στην πόλη Kosice της Σλοβακίας έγινε μία μελέτη για τη χρονική περίοδο 1994 – 2004 χρησιμοποιώντας τις ιατρικές μετρήσεις για μία ομάδα 4018 αεροπόρων προκειμένου να μελετηθεί η πνευματική απόδοση και η ψυχο – φυσιολογική κατάσταση της υγείας τους σε σχέση με τις συνθήκες του διαστημικού

καιρού (Dzvonik et al., 2006). Συγκεκριμένα οι τιμές του καρδιακού ρυθμού σε φόρτο εργασίας είναι μικρότερες κατά τη διάρκεια του μεγίστου της ηλιακής δραστηριότητας σε σχέση με περιόδους ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας. Τα αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν για την αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση.

Η επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας στη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, της ανθρώπινης υγείας και της ψυχο – συναισθηματικής κατάστασης μελετήθηκε στην περιοχή του Baku στο Αζερμπαϊτζάν (Babayev & Allahverdiyeva, 2007; Babayev, 2008). Το συγκεκριμένο πείραμα κάλυψε τη χρονική περίοδο προ – μεγίστου, μεγίστου αλλά και την καθοδική φάση του 23ου ηλιακού κύκλου και τα ιατρικά δεδομένα, που προήλθαν από μετρήσεις σε 27 υγιείς εθελοντές (γυναίκες μόνο), αναλύθηκαν σε σχέση με μεταβολές των γεωμαγνητικών δεικτών Ap και Dst. Επιβεβαιώθηκε ότι για μεσαία γεωγραφικά πλάτη η ανθρώπινη φυσιολογία και ψυχολογία επηρεάζεται από τις γεωμαγνητικές διαταραχές. Η ίδια έρευνα κατέληξε στο ότι το άγχος και η ικανότητα συγκέντρωσης και εργασίας μπορεί να επηρεάζονται από τη γεωμαγνητική δραστηριότητα και έτσι η ανάγκη να κατανοηθεί ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ διαστημικού καιρού και ανθρώπινης φυσιολογίας είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αποφευχθούν ή να θεραπευτούν τυχόν ασθένειες.

Όσον αφορά στη **δεύτερη κατηγορία** υπάρχει μία πληθώρα ερευνών οι οποίες αναφέρονται στην πιθανή εξάρτηση της συχνότητας καρδιαγγειακών ή μη ασθενειών ή και θανάτων από την ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα αλλά και από τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Μάλιστα οι Dorman et al. (2001) και StoupeI (2002) υποστηρίζουν ότι οι καρδιαγγειακές ασθένειες επηρεάζονται από τον διαστημικό καιρό τόσο μακροπρόθεσμα (ηλιακή δραστηριότητα) όσο και βραχυπρόθεσμα (μειώσεις Forbush). Οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας μπορούν να θεωρηθούν ως ευαίσθητοι δείκτες της σχέσης μεταξύ των γεωμαγνητικών διαταραχών και των παραμέτρων υγείας, όπως ισχαιμικά επεισόδια και καρδιακά εμφράγματα (Villoresi et al., 1994a; b; 1998; Ptitsyna et al., 1996; Dorman et al., 1999). Τα πιο ουσιώδη και στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα που αφορούν σε καρδιακά εμφράγματα και εγκεφαλικά επεισόδια παρατηρούνται σε μέρες γεωμαγνητικών διαταραχών που συνοδεύονται από μειώσεις Forbush (Villoresi et al., 1994a; 1995; Dorman, 2005) και κυρίως κατά

την κύρια φάση της μείωσης (Dorman, 2005). Όπως προκύπτει για την κύρια φάση της μείωσης Forbush ο μέσος αριθμός εμφραγμάτων και εγκεφαλικών αυξάνεται κατά  $(10.5 \pm 1.2)\%$  και  $(7.0 \pm 1.7)\%$  αντίστοιχα (Dorman et al., 2001; Dorman, 2005).

Πρέπει να αναφερθεί ότι στην προσπάθεια μίας συγκεντρωτικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων του, ο Dorman (2005) επέκτεινε την κλίμακα του National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) για τις γεωμαγνητικές καταιγίδες. Έτσι, για τις ισχυρές γεωμαγνητικές καταιγίδες συμπεριλαμβάνονται στην κλίμακα αυτή όχι μόνο οι επιδράσεις τους στη λειτουργία και αξιοπιστία διαφόρων τεχνολογικών συστημάτων αλλά και οι αντίστοιχες βιολογικές τους επιδράσεις (Σχ. 7.1).

Περαιτέρω έχουν βρεθεί περιοδικότητες στα καρδιαγγειακά επεισόδια (Cornelissen et al., 2005) και τον αριθμό των αιφνίδιων καρδιακών θανάτων (Babayev et al., 2007) και εξετάζεται η σχέση τους με τις περιοδικότητες των γεωμαγνητικών φαινομένων του ηλιακού κύκλου. Μάλιστα το διεθνές πρόγραμμα BIOCOS (BIOSphere and COSmos), έχει ως στόχο να παρακολουθήσει, να καταγράψει και να αναλύσει τις μεταβολές των ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες και σε σχέση με τα γεωμαγνητικά φαινόμενα και την ηλιακή δραστηριότητα (Cornelissen et al., 2002).

Επίσης, σε έρευνα που διεξήχθη στην περιοχή του Baku μελετήθηκε η πιθανή σχέση του αριθμού των αιφνίδιων καρδιακών θανάτων με την ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα (Dimitrova et al., 2009b). Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν 788 περιπτώσεις αιφνίδιων καρδιακών θανάτων από τα επείγοντα και από όλους τους σταθμούς πρώτων βοηθειών στο Baku σε σχέση με τις μεταβολές διαφόρων γεωμαγνητικών δεικτών και διαφόρων τύπων γεωμαγνητικών καταιγίδων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου μπορούν να επηρεάσουν τον αριθμό των περιστατικών αιφνίδιων καρδιακών θανάτων, ο οποίος παρουσιάζεται αυξημένος σε περιόδους χαμηλής γεωμαγνητικής δραστηριότητας αλλά και σε ημέρες ανάπτυξης γεωμαγνητικών καταιγίδων υψηλής έντασης, όπως επίσης και τη δεύτερη ημέρα μετά από αυτές.

Geomagnetic Storms		Effects	Number per solar cycle
G5	Extreme Kp = 9	<p><b>Biological effects:</b> increasing more than 10-15% of the daily rate of myocardial infarction, brain strokes and car road accident traumas for the population on the ground.</p> <p><b>Power systems:</b> widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience a complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites.</p> <p><b>Other systems:</b> pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours.</p>	4 per cycle (4 days per cycle)
G4	Severe Kp = 8	<p><b>Biological effects:</b> increasing several percent (up to 10-15%) of the daily rate of myocardial infarction, brain strokes and car road accident traumas for the population on the ground.</p> <p><b>Power systems:</b> possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems.</p> <p><b>Other systems:</b> induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted.</p>	100 per cycle (60 days per cycle)
G3	Strong Kp = 7	<p><b>Biological effects:</b> increasing a few percent of the daily rate of myocardial infarction, brain strokes and car road accident traumas for the population on the ground.</p> <p><b>Power systems:</b> voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems.</p> <p><b>Other systems:</b> intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent.</p>	200 per cycle (130 days per cycle)

Σχ. 7.1 Η κλίμακα του NOAA σχετικά με τις επιδράσεις των ισχυρών (τύπου G3, G4, G5) γεωμαγνητικών καταιγίδων που συνοδεύονται από μειώσεις Forbush σε τεχνολογικά συστήματα και οι αντίστοιχες βιολογικές τους επιδράσεις (Dorman, 2005).

Πρόσφατες μελέτες (Stoupel et al., 2006; Stoupel et al., 2007a) που αφορούν σε ηλιοβιολογικά δεδομένα (οξέα καρδιακά εμφράγματα από 21 σταθμούς πρώτων βοηθειών) από το Baku για τη χρονική περίοδο 2003 – 2005 δείχνουν ότι ο αριθμός των αιφνίδιων καρδιακών θανάτων και των περιστατικών θανάτων, πριν την εισαγωγή σε νοσοκομεία, από οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου αυξήθηκε τις ημέρες με τα υψηλότερα και χαμηλότερα ημερήσια επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας όπως επίσης και τις ημέρες με υψηλή δραστηριότητα στις κοσμικές ακτίνες όπως αυτή καταγράφηκε από τους επίγειους μετρητές νετρονίων.

Επίσης, έχει μελετηθεί η επίδραση της ηλιακής και γεωμαγνητικής δραστηριότητας στον αριθμό περιστατικών οξέων καρδιακών εμφραγμάτων σε δύο παράλληλες έρευνες στις πόλεις της Σόφιας και του Baku (Dimitrova et al., 2009c). Από την ημερήσια κατανομή του αριθμού των ασθενών με διάγνωση οξέος καρδιακού εμφράγματος (1192 περιπτώσεις) στη Σόφια, για την περίοδο 1<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 1995 έως 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2004 και την αντίστοιχη για το Baku (4479 περιπτώσεις), για την περίοδο 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2003 έως 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2005, πρόεκυψε ότι υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ του αριθμού των οξέων καρδιακών εμφραγμάτων και των γεωμαγνητικών δεικτών. Περαιτέρω, τα περιστατικά οξέων καρδιακών εμφραγμάτων αυξήθηκαν από μία ημέρα πριν έως και μία ημέρα μετά από την εκδήλωση γεωμαγνητικών καταιγίδων διαφορετικών εντάσεων.

Την επίδραση της ηλιακής και γεωμαγνητικής δραστηριότητας αλλά και των μεταβολών στην ένταση των κοσμικών ακτίνων στον μηνιαίο αριθμό οξέων εμφραγμάτων του μυοκαρδίου, σε άνδρες και γυναίκες ξεχωριστά, μελέτησε και ο Stoupel et al. (2005). Η έρευνα αυτή βασίζεται σε 16683 ασθενείς στην περιοχή Kaunas (Λιθουανία) για το χρονικό διάστημα 1983 – 1999. Πρόεκυψε σημαντική αντισυσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα και τους γεωμαγνητικούς δείκτες και συσχέτιση με τα επίπεδα δραστηριότητας των κοσμικών ακτίνων. Η συσχέτιση ήταν πιο ισχυρή στις γυναίκες από ότι στους άνδρες.

Μία άλλη έρευνα αναφέρεται στην κατανομή των μηνιαίων θανάτων στη Λιθουανία σε σχέση με την ηλιακή, γεωμαγνητική και κοσμική δραστηριότητα. Η μελέτη αυτή ολοκληρώθηκε σε τέσσερα στάδια. Αρχικά η βάση δεδομένων αφορούσε στη χρονική περίοδο 1990 – 1999 και περιελάμβανε 424925 περιπτώσεις θανάτων

που οφείλονται σε ισχαιμική καρδιοπάθεια, εγκεφαλικό, ατυχήματα τροχαία ή μη, αυτοκτονίες αλλά και θανάτων που δεν οφείλονται σε καρδιαγγειακά αίτια (Stoupelet et al., 2002a). Στη συνέχεια το δείγμα αυξήθηκε και περιελάμβανε δεδομένα για τη χρονική περίοδο 1990 – 2001, όπου πλέον ο αριθμός των υπό μελέτη θανάτων έφτασε τους 504243 (Stoupelet et al., 2004). Έπειτα ο αριθμός των υπό ανάλυση θανάτων (630205 συνολικά) κάλυπτε την περίοδο 1990 – 2004 (Stoupelet et al., 2007b) και τέλος το συνολικό δείγμα αναφέρεται στο χρονικό διάστημα 1990 – 2005 με 674004 περιπτώσεις θανάτων (Stoupelet et al., 2007c). Όπως προκύπτει από την έρευνα αυτή ο συνολικός μηνιαίος αριθμός θανάτων (ολικός, εγκεφαλικά, αυτοκτονίες και θάνατοι που οφείλονται σε μη καρδιαγγειακά αίτια) αντισυσχετίζεται σημαντικά με την ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα και συσχετίζεται σημαντικά με την κοσμική ακτινοβολία.

Επίσης, σε μία πρόσφατη μελέτη που διεξήχθη από την Ομάδα Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών σε συνεργασία με την Ομάδα του Εθνικού Αστροφυσικού Παρατηρητηρίου της πόλης Tbilisi της Γεωργίας μελετήθηκε η πιθανή σχέση του αριθμού των περιστατικών αρρυθμιών (υπερκοιλιακές έκτακτες συστολές, παροξυσμική υπερκοιλιακή ταχυκαρδία, κοιλιακές έκτακτες συστολές και πολλαπλές κοιλιακές έκτακτες συστολές) 1902 ασθενών, όπως αυτός προέκυψε από ηλεκτροκαρδιογραφήματα διαφόρων νοσοκομείων, με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, τη γεωμαγνητική δραστηριότητα (δείκτες Ap και Dst), τον αριθμό των εκλάμψεων (C, M και X), τον αριθμό των ηλιακών κηλίδων  $R_z$  και τον αριθμό των ηλιακών πρωτονικών γεγονότων SPE για το διάστημα 1983-1992 (Γιανναροπούλου, 2012). Όπως προκύπτει από την παραπάνω μελέτη οι μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και η αυξημένη ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα δείχνουν να συνδέονται με αύξηση των περιστατικών αρρυθμιών. Συγκεκριμένα, ορισμένοι τύποι αρρυθμιών εμφανίζουν διπλό μέγιστο πλησίον του διπλού μεγίστου που εμφανίζουν η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, οι δείκτες Ap και Dst, οι εκλάμψεις M και X και τα ηλιακά πρωτονικά γεγονότα (SPE). Αυτό το δευτερογενές μέγιστο συμπίπτει με τα έντονα γεγονότα της ηλιακής δραστηριότητας του έτους 1991. Επίσης, παρουσιάζεται αντιστροφή της συσχέτισής των αρρυθμιών με τις ηλιακές και διαπλανητικές παραμέτρους (από θετική σε αρνητική και τανάπαλι) κατά τα έτη 1988 – 1989, τα οποία συμπίπτουν με την αλλαγή πολικότητας του ηλιακού μαγνητικού πεδίου που συμβαίνει κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεγίστου

(Γιανναροπούλου, 2012). Είναι αξιοσημείωτο ότι οι Gigolashvili et al. (2010) μελετώντας τα παραπάνω δεδομένα επεσήμαναν πιθανή επίδραση της αλλαγής της πολικότητας του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου στις περιπτώσεις των αρρυθμιών κατά τη διάρκεια της 27ήμερης συνοδικής περιστροφής της Γης.

Τέλος, στη **τρίτη κατηγορία** περιλαμβάνονται έρευνες σχετικά με το πώς μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου, όπως για παράδειγμα οι γεωμαγνητικές καταιγίδες, μπορούν να επηρεάσουν το νευρικό σύστημα και επομένως να σχετίζονται και με τροχαία ατυχήματα (εργατικά ή και κυκλοφορίας), που οφείλονται σε άγχος, νευρικές ή καθυστερημένες αντιδράσεις (Ashikaliev et al., 1995; Ptitsyna et al., 1996; Dorman et al., 2001).

Οι μελέτες πάνω σε αυτό το θέμα έχουν ήδη ξεκινήσει πριν από πολλά χρόνια, αφού οι Reiter (1955) και König & Ankermuller (1960) είχαν συσχετίσει τα εργατικά και τα τροχαία ατυχήματα με τον χρόνο αντίδρασης, ο οποίος με τη σειρά του συνδεόταν με διαταραχές του γεωμαγνητικού πεδίου. Υψηλή συσχέτιση μεταξύ τροχαίων ατυχημάτων και γεωμαγνητικών διαταραχών προέκυψε και από τη μελέτη του Dubron (1974) για δεδομένα κυκλοφοριακών ατυχημάτων σε διάφορες μεγάλες πόλεις.

Υπάρχουν, όμως, και πολλές πρόσφατες μελέτες πάνω σε αυτό το πεδίο. Στον Alania et al. (2001) παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση της επίδρασης της ηλιακής και γεωμαγνητικής δραστηριότητας αλλά και των μειώσεων Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στα τροχαία ατυχήματα στην Πολωνία για τη χρονική περίοδο 1990 – 1999. Μάλιστα όπως αναφέρεται στον Dorman (2005) μετά από τη στατιστική επεξεργασία αρκετών εκατομμυρίων ιατρικών περιστατικών στη Μόσχα και την Αγ. Πετρούπολη (Ρωσία) τα πιο σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται για τα κυκλοφοριακά ατυχήματα που σημειώνονται σε ημέρες γεωμαγνητικών διαταραχών που συνοδεύονται από μειώσεις Forbush, αφού όπως έχει βρεθεί, ο μέσος αριθμός τους αυξάνεται κατά την κύρια φάση της μείωσης κατά  $(17.4 \pm 3.1)\%$  (Dorman et al., 2001; Dorman, 2005). Στο Σχ. 7.1 δίνεται και η αναμενόμενη ποσοστιαία αύξηση των τραυματιών των τροχαίων ατυχημάτων για τους τρεις ισχυρότερους τύπους γεωμαγνητικής καταιγίδας (τύπους G3, G4 και G5) σύμφωνα με την ‘NOAA Space Weather Scale for Geomagnetic Storms’.

Στους Dorman et al. (2001) αναφέρεται ότι ημερήσια και μηνιαία δεδομένα που αφορούν σε δυσλειτουργίες/βλάβες και ατυχήματα στον Σιβηρικό Σιδηρόδρομο για την περίοδο 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1986 έως 30<sup>η</sup> Νοεμβρίου 1993 αναλύθηκαν σε σχέση με παραμέτρους του διαστημικού καιρού. Τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε δύο ομάδες ανάλογα με το αν τα ατυχήματα των τρενών οφείλονταν σε τεχνικά προβλήματα ή σε ανθρώπινο λάθος. Προέκυψε ότι οι μεταβολές του διαστημικού καιρού δεν συνδέονται με τα ατυχήματα λόγω μηχανικών βλαβών. Από την άλλη η σχέση τους με αυτά που οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος είναι στατιστικά σημαντική (Dorman et al., 2001).

Μία άλλη έρευνα αναφέρεται στην επίδραση του επιπέδου της γεωμαγνητικής δραστηριότητας στα τροχαία ατυχήματα στην περιοχή Irkutsk (Ρωσία) για τη χρονική περίοδο 2000 – 2003 (Krauchenko et al., 2005). Στη μελέτη των Stoupelet et al. (2004) και Stoupelet et al. (2007b; c) ο μηνιαίος αριθμός τροχαίων ατυχημάτων συσχετίζεται με την ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα και αντισυσχετίζεται με την κοσμική ακτινοβολία.

Η πιθανή επίδραση της φυσικής δραστηριότητας (ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα και μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας) στον αριθμό τροχαίων ατυχημάτων για τη χρονική περίοδο 2000 – 2005 στην περιοχή του Baku μελετάται στους Stoupelet et al. (2009). Από την ανάλυση του δείγματος 7160 σοβαρών τροχαίων ατυχημάτων που σχετίζονταν με 7558 περιπτώσεις θανάτου και 1647 περιπτώσεις σοβαρού τραυματισμού προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι ο μηνιαίος αριθμός τροχαίων ατυχημάτων και θυμάτων σχετίζεται με τα επίπεδα φυσικής δραστηριότητας. Υπάρχει σημαντική συσχέτιση με τη δραστηριότητα στις κοσμικές ακτίνες και αντισυσχέτιση με την ηλιακή δραστηριότητα.

### **7.3 Λειτουργία της καρδιάς και ηλεκτροκαρδιογράφημα**

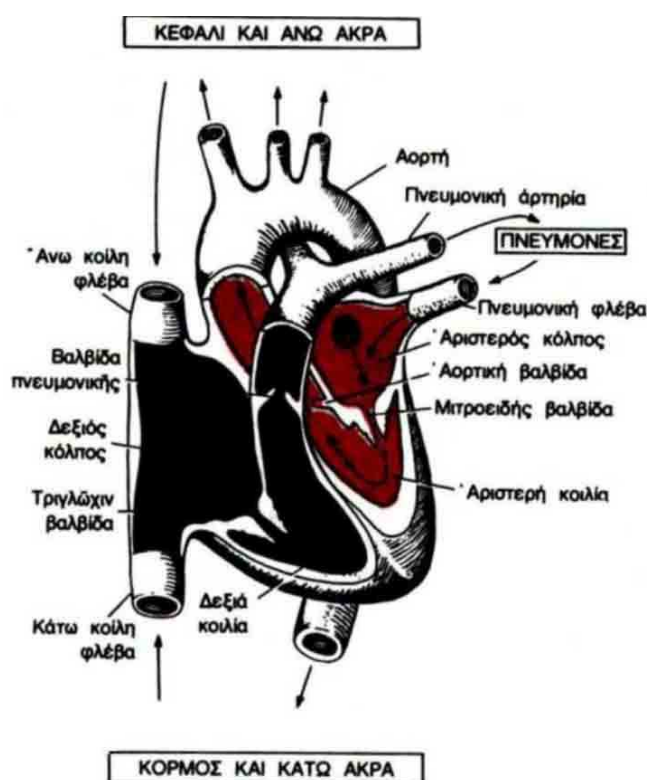
Στη συνέχεια και προτού εξετασθούν οι επιδράσεις της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού θα γίνει μία σύντομη αναφορά στη λειτουργία της ανθρώπινης φυσιολογίας. Συγκεκριμένα, θα δοθεί μία περιληπτική



περιγραφή της λειτουργίας της καρδιάς και θα οριστούν οι κυριότερες ιατρικές παράμετροι που θα αναλυθούν παρακάτω.

### 7.3.1 Καρδιακός ρυθμός και διάστημα RR

Ως γνωστόν η καρδιά είναι ένα μυώδες όργανο που λειτουργεί ως αντλία αίματος. Παίρνει αίμα από τις φλέβες και στη συνέχεια το εκτοξεύει προς τις αρτηρίες. Η λειτουργία αυτή επιτελείται επειδή το μυοκάρδιο συστέλλεται και χαλαρώνει διαδοχικά. Η συστολή και η χαλάρωση δεν γίνεται τυχαία αλλά επαναλαμβάνεται περιοδικά. Δηλαδή η λειτουργία της καρδιάς είναι η περιοδική διαδοχή τριών φαινομένων στη σειρά: της διέγερσης και συστολής των κόλπων, της διέγερσης και συστολής των κοιλιών και της καρδιακής παύλας. Τα τρία αυτά φαινόμενα αποτελούν τον καρδιακό παλμό (Παπαηλιού, 2008).



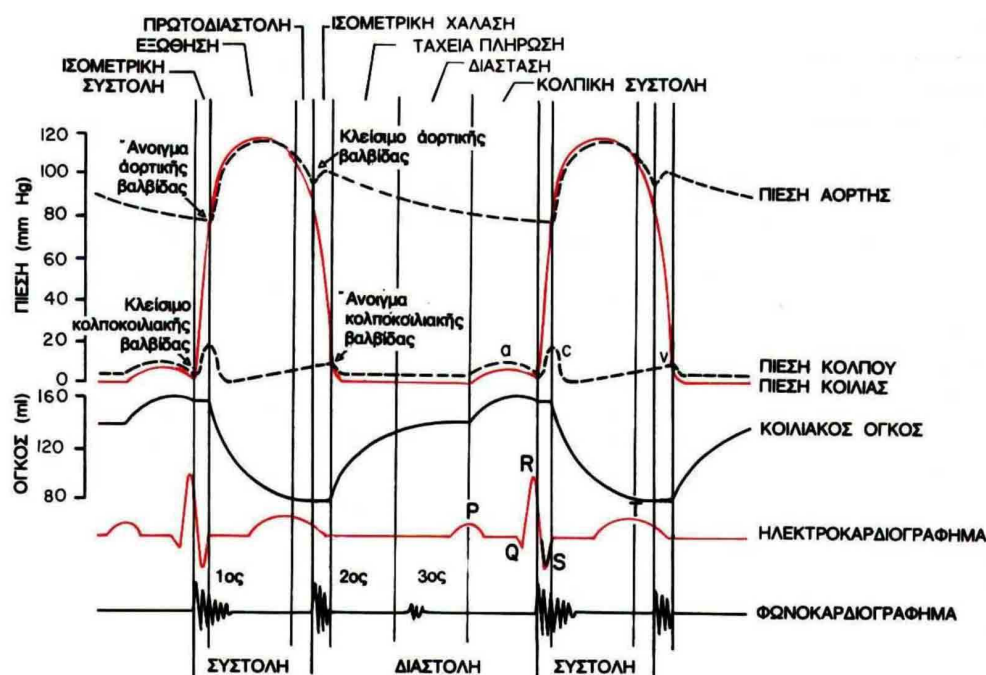
Σχ. 7.2 Η καρδιά και η πορεία του αίματος διάμεσου των καρδιακών κοιλοτήτων ([http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2\\_ECG.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2_ECG.pdf)).

Πιο συγκεκριμένα, η καρδιά αποτελείται από 4 ξεχωριστές αντλίες, δύο προαντλίες, τους κόλπους (atria) και δύο προωθητικές αντλίες, τις κοιλίες (ventricles) (Σχ. 7.2). Ως καρδιακός παλμός ορίζεται η χρονική περίοδος από το τέλος μίας συστολής της καρδιάς μέχρι το τέλος της επόμενης συστολής. Ο κάθε καρδιακός παλμός αρχίζει με την αυτόματη γένεση ενός δυναμικού ενέργειας στον φλεβόκομβο. Αυτός ο κόμβος εντοπίζεται στο πρόσθιο τμήμα του δεξιού κόλπου, κοντά στην εκβολή της άνω κοίλης φλέβας, το δε δυναμικό ενέργειας επεκτείνεται ταχύτατα και στους δύο κόλπους και από εκεί μέσα από το κολποκοιλιακό δεμάτιο προς τις κοιλίες. Όμως, εξαιτίας της ειδικής διαρρύθμισης του συστήματος αγωγής από τους κόλπους στις κοιλίες, παρατηρείται καθυστέρηση κάπως μεγαλύτερη από 1/10 sec για τη δίοδο της διέγερσης από τους κόλπους στις κοιλίες. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται στους κόλπους η ευκαιρία να συστέλλονται πριν από τις κοιλίες, με αποτέλεσμα την άντληση αίματος προς τις κοιλίες πριν από την έντονη κοιλιακή συστολή. Έτσι, οι κόλποι λειτουργούν σαν εναυσματικές αντλίες για τις κοιλίες, οι οποίες με τη σειρά τους παρέχουν την κύρια πηγή της δύναμης για την προώθηση του αίματος μέσα από το αγγειακό σύστημα ([http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2\\_ECG.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2_ECG.pdf)).

Στο σχήμα 7.3 παριστάνονται τα διάφορα γεγονότα τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του καρδιακού παλμού. Οι άνω τρεις καμπύλες παριστάνουν τις μεταβολές της πίεσης μέσα στην αορτή, μέσα στην αριστερή κοιλία και μέσα στον αριστερό κόλπο αντίστοιχα. Η τέταρτη καμπύλη παριστάνει τις μεταβολές του όγκου των κοιλιών, η πέμπτη είναι το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) και η έκτη είναι το καρδιοφωνογράφημα, το οποίο αποτελεί την καταγραφή των ήχων της καρδιάς κατά την αντλητική της λειτουργία ([http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/CHAPTER\\_3\\_FYSIOLOGIA\\_KARDIAS.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/CHAPTER_3_FYSIOLOGIA_KARDIAS.pdf)).

Το ΗΚΓ χρησιμοποιείται για να απεικονίσει την καρδιακή δραστηριότητα μέσα από τα ηλεκτρικά σήματα που καταγράφει. Έτσι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.3, στο ΗΚΓ καταγράφονται τα επάρματα (κύματα) P, QRS και T που είναι χαρακτηριστικά σημεία της καρδιακής δραστηριότητας (<http://www.incardiology.gr>). Πρόκειται για ηλεκτρικά δυναμικά, τα οποία παράγονται από την καρδιά, καταγράφονται με τον ηλεκτροκαρδιογράφο από την επιφάνεια του σώματος και έχουν μία κανονική περιοδικότητα που ελέγχεται από τον φλεβόκομβο από όπου

προέρχεται και η αρχική διέγερση. Ο φλεβόκομβος ελέγχει την καρδιακή λειτουργία όσον αφορά στη συχνότητα, γιατί η συχνότητα της ρυθμικής του διέγερσης είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα αυτοδιέγερσης οποιουδήποτε άλλου τμήματος της καρδιάς. Για το λόγο αυτό ο φλεβόκομβος θεωρείται ο φυσικός βηματοδότης της καρδιάς.

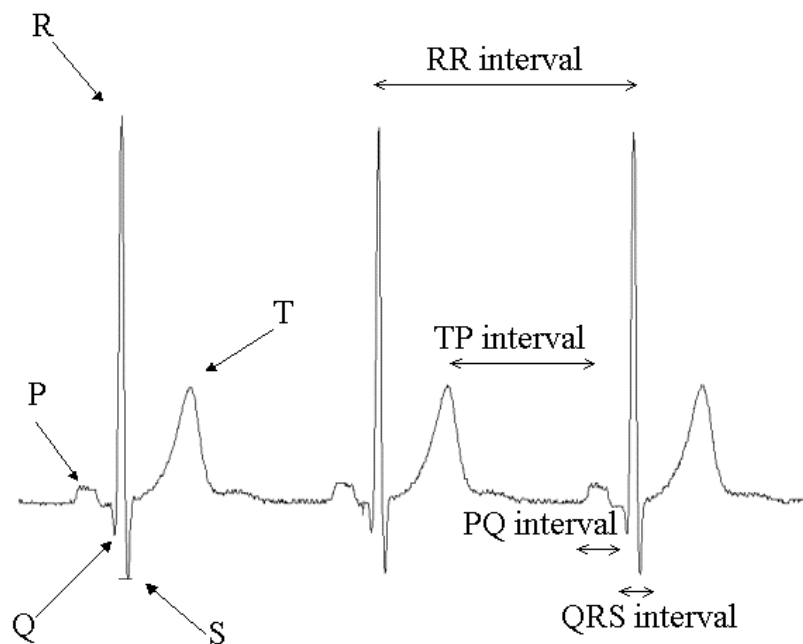


Σχ. 7.3 Τα φαινόμενα του καρδιακού κύκλου με τις μεταβολές της πίεσης στον αριστερό κόλπο, την αριστερή κοιλία και την αορτή, τις μεταβολές του όγκου των κοιλιών, το ηλεκτροκαρδιογράφημα και το φωνοκαρδιογράφημα ([http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2\\_ECG.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2_ECG.pdf)).

Ο ρυθμός της καρδιακής λειτουργίας μπορεί να καθοριστεί εύκολα από το ηλεκτροκαρδιογράφημα, γιατί το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο διαδοχικών καρδιακών παλμών είναι το αντίστροφο του καρδιακού ρυθμού. Για παράδειγμα, εάν το χρονικό διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο διαδοχικών καρδιακών παλμών, όπως καθορίζεται από τις γραμμές βαθμονόμησης στο ΗΚΓ, είναι 1 sec, τότε ο καρδιακός ρυθμός είναι 60 καρδιακοί παλμοί το λεπτό. Ο καρδιακός ρυθμός είναι η συχνότητα των καρδιακών παλμών και μπορεί να κυμανθεί από 60 έως και 100 καρδιακούς παλμούς το λεπτό (beats/min) για έναν υγιή ενήλικα

σε κατάσταση ξεκούρασης (<http://www.incardiology.gr>). Τα παιδιά έχουν υψηλότερο ρυθμό μέχρι και 120 (beats/min), ενώ αντίθετα ένας αθλητής σε καλή φυσική κατάσταση μπορεί να έχει ακόμα και 40-50 (beats/min).

Η ηλεκτρική τάση των κυμάτων σε ένα φυσιολογικό ΗΚΓ εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια στην επιφάνεια του σώματος. Για παράδειγμα, όταν το ένα ηλεκτρόδιο τοποθετείται αμέσως πάνω από την καρδιά και το άλλο σε ένα άλλο σημείο του σώματος, η ηλεκτρική τάση του συμπλέγματος επαρμάτων QRS μπορεί να φτάσει τα 3 ή 4mV, ενώ όταν και τα δύο ηλεκτρόδια τοποθετηθούν σε δύο άκρα του σώματος, η ηλεκτρική τάση είναι συνήθως 1mV από την κορυφή του επάρματος R μέχρι το κάτω μέρος του επάρματος S. Εξάλλου, η ηλεκτρική τάση του επάρματος P είναι 0.1 έως 0.3mV, ενώ του επάρματος T από 0.2 έως 0.3mV.



Σχ. 7.4 Συνηθισμένη μορφή ΗΚΓ με 3 καρδιακούς παλμούς. Με βέλη υποδεικνύονται οι χαρακτηριστικές συνιστώσες και τα χρονικά διαστήματα (Λουκάς, 2009).

Το έπαρμα R είναι μία πολύ χαρακτηριστική μορφή ενός ΗΚΓ με το ηλεκτρικό δυναμικό να καταγράφει την υψηλότερη τιμή του κατά τη φάση

εκπόλωσης των κοιλιών πριν από τη συστολή τους. Στο σχήμα 7.4 φαίνεται μία ακόμα συνηθισμένη μορφή ηλεκτροκαρδιογραφήματος, όπου φαίνεται και το διάστημα RR (RR interval) που είναι το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές R όπως καταγράφονται σε ένα ΗΚΓ. Οι μετρήσεις του διαστήματος RR έχουν ιδιαίτερη καρδιολογική σημασία στη μελέτη και την πρόγνωση καρδιακών παθήσεων όπως σε άτομα χωρίς προηγούμενο ιστορικό, την καρδιακή αρρυθμία και τη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού (Λουκάς, 2009). Η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για την καρδιακή υγεία: μειώσεις στη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την πρόγνωση καρδιακών παθήσεων, όπως η στεφανιαία νόσος και τα εμφράγματα του μυοκαρδίου.

### 7.3.2 Αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση

Ως πίεση του αίματος ορίζεται η πίεση που ασκεί το αίμα στα τοιχώματα των αγγείων μέσα στα οποία ρέει. Η καρδιακή λειτουργία και οι αντιστάσεις που προβάλλουν τα τοιχώματα των αγγείων στη ροή του αίματος είναι παράγοντες που επηρεάζουν την πίεση αίματος. Πρόκειται για ένα φυσικό μέγεθος, που η μέτρησή του με τη βοήθεια ειδικών μηχανημάτων, παρέχει στον ιατρό σημαντικές πληροφορίες για τη ψυχοσωματική κατάσταση του οργανισμού. Ανάλογα με το είδος του αγγείου στο οποίο ρέει το αίμα και στο οποίο γίνεται η μέτρηση της πίεσης διακρίνεται η αρτηριακή (arterial blood pressure), η φλεβική και η τριχοειδική πίεση. Παρακάτω οι μετρήσεις αναφέρονται στην αρτηριακή πίεση.

Η αρτηριακή πίεση είναι η πίεση στην αορτή και τις άλλες μεγάλες αρτηρίες του σώματος. Κατά τη διάρκεια ενός καρδιακού παλμού η αρτηριακή πίεση φθάνει σε μία μέγιστη τιμή κατά την καρδιακή συστολή και την εξώθηση του αίματος από την καρδιά προς την αορτή (συστολική πίεση, systolic blood pressure) και στη συνέχεια κατέρχεται σε μία ελάχιστη τιμή κατά τη διαστολική φάση του καρδιακού κύκλου (διαστολική πίεση, diastolic blood pressure).

Τα φυσιολογικά όρια της αρτηριακής πίεσης είναι 10 – 15cm στήλης Hg για τη συστολική πίεση και 6 – 9cm στήλης Hg για τη διαστολική πίεση. Η διαφορά πίεσης μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής λέγεται διαφορική πίεση. Η αρτηριακή

πίεση μεγαλώνει με την αύξηση της ηλικίας του ατόμου και επηρεάζεται από το φύλο του και τα σωματομετρικά του μεγέθη (ύψος, βάρος).

## 7.4 Μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης

Στη συνέχεια θα περιγραφούν βασικές αρχές της στατιστικής ανάλυσης καθώς επίσης και η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επεξεργασία των δεδομένων των συγκεκριμένων πειραμάτων.

### 7.4.1 Στατιστικές υποθέσεις και επίπεδο σημαντικότητας

Μία ερευνητική υπόθεση μπορεί να ελεγχθεί στατιστικά στη βάση μίας ή περισσότερων στατιστικών υποθέσεων. Κατά τη διαδικασία της στατιστικής απόδειξης των στατιστικών υποθέσεων (διατυπωμένες συνήθως στη μορφή λογικών προτάσεων ή απλών μαθηματικών σχέσεων) που αφορούν παραμέτρους πληθυσμών διατυπώνονται δύο υποθέσεις, η πρώτη υπόθεση ονομάζεται μηδενική (null hypothesis)  $H_0$  και η δεύτερη εναλλακτική (alternative hypothesis)  $H_1$  (Καραγεώργος, 2010).

Μία στατιστική υπόθεση που περιλαμβάνει οπωσδήποτε το ενδεχόμενο ότι δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των παραμέτρων δύο πληθυσμών ή ότι οι παράμετροι είναι ίσες με ορισμένες σταθερές (υποθετικές) τιμές καλείται μηδενική υπόθεση (Καραγεώργος, 2010). Είναι αυτή η σχέση ισότητας που ελέγχεται στατιστικά στη συνέχεια. Για παράδειγμα μία μηδενική υπόθεση μπορεί να είναι το ότι οι μέσες τιμές από τις μεταβλητές  $\alpha$  και  $\beta$  είναι ίσες, δηλαδή  $H_0: \mu_\alpha = \mu_\beta$ . Η εναλλακτική υπόθεση είναι μία στατιστική υπόθεση η οποία αποτελεί τη λογική εναλλακτική της σχέσης που περιλαμβάνεται στη μηδενική υπόθεση, δηλαδή στο πιο πάνω παράδειγμα η εναλλακτική υπόθεση θα είναι  $H_1: \mu_\alpha \neq \mu_\beta$ . Ένα άλλο παράδειγμα είναι η μηδενική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα σε δύο μεταβλητές (δηλαδή, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  ανάμεσα στις μεταβλητές ισούται με μηδέν),  $H_0: r = 0$ , και έτσι η εναλλακτική υπόθεση θα είναι  $H_1: r \neq 0$ .

Κατά τη διάρκεια ενός στατιστικού ελέγχου το ζητούμενο είναι μία σωστή στατιστική απόφαση ή η βεβαιότητα ότι η πιθανότητα για μία λανθασμένη απόφαση

είναι πολύ μικρή. Για τον σκοπό αυτό επιλέγεται μία συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας αυτής που ονομάζεται επίπεδο σημαντικότητας (significance level). Η ελάχιστη τιμή του επιπέδου σημαντικότητας που αντιστοιχεί στην απόρριψη μίας μηδενικής υπόθεσης λέγεται τιμή πιθανότητας  $p$  ή  $p$ -τιμή ελέγχου ( $p$ -value). Πρόκειται για ένα όριο κάτω από το οποίο μπορεί να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση ενώ πάνω από αυτό δεν μπορεί να απορριφθεί (Καραγεώργος, 2010). Ο ορισμός αυτής της τιμής είναι απαραίτητη προϋπόθεση για μία στατιστική απόφαση. Έτσι, η μηδενική υπόθεση που απορρίπτεται για μία συγκεκριμένη τιμή του επιπέδου στατιστικής σημαντικότητας  $p$  (π.χ. 0.05), ονομάζεται στατιστικώς σημαντική υπόθεση σε επίπεδο σημαντικότητας  $p$ . Η αποδοχή μίας μηδενικής υπόθεσης δεν σημαίνει ότι έχει αποδειχθεί ότι η υπόθεση αυτή είναι αληθινή, αλλά μόνο ότι δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για να απορριφθεί (STATISTICA Electronic Manual).

#### 7.4.2 Συσχετισμοί: ισχύς και αξιοπιστία

Ένα μέτρο της σύνδεσης δύο ή και περισσότερων μεταβλητών είναι οι μεταξύ τους συσχετισμοί (correlation analysis). Οι συντελεστές συσχέτισης, οι οποίοι προκύπτουν από τη μέθοδο συσχέτισης, κυμαίνονται από το -1.00 έως το +1.00, με την τιμή -1.00 να δηλώνει μία τέλεια αρνητική συσχέτιση και την τιμή +1.00 να δηλώνει μία τέλεια θετική συσχέτιση (STATISTICA Electronic Manual). Η τιμή 0.00 δείχνει ότι οι υπό εξέταση μεταβλητές δεν συσχετίζονται καθόλου. Η αρνητική συσχέτιση ανάμεσα σε δύο μεταβλητές σημαίνει ότι όταν οι τιμές της μίας μεταβλητής τείνουν να αυξηθούν, οι τιμές της άλλης τείνουν να μειωθούν, ενώ η θετική συσχέτιση σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή είτε αυξάνονται ή μειώνονται και οι δύο παράλληλα (Καραγεώργος, 2010).

Οι πιο συνηθισμένοι συντελεστές συσχέτισης είναι οι συντελεστές Pearson  $r$ , που ονομάζονται επίσης γραμμικοί ή product-moment συσχετισμοί. Λέγονται γραμμικοί γιατί περιγράφουν το κατά πόσο οι τιμές δύο μεταβλητών είναι 'αναλογικές' η μία ως προς την άλλη. Δηλαδή, μία συσχέτιση είναι μεγάλη, εάν μπορεί να παρασταθεί γραφικά με μία ευθεία γραμμή με θετική ή αρνητική κλίση. Η ευθεία αυτή λέγεται ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης (regression line) ή αλλιώς ευθεία ελαχίστων τετραγώνων και προκύπτει έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων

της απόστασης του κάθε σημείου δεδομένων από αυτή να είναι το ελάχιστο δυνατό (STATISTICA Electronic Manual).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις συσχετίσεις αυτές πρέπει οι μεταβλητές που εξετάζονται να έχουν μετρηθεί σε κλίμακα διαστημάτων (interval scale), δηλαδή να πρόκειται για ποσοτικά δεδομένα που οι τιμές τους μπορούν να συγκριθούν ως προς τις μεταβολές τους, αλλά όχι μεταξύ τους (Καραγεώργος, 2010). Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης δεν εξαρτάται από τις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται για κάθε μεταβλητή, για παράδειγμα οι συντελεστές συσχέτισης  $r$  ανάμεσα στο ύψος και το βάρος ενός πληθυσμού, είναι οι ίδιοι άσχετα αν το ύψος μετριέται σε εκατοστά ή ίντσες (STATISTICA Electronic Manual).

Για τον υπολογισμό της τιμής του συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r$  μεταξύ των μεταβλητών  $X$  και  $Y$  χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος (Καραγεώργος, 2010; <http://www.statsoft.com/textbook/>):

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (\bar{X} - X_i)^2 (\bar{Y} - Y_i)^2}} \quad (6.1)$$

όπου  $\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$  είναι το άθροισμα της διαφοράς των τιμών της μεταβλητής  $X$  από τον μέσο όρο τους επί τη διαφορά των τιμών της μεταβλητής  $Y$  από τον μέσο όρο τους (αναφέρεται και ως SP – Sum of Products of Deviations, ή  $S_{XY}$  – Sum of Cross-Products),  $\sum (\bar{X} - X_i)^2$  είναι το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς του μέσου όρου από τις τιμές της μεταβλητής  $X$  και  $\sum (\bar{Y} - Y_i)^2$  είναι το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς του μέσου όρου από τις τιμές της μεταβλητής  $Y$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson  $r$  παίρνει τιμές από  $-1$  έως και  $+1$ . Όσο η τιμή αυτή πλησιάζει το  $\pm 1$  τόσο η συσχέτιση μεταξύ ενός ζεύγους μεταβλητών είναι ισχυρότερη, ενώ όσο η τιμή του πλησιάζει το μηδέν τόσο πιο ασθενής γίνεται η συσχέτιση. Η συσχέτιση χαρακτηρίζεται ως (Καραγεώργος, 2010):



- ❖ πολύ σημαντική ή πολύ ισχυρή συσχέτιση όταν η τιμή του Pearson  $r$  βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές  $+0.8 \leq r < +1$  ή  $-1 < r \leq -0.8$
- ❖ σημαντική ή ισχυρή συσχέτιση όταν η τιμή του Pearson  $r$  βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές  $+0.7 \leq r < +0.8$  ή  $-0.8 < r \leq -0.7$
- ❖ μέση συσχέτιση όταν η τιμή του Pearson  $r$  βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές  $+0.5 \leq r < +0.7$  ή  $-0.7 < r \leq -0.5$
- ❖ ασθενή συσχέτιση όταν η τιμή του Pearson  $r$  είναι  $+0.3 \leq r < +0.5$  ή  $-0.5 < r \leq -0.3$

Όταν η τιμή του  $r$  είναι  $-0.3 < r < +0.3$  τότε δεν υπάρχει συσχέτιση και όταν  $r = \pm 1$  υπάρχει τέλεια συσχέτιση.

### 7.4.3 Επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας p-level

Τα δύο πιο σημαντικά χαρακτηριστικά κάθε συσχέτισης ανάμεσα σε μεταβλητές είναι το μέγεθος και η αξιοπιστία (STATISTICA Electronic Manual). Η αξιοπιστία μίας συσχέτισης είναι ένα χαρακτηριστικό που δηλώνει για ένα αποτέλεσμα που αφορά σε ένα δείγμα, πόσο αντιπροσωπευτικό είναι για ολόκληρο τον πληθυσμό. Δηλαδή, πόσο πιθανό είναι κάποια συσχέτιση που βρέθηκε από ένα δείγμα ενός πληθυσμού, να βρεθεί ξανά για κάποιο άλλο δείγμα από τον ίδιο πληθυσμό. Αν στην έρευνα πληρούνται ορισμένα κριτήρια τότε η αξιοπιστία μίας συσχέτισης ανάμεσα σε μεταβλητές, όπως βρέθηκε σε κάποιο δείγμα, μπορεί να εκτιμηθεί ποσοτικά και να αντιπροσωπεύεται από μία κανονική τιμή μέτρησης, που είναι το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας p-level (STATISTICA Electronic Manual).

Η στατιστική σημαντικότητα ενός αποτελέσματος είναι μία εκτίμηση του βαθμού στον οποίο το αποτέλεσμα είναι 'αληθινό', με την έννοια του πόσο αντιπροσωπευτικό είναι για ολόκληρο τον πληθυσμό. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή p-level είναι ένας δείκτης για την αξιοπιστία ενός αποτελέσματος. Όσο πιο μεγάλο είναι το p-level τόσο λιγότερο αξιόπιστη είναι η συσχέτιση που βρέθηκε μεταξύ κάποιων μεταβλητών σε ένα δείγμα, δηλαδή τόσο λιγότερο μπορεί να βασιστεί κανείς στο ότι η συσχέτιση αυτή ισχύει και για ολόκληρο τον πληθυσμό. Το p-level αντιπροσωπεύει την πιθανότητα λάθους στο να δεχθεί κανείς το αποτέλεσμα σαν έγκυρο, δηλαδή σαν

αντιπροσωπευτικό για ολόκληρο τον πληθυσμό. Για παράδειγμα, μία τιμή 0.05 για το p-level σημαίνει ότι υπάρχει 5% πιθανότητα η σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές του δείγματος να μην είναι έγκυρη. Με άλλα λόγια, αν σε ολόκληρο τον πληθυσμό στην πραγματικότητα δεν υπήρχε καμία σχέση ανάμεσα σε αυτές τις μεταβλητές, τότε στις 20 επαναλήψεις του πειράματος σε 20 διαφορετικά δείγματα από τον ίδιο πληθυσμό, θα βρισκόταν περίπου 1 δείγμα για το οποίο η συσχέτιση αυτή θα βρισκόταν ίδια ή ισχυρότερη από το πείραμα που έδωσε την τιμή 0.05 για το p-level. Σε πολλές μελέτες, η τιμή 0.05 για το p-level θεωρείται ως το άνω όριο αποδεκτού σφάλματος (STATISTICA Electronic Manual; Stoupelet et al., 2005; 2007c; Dimitrova, 2009; Dimitrova et al., 2009a ).

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι η ισχύς και η αξιοπιστία είναι δύο διαφορετικά χαρακτηριστικά των συσχετισμών ανάμεσα στις μεταβλητές. Ωστόσο, δεν είναι τελείως ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Γενικά, για δείγμα συγκεκριμένου μεγέθους, όσο πιο μεγάλη είναι η ισχύς της σχέσης ανάμεσα στις μεταβλητές, τόσο πιο αξιόπιστος είναι ο συσχετισμός. Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει καμία σχέση ανάμεσα στις υπό εξέταση μεταβλητές του πληθυσμού, είναι πολύ πιθανό να μη βρεθεί όντως καμία σχέση ανάμεσά τους μετά από κάποιο πείραμα σε ένα δείγμα. Επιπλέον, όσο πιο δυνατή είναι η σχέση όπως υπολογίζεται στο δείγμα, τόσο πιο απίθανο είναι να μην υπάρχει αντίστοιχη σχέση σε όλο τον πληθυσμό. Η ισχύς και η αξιοπιστία φαίνεται να είναι στενά συνδεδεμένα μεγέθη και υπάρχει ο τρόπος να υπολογιστεί το ένα μέγεθος εάν είναι γνωστό το άλλο (STATISTICA Electronic Manual).

#### **7.4.4 Μέθοδος ANalysis Of Variance**

Για τον έλεγχο στατιστικών υποθέσεων που αφορούν τη διαφορά μέσων όρων ανάμεσα σε τρία ή περισσότερα ανεξάρτητα δείγματα χρησιμοποιείται το τεστ ‘Ανάλυση της Διακύμανσης ή ANalysis Of Variance – ANOVA’ (Καραγεώργος, 2010). Ένα τεστ που ελέγχει τις διαφορές σε μέσους όρους αποκαλείται Ανάλυση Διακύμανσης διότι για να ελεγχθεί η στατιστική σημαντικότητα ανάμεσα σε μέσους όρους τριών ή περισσότερων ανεξάρτητων δειγμάτων στην ουσία πρέπει να συγκριθεί η διακύμανση ανάμεσα στις τιμές της ποσοτικής μεταβλητής.

Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ANOVA θα πρέπει να ισχύουν ορισμένες προϋποθέσεις (<http://www.stat.ufl.edu/~aa/sta6127/ch12.pdf>):

1. Τα τρία ή περισσότερα δείγματα πρέπει να είναι ανεξάρτητα, δηλαδή τα υποκείμενα, οι παρατηρήσεις ή οι περιπτώσεις να ανήκουν σε αμοιβαίως αποκλειόμενες ομάδες.
2. Η κλίμακα μέτρησης της εξαρτημένης μεταβλητής να είναι ποσοτική.
3. Η μορφή των κατανομών των τιμών της εξαρτημένης για κάθε κατηγορία της ανεξάρτητης (δηλαδή για κάθε δείγμα) θα πρέπει να είναι κανονική.

Στη μέθοδο ANOVA ο στατιστικός έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης γίνεται με τη χρήση του στατιστικού κριτηρίου  $F$  για τρία ή περισσότερα ανεξάρτητα δείγματα που υπολογίζεται ως εξής (Καραγεώργος, 2010):

$$F = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} \quad (6.2)$$

$$\text{όπου } MS_{between} = \frac{SS_{between}}{df_{between}} = \frac{\sum n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{k - 1} \text{ και}$$

$$MS_{within} = \frac{SS_{within}}{df_{within}} = \frac{\sum (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 + \sum (x_{2i} - \bar{x}_2)^2 + \dots + \sum (x_{vi} - \bar{x}_v)^2}{n - k}$$

όπου  $k$  είναι ο αριθμός των υπο-ομάδων και  $n$  το μέγεθος του συνολικού δείγματος.

Με τη μέθοδο ANOVA ελέγχονται τα επίπεδα μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών που ονομάζονται παράγοντες (factors) προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση που έχουν πάνω στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη και η οποία πρέπει να μετράται σε κλίμακα διαστημάτων (interval scale). Η Ανάλυση της Διακύμανσης αποτελεί μία μέθοδο ανάλυσης δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των μέσων τιμών πολλών πληθυσμών και βασίζεται στη σύγκριση της μεταβλητότητας μεταξύ (between) των πληθυσμών και της μεταβλητότητας στο εσωτερικό (within) των πληθυσμών. Η απλούστερη μορφή ανάλυσης είναι εκείνη που χαρακτηρίζεται από την ανάλυση της διακύμανσης κατά έναν παράγοντα (one factor ANOVA).

Ως μηδενική υπόθεση θεωρείται το ότι οι μέσοι όροι για την εξαρτημένη μεταβλητή είναι ίσοι για όλους τους πληθυσμούς, κάτι που σημαίνει ότι οι παράγοντες δεν έχουν καμία επίδραση στην υπό μελέτη μεταβλητή. Αν η μεταβλητότητα μεταξύ των πληθυσμών είναι περίπου ίση με τη μεταβλητότητα στο εσωτερικό των πληθυσμών τότε η μηδενική υπόθεση, δηλαδή ότι δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των μέσων όρων των πληθυσμών, γίνεται δεκτή. Αν η μεταβλητότητα μεταξύ των πληθυσμών είναι μεγαλύτερη από τη μεταβλητότητα στο εσωτερικό των πληθυσμών, τότε γίνεται δεκτή η εναλλακτική υπόθεση, δηλαδή ότι οι μέσοι όροι των πληθυσμών είναι διάφοροι μεταξύ τους (Winer et al., 1991).

Είναι γνωστό ότι η ύπαρξη του τυχαίου σφάλματος που οφείλεται στη δειγματοληψία δεν επιτρέπει στα  $MS_{between}$  και  $MS_{within}$  να είναι ίσα ακόμη και στην περίπτωση που η μηδενική υπόθεση είναι αληθινή. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να υπάρχει ένα μέτρο ανοχής για το πόσο μεγάλη θα πρέπει να είναι η παρατηρούμενη διαφορά προκειμένου να θεωρηθεί ότι δεν οφείλεται μόνο σε τυχαίο σφάλμα. Απάντηση στο ερώτημα αυτό δίνει η κατανομή δειγματοληψίας του λόγου των διακυμάνσεων:

$$F = \frac{MS_{between}}{MS_{within}}$$

Επειδή πρόκειται για τον λόγο δύο  $X^2$  τυχαίων μεταβλητών προκύπτει ότι ακολουθεί την κατανομή  $F$  με  $k - 1$  βαθμούς ελευθερίας για τον αριθμητή και  $n - k$  βαθμούς ελευθερίας για τον παρονομαστή. Από τη στιγμή που θα προσδιοριστεί και το επίπεδο σημαντικότητας  $p$  τότε η κρίσιμη τιμή του  $F$  προσδιορίζει τις περιοχές αποδοχής και απόρριψης της δοκιμασίας. Για συγκεκριμένο επίπεδο σημαντικότητας  $p$  και προκειμένου να παρθεί μία απόφαση συγκρίνονται η υπολογισμένη τιμή  $F$  με την κρίσιμη τιμή της κατανομής  $F_{(k-1),(n-k),p}$ . Όταν  $F > F_{(k-1),(n-k),p}$  η  $H_0$  δεν γίνεται αποδεκτή με βάση τα δεδομένα του δείγματος, όπου  $F_{(k-1),(n-k),p}$  είναι το  $(1 - p) \cdot 100$  εκατοστιαίο σημείο της κατανομής  $F_{(k-1),(n-k)}$  για το οποίο ισχύει ότι  $P(F_{(k-1),(n-k)} > F_{(k-1),(n-k),p}) = p$ .

Με βάση το πιο πάνω κριτήριο γίνεται η αποδοχή ή η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης και συμπεραίνεται αν τελικά υπάρχει επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών (παραγόντων) στις εξαρτημένες μεταβλητές.

#### 7.4.5 Μέθοδος της υπερεπίθεσης εποχών

Η μέθοδος της υπερεπίθεσης εποχών (superimposed epoch method) ή Chree analysis (Μαυρομιχαλάκη, 2005) εφαρμόζεται όταν αναζητείται η επίδραση συγκεκριμένων παραγόντων πάνω σε ένα γεγονός για το οποίο υπάρχουν αρκετές παρατηρήσεις, αλλά δεν μπορούν να διαχωριστούν οι επιδράσεις από άλλους παράγοντες (θόρυβος) (Γιανναροπούλου, 2012). Στην εφαρμογή της μεθόδου τα δεδομένα ταξινομούνται σε κατηγορίες βάσει μίας ‘ημερομηνίας – κλειδί’, η οποία αναφέρεται ως ημέρα 0, για να γίνει χρονισμός και σύγκριση μεταξύ των μέσων τιμών των διαφόρων κατηγοριών. Η βασική ιδέα είναι πως αν συνεκτιμηθούν τα δεδομένα με έναν έξυπνο τρόπο θα παραμείνει η επίδραση του εξεταζόμενου παράγοντα στο γεγονός ενώ ο θόρυβος θα απαλειφθεί (<http://www.ae.metu.edu.tr/~tyapici/thesis/chapter3.pdf>).

CHREE MATRIX –  $\alpha_{ij}(1)$

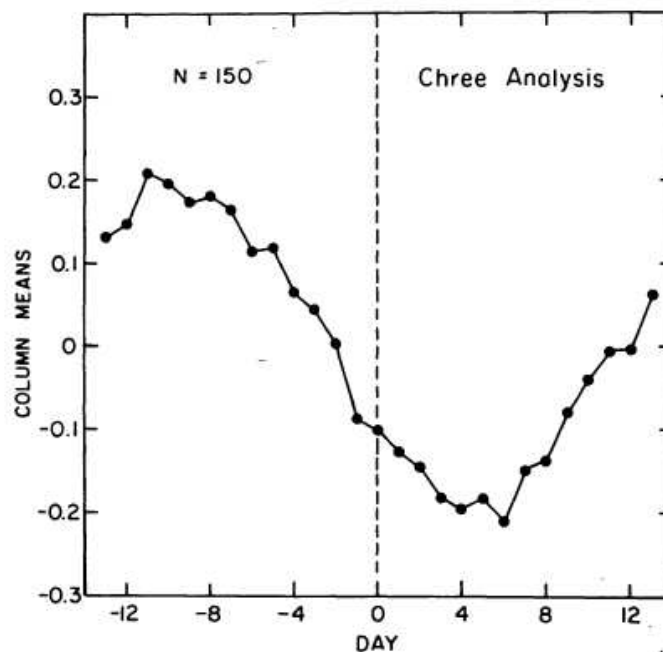
DAY →

EPOCH ↓	- 13	- 12	----- 0 -----	+ 12	+ 13
	1	2	----- 13 -----	26	27
1					$\bar{r}_1$
2					$\bar{r}_2$
⋮					
⋮			$x_{ij}$		$\bar{r}_j$
⋮					
150	$\bar{c}_1$	$\bar{c}_2$	$\bar{c}_i$	$\bar{c}_{26}$	$\bar{c}_{27}$

Σχ. 7.5 Πίνακας δεδομένων που χρησιμοποιείται στην ανάλυση Chree (Forbush et al., 1983).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, κάθε ημέρα – κλειδί (ημέρα 0) τοποθετείται στο κέντρο ενός χρονικού διαστήματος, το μήκος του οποίου επιλέγεται κάθε φορά

ανάλογα με την υπό εξέταση παράμετρο. Στη συνέχεια τα δεδομένα τοποθετούνται σε έναν πίνακα στον οποίο οι γραμμές  $r_j$  αντιπροσωπεύουν τις εποχές και οι στήλες  $c_i$  τις ημέρες πριν και μετά τις ξεχωριστές ημέρες – κλειδιά (Σχ. 7.5). Το δεδομένο της στήλης  $i$  και της γραμμής  $j$  που αντιστοιχεί στην ημέρα – κλειδί συμβολίζεται με  $x_{ij}$ . Οι μέσες τιμές των στηλών και των γραμμών παριστάνονται με  $\bar{c}_i$  και  $\bar{r}_j$  αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές των στηλών αυτού του πίνακα, οι οποίες κατά κανόνα παρουσιάζουν κάποια μεταβολή, είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσης Chree τα οποία στη συνέχεια παριστάνονται γραφικά (Σχ. 7.6) σαν συνάρτηση των ημερών (Forbush et al., 1983).



Σχ. 7.6 Οι μέσες τιμές των στηλών ( $\bar{c}_i$ ), που αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης Chree, παριστάνονται γραφικά σαν συνάρτηση των ημερών (Forbush et al., 1983).

#### 7.4.6 Στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων

Στη συνέχεια ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας ανάλυσης και επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων, όπως αυτά προέκυψαν από τα δύο πειράματα ηλιοβιολογίας (Košice και Baku) και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή

τη διατριβή, προκειμένου να εξαχθούν οι πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν.

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση του προγράμματος STATISTICA, ver.8.0.550.0 (Copyright © StatSoft. Inc. 1984 – 2008). Εφαρμόστηκε η μέθοδος ANOVA, δηλαδή η ανάλυση της διακύμανσης κατά έναν παράγοντα. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές, δηλαδή ‘παράγοντες’, θεωρήθηκαν το επίπεδο Ap (Ap level), το επίπεδο Dst (Dst level) και η ποσοστιαία μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας (CRI, %). Ως εξαρτημένες μεταβλητές θεωρήθηκαν οι φυσιολογικές παράμετροι HR, RR, SP και DP. Με τη μέθοδο ANOVA ελέγχθηκε η επίδραση καθενός από τους παράγοντες σε κάθε μία από τις υπό μελέτη εξαρτημένες μεταβλητές (Dimitrova, 2006a). Κάθε φορά, ως μηδενική υπόθεση θεωρήθηκε το ότι οι μέσες τιμές μίας παραμέτρου, π.χ. HR, είναι ίσες για όλους τους πληθυσμούς, δηλαδή οι μέσες τιμές είναι ίσες για κάθε επίπεδο των ανεξάρτητων μεταβλητών, π.χ. επίπεδο Ap.

Με τη βοήθεια του προγράμματος STATISTICA προέκυψαν πίνακες με τις υπολογισμένες μέσες τιμές για κάθε εξεταζόμενη φυσιολογική παράμετρο και για κάθε επίπεδο παράγοντα. Στους πίνακες αυτούς αναγράφονται επίσης, το κανονικό σφάλμα στον υπολογισμό της μέσης τιμής με διάστημα εμπιστοσύνης 95%, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της παραμέτρου γι’ αυτό το διάστημα εμπιστοσύνης, καθώς και ο αριθμός των μετρήσεων που υπάγονται σε κάθε επίπεδο του παράγοντα. Ενδεικτικά ένα παράδειγμα δίνεται στον Πίνακα 7.1. Υπολογίζονται, επίσης, η τιμή της συνάρτησης F, ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας της κάθε περίπτωσης και το επίπεδο σημαντικότητας p-level για κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα αυτά παραστάθηκαν και γραφικά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης απαιτείται η τιμή p-level να είναι μεγαλύτερη από 0.05. Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή για  $p < 0.05$ , η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Αυτό σημαίνει ότι ισχύει η εναλλακτική υπόθεση, δηλαδή ότι στην περίπτωση αυτή οι μεταβολές στον παράγοντα, π.χ. επίπεδο Dst, έχουν επίδραση στην υπό μελέτη παράμετρο, π.χ. HR. Η μελέτη της επίδρασης του κάθε παράγοντα, π.χ. επίπεδο Dst, σε κάθε παράμετρο, π.χ. HR, εκτός από την ημέρα της μέτρησης εξετάστηκε και για τρεις ημέρες πριν (-) αλλά

και τρεις ημέρες μετά (+) από κάθε γεωμαγνητική διαταραχή ή μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Με αυτό τον τρόπο μελετάται και η επίδραση που μπορεί να υπάρχει πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από κάποια γεωμαγνητική διαταραχή ή μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι τιμές p-level από την ανάλυση ANOVA συγκεντρώθηκαν σε πίνακες, όπου με κόκκινο (γεωμαγνητική δραστηριότητα) και μπλε (ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας) σημειώνονται οι τιμές  $p < 0.05$  για τις οποίες ισχύει η εναλλακτική υπόθεση.

**Πίνακας 7.1** Πίνακας των μέσων τιμών της φυσιολογικής παραμέτρου HRR για κάθε επίπεδο παράγοντα, όπως προκύπτει από το STATISTICA.

CRI Level; LS Means (Kosice Day0) Current effect: F(5, 1335)=2,8288, p=0,01508 Effective hypothesis decomposition						
	<b>CRI level</b>	<b>HRR Mean</b>	<b>HRR Std.Err.</b>	<b>HRR -95.00%</b>	<b>HRR +95.00%</b>	<b>N</b>
1	-3	70.00000	2.123494	65.83425	74.16575	25
2	-2	70.97048	0.644965	69.70522	72.23574	271
3	-1	70.58608	0.642598	69.32547	71.84669	273
4	0	67.18750	1.876921	63.50546	70.86954	32
5	1	69.59540	0.509069	68.59674	70.59406	435
6	2	72.15410	0.607955	70.96145	73.34675	305

Επιπλέον, παραστάθηκαν γραφικά οι μεταβολές των μέσων τιμών των φυσιολογικών παραμέτρων που είχαν υπολογιστεί κατά την ανάλυση ANOVA σε συνάρτηση με τις ημέρες, από τρεις μέρες πριν έως και τρεις μέρες μετά τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και της γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Αυτό έγινε και για τους τρεις παράγοντες (επίπεδο Ap, επίπεδο Dst και CRI, %). Έτσι από τα διαγράμματα και τους πίνακες με τα συγκεντρωμένα p-level γίνεται ευκολότερη η εξαγωγή συμπερασμάτων για το σε ποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε σημαντική επίδραση των μεταβολών της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και της κοσμικής ακτινοβολίας στις φυσιολογικές παραμέτρους με στατιστική σημαντικότητα.



## 7.5 Πείραμα Košice (Σλοβακίας)

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν και αναλύθηκαν μετρήσεις από συγκεκριμένο πείραμα που έγινε στην πόλη Košice της Σλοβακίας στα πλαίσια της συνεργασίας τριών επιστημονικών ομάδων, της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας (Ελλάδα), της Ομάδας Διαστημικής Φυσικής του Košice (Σλοβακία) και της Ομάδας Ηλιοβιολογίας της Σόφια (Βουλγαρία). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν στην πιθανή επίδραση των μεταβολών της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στην ανθρώπινη φυσιολογική κατάσταση μέσω μεταβολών φυσιολογικών παραμέτρων, όπως ο καρδιακός ρυθμός (beats/min) και η αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση (mmHg).

### 7.5.1 Πειραματικά δεδομένα

#### 7.5.1.1 Ιατρικά δεδομένα

Οι μετρήσεις του καρδιακού ρυθμού και της αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης αναφέρονται σε μία ομάδα 4018 Σλοβάκων αεροπόρων και πάρθηκαν κατά τη διάρκεια των περιοδικών ιατρικών ελέγχων στο έδαφος. Η ομάδα αποτελούνταν μόνο από υγιείς, όπως απαιτείται για το προσωπικό αεροπορίας, άνδρες ηλικίας από 18 έως 60 χρονών. Κατεγράφησαν ημερήσιες μέσες τιμές καρδιακού ρυθμού (HR) και αρτηριακής συστολικής (SP) και διαστολικής πίεσης (DP). Πιο συγκεκριμένα:

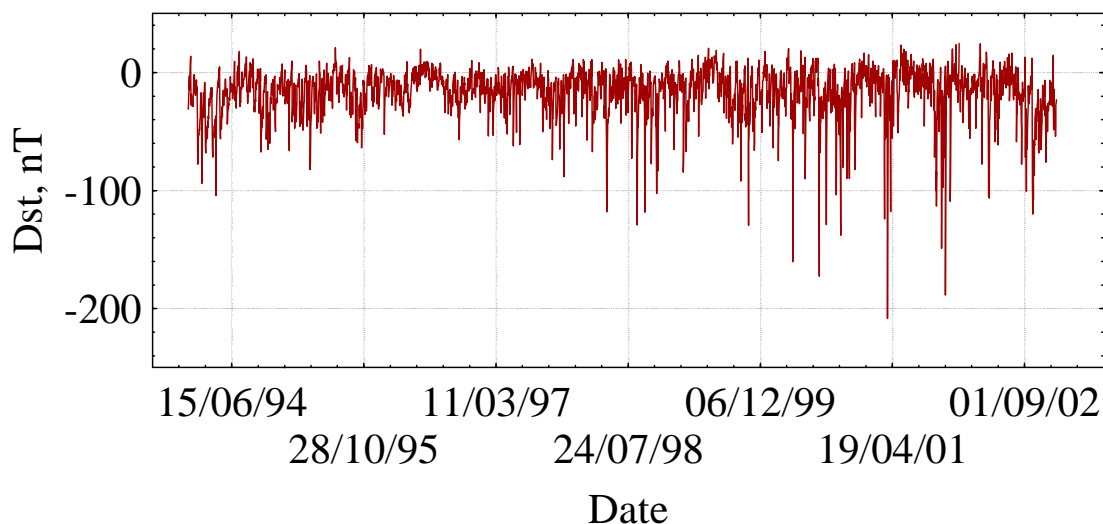
- ❖ HR, SP και DP σε ηρεμία χωρίς φόρτο (HRR, SPR, DPR),
- ❖ HR, SP και DP σε 1<sup>ο</sup> βαθμό φόρτου (HRFDL, SPFDL, DPFDL – σε στατικό ποδήλατο και κόνοντας πεντάλ σε ισχύ 50 – 100 Watts),
- ❖ HR, SP και DP σε 2<sup>ο</sup> βαθμό φόρτου (HRSDL, SPSDL, DPSDL – σε στατικό ποδήλατο και κόνοντας πεντάλ σε ισχύ 100 – 150 Watts) και
- ❖ Μέγιστο HR, SP και DP σε μέγιστο βαθμό φόρτου (HRMAX, SPMAX, DPMAX – σε στατικό ποδήλατο και κόνοντας πεντάλ σε μέγιστη ισχύ).

Κάθε τιμή φυσιολογικής παραμέτρου αντιπροσωπεύει τη μέση ημερήσια τιμή της παραμέτρου για όλους τους αεροπόρους που εξετάστηκαν τη συγκεκριμένη

ημέρα. Για κάποιες ημέρες (σαββατοκύριακα, αργίες, κτλ) δεν υπάρχουν ιατρικές μετρήσεις. Συνολικά ο αριθμός των μετρήσεων είναι 1341 και η χρονική περίοδος που αναφέρονται αυτές είναι από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1994 έως 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2002.

### 7.5.1.2 Δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου

Τα δεδομένα για τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst προήλθαν από το World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), ενώ τα δεδομένα για τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap από το Space Weather Prediction Centre, NOAA, Boulder ([http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old\\_indices.html](http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html)). Στο σχήμα 7.7 φαίνονται οι μεταβολές του δείκτη Dst για το χρονικό διάστημα των μετρήσεων.



Σχ. 7.7 Ημερήσιες μεταβολές του γεωμαγνητικού δείκτη Dst (nT) για την υπό εξέταση περίοδο από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1994 έως την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2002.

Η γεωμαγνητική δραστηριότητα χωρίστηκε σε πέντε επίπεδα (I0, I, II, III, IV) με βάση τις τιμές των δεικτών Ap (Stoupel, 1999, 2006; Stoupel et al., 2007a) και Dst (Kamide et al., 1998), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.2. Το επίπεδο 'I0' (θετικές τιμές του δείκτη Dst) εισήχθη γιατί για τη χρονική περίοδο που εξετάζεται υπήρχαν αρκετές ημέρες που σημειώθηκε αρκετά χαμηλή γεωμαγνητική δραστηριότητα. Αυτές οι περιπτώσεις είναι, επίσης, σημαντικές στην ανάλυση αφού πολύ ασθενείς διακυμάνσεις ή ακόμη και απουσία διακυμάνσεων στο γεωμαγνητικό πεδίο μπορεί να

έχουν δυσμενείς επιδράσεις στην ανθρώπινη φυσιολογική κατάσταση (Palmer et al., 2006; Stoupel et al., 2007a).

*Πίνακας 7.2 Τα επίπεδα των γεωμαγνητικών δεικτών Dst και Ap και ο αντίστοιχος αριθμός ημερών.*

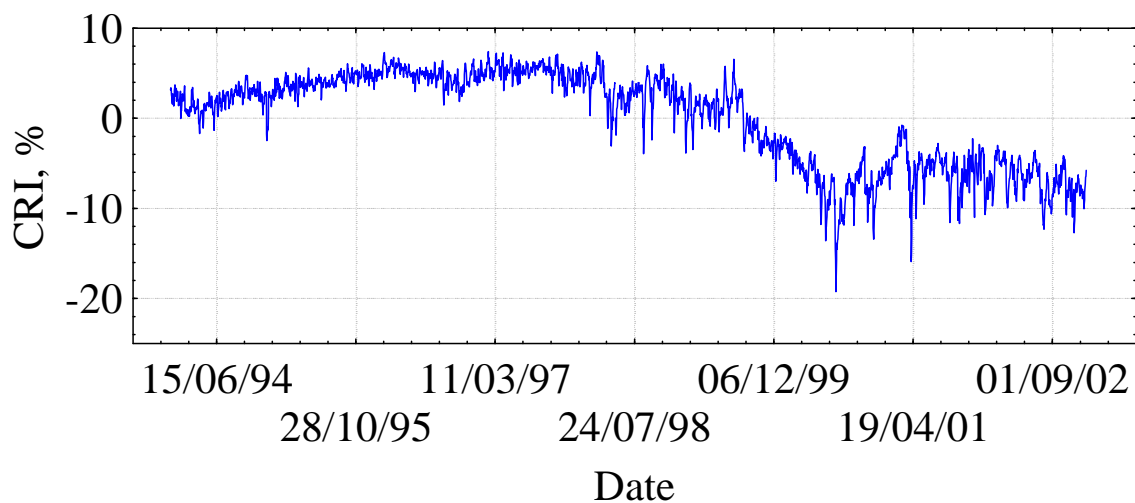
Dst επίπεδα	Τιμές δείκτη Dst (nT)	Αριθμός ημερών	Ap επίπεδα	Τιμές δείκτη Ap	Αριθμός ημερών
<b>Ι0</b>	Dst ≥ 0	206	<b>Ι0</b>	Ap < 8	615
<b>Ι</b>	- 20 < Dst < 0	665	<b>Ι</b>	8 ≤ Ap < 15	349
<b>ΙΙ</b>	-50 < Dst ≤ -20	390	<b>ΙΙ</b>	15 ≤ Ap < 30	269
<b>ΙΙΙ</b>	-100 < Dst ≤ -50	70	<b>ΙΙΙ</b>	30 ≤ Ap < 50	78
<b>ΙV</b>	Dst ≤ -100	10	<b>ΙV</b>	Ap ≥ 50	30

### 7.5.1.3 Δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας

Οι ημερήσιες, διορθωμένες με την πίεση, τιμές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας προήλθαν από τον μετρητή νετρονίων (SNM-15) του σταθμού Lomnický Štít του τμήματος Διαστημικής Φυσικής του Ινστιτούτου Πειραματικής Φυσικής στο Košice, Σλοβακία (<http://neutronmonitor.ta3.sk/realtime.php3>). Αυτός ο σταθμός βρίσκεται στα 2634m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 3.84 GV. Λειτουργεί από τον Δεκέμβριο 1981 παρέχοντας δεδομένα υψηλής ποιότητας (αρχείο, σύγχρονα δεδομένα) μέσω του διαδικτύου σε ηλεκτρονική μορφή (<http://neutronmonitor.ta3.sk/>). Οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, για την υπό εξέταση χρονική περίοδο, φαίνονται στο σχήμα 7.8.

Οι κανονικοποιημένες τιμές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας υπολογίστηκαν μέσω της σχέσης  $\frac{I_i - I_{mean}}{I_{mean}}$ , όπου  $I_i$  είναι η εκάστοτε ωριαία τιμή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και  $I_{mean}$  είναι η μέση τιμή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για τη χρονική περίοδο του πειράματος. Με αυτό τον τρόπο δεν χρειάζονται περαιτέρω διορθώσεις λόγω της μακρόχρονης ή βραχύχρονης διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως ο ηλιακός κύκλος ή οι μειώσεις Forbush, που μπορούν να επηρεάσουν το μέσο HR, DP και SP. Η δραστηριότητα της

κοσμικής ακτινοβολίας ταξινομήθηκε σε 6 επίπεδα (-3, -2, -1, 0, +1, +2) ανάλογα με την έντασή της (Πίνακας 7.3).



Σχ. 7.8 Κανονικοποιημένες ημερήσιες μεταβολές της CRI κατά τη διάρκεια του πειράματος από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1994 έως την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2002.

Στον Πίνακα 7.4 σημειώνονται οι ημερομηνίες με τις χαμηλότερες τιμές του δείκτη Dst και οι αντίστοιχες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για το υπό εξέταση χρονικό διάστημα.

**Πίνακας 7.3** Τα επίπεδα έντασης κοσμικής ακτινοβολίας και ο αντίστοιχος αριθμός ημερών.

CRI επίπεδα	CRI, %	Αριθμός ημερών
-3	$-16 \leq \text{CRI} \leq -11$	25
-2	$-11 < \text{CRI} \leq -6$	271
-1	$-6 < \text{CRI} \leq -1$	273
0	$\text{CRI} = 0$	32
1	$1 \leq \text{CRI} \leq 4$	435
2	$4 < \text{CRI} \leq 8$	305

*Πίνακας 7.4 Ημέρες με χαμηλό δείκτη Dst και οι αντίστοιχες μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας.*

<b>α/α</b>	<b>Ημ/νία</b>	<b>Dst (nT)</b>	<b>Dst επίπεδο</b>	<b>CRI, %</b>	<b>CRI επίπεδο</b>	<b>α/α</b>	<b>Ημ/νία</b>	<b>Dst (nT)</b>	<b>Dst επίπεδο</b>	<b>CRI, %</b>	<b>CRI επίπεδο</b>
1	31/3/2001	-211	4	-5	-1	43	15/5/1997	-62	3	5	2
2	7/4/2000	-160	4	-7	-2	44	10/10/2002	-62	3	-4	-1
3	5/10/2000	-138	4	-6	-2	45	7/3/1994	-61	3	1	1
4	22/10/1999	-134	4	-2	-1	46	9/6/1997	-61	3	6	2
5	12/4/2001	-131	4	-16	-3	47	26/11/2001	-61	3	-8	-2
6	24/11/2001	-123	4	-7	-2	48	11/9/2002	-61	3	-7	-2
7	20/3/2001	-117	4	-2	-1	49	31/10/1994	-60	3	2	1
8	7/11/2001	-110	4	-8	-2	50	4/10/1995	-60	3	5	2
9	20/4/2002	-106	4	-9	-2	51	13/9/1999	-60	3	-1	-1
10	18/9/2000	-104	4	-12	-3	52	2/8/2002	-59	3	-12	-3
11	23/10/2001	-102	4	-7	-2	53	28/9/1995	-58	3	6	2
12	1/10/2001	-99	3	-11	-3	54	10/3/1994	-57	3	0	0
13	5/5/1998	-94	3	-1	-1	55	11/3/1994	-57	3	1	1
14	7/11/2000	-90	3	-12	-3	56	23/10/1996	-57	3	3	1
15	2/10/2001	-87	3	-12	-3	57	18/2/1998	-57	3	3	1
16	7/10/2002	-87	3	-5	-1	58	6/2/2002	-56	3	-4	-1
17	18/2/1999	-84	3	-3	-1	59	12/9/2002	-56	3	-8	-2
18	13/11/1998	-82	3	4	1	60	22/11/2002	-56	3	-8	-2
19	19/4/2002	-81	3	-7	-2	61	11/4/1994	-55	3	1	1
20	14/10/2000	-80	3	-6	-2	62	3/10/2000	-55	3	-6	-2
21	3/10/2002	-78	3	-7	-2	63	8/11/2001	-55	3	-7	-2
22	19/10/1998	-77	3	4	1	64	9/9/2002	-55	3	-8	-2
23	19/2/1999	-77	3	-3	-1	65	9/2/1994	-53	3	1	1
24	4/10/2000	-77	3	-6	-2	66	10/2/1994	-53	3	1	1
25	21/11/2002	-76	3	-10	-2	67	11/2/1994	-53	3	2	1
26	12/2/2000	-75	3	-6	-2	68	7/4/1994	-53	3	1	1
27	7/2/1994	-73	3	1	1	69	17/4/1999	-53	3	2	1
28	15/7/2000	-72	3	-16	-3	70	30/9/2000	-53	3	-6	-2
29	4/9/2002	-72	3	-8	-2	71	5/4/1994	-52	3	1	1
30	6/10/2000	-71	3	-6	-2	72	6/4/1994	-52	3	1	1
31	1/3/1999	-69	3	2	1	73	8/4/1994	-52	3	2	1
32	8/3/1994	-68	3	0	0	74	17/5/2000	-52	3	-6	-2
33	25/10/2002	-68	3	-8	-2	75	17/5/1995	-51	3	4	1
34	13/11/1999	-67	3	-2	-1	76	27/5/1997	-51	3	6	2
35	8/2/1994	-66	3	1	1	77	10/4/2000	-51	3	-5	-1
36	18/1/1995	-66	3	4	1	78	23/2/1994	-50	3	1	1
37	6/4/2000	-66	3	-7	-2	79	4/9/1997	-50	3	6	2
38	7/11/1997	-65	3	4	1	80	21/10/1998	-50	3	4	1
39	10/9/2002	-65	3	-7	-2	81	9/5/2001	-50	3	-4	-1
40	9/3/1994	-64	3	1	1	82	24/10/2001	-50	3	-6	-2
41	19/10/1995	-64	3	5	2	83	27/11/2002	-50	3	-8	-2
42	11/4/2001	-64	3	-8	-2						

## 7.5.2 Αποτελέσματα

### 7.5.2.1 Ως προς τη γεωμαγνητική δραστηριότητα

Η μέθοδος ANOVA χρησιμοποιήθηκε ώστε να προκύψουν τα επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της επίδρασης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας στις παραμέτρους HR, SP και DP για τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες. Οι Πίνακες 7.5, 7.6 και 7.7 δίνουν τις p-values για τους γεωμαγνητικούς δείκτες Ap και Dst αντίστοιχα για όλες τις υπό εξέταση παραμέτρους που παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα.

Η κύρια επίδραση των επιπέδων της γεωμαγνητικής δραστηριότητας την ημέρα 0 δεν ήταν στατιστικά σημαντική για την αρτηριακή πίεση (Papailiou et al., 2011b), όπως προκύπτει από τους Πίνακες 7.5 και 7.7, εκτός από την επίδραση του δείκτη Ap στην παράμετρο SPMAX (Πίνακας 7.5). Επίσης στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα προέκυψαν για τις παραμέτρους HRR και τις ημέρες -1, -2 και +1, ενώ για τις HRFDL και HRSDL στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα προέκυψαν μόνο τις ημέρες +1 και +2 μετά το γεωμαγνητικό γεγονός. Όπως φαίνεται απουσιάζουν από αυτό τον πίνακα οι παράμετροι DP.

*Πίνακας 7.5 Επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της πιθανής επίδρασης του γεωμαγνητικού δείκτη Ap στις παραμέτρους HR, SP και DP τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές).*

Ημέρα	p – values (Ap)			
	HRR	HRFDL	HRSDL	SPMAX
-3	0.14207	0.20911	0.49445	0.71176
-2	<b>0.01524*</b>	0.52388	0.57538	0.59295
-1	<b>0.03620*</b>	0.06150	0.26971	0.68977
0	0.11666	0.27748	0.40543	<b>0.00741*</b>
+1	<b>0.04439*</b>	<b>0.00062*</b>	<b>0.00184*</b>	<b>0.04754*</b>
+2	0.09949	<b>0.01420*</b>	<b>0.02712*</b>	0.97438
+3	0.15662	0.39002	0.33889	0.58176

Στους Πίνακες 7.6 και 7.7 φαίνονται οι p-values για τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst για τις παραμέτρους HR και SP, DP αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δείχνουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους HRR, HRMAX, HRFDL και HRSDL (Πίνακας 7.6) τις ημέρες πριν από κάποια γεωμαγνητική καταιγίδα (ημέρες -3, -2, -1), ενώ για τις παραμέτρους SPR, SPMAX, SPFDL, SPSDL και DPR, DPMAX, DPFDL και DPSDL (Πίνακας 7.7) στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα εμφανίζονται για την ημέρα +3 μετά το γεγονός, εκτός από την παράμετρο DPSDL για την οποία στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται και για την ημέρα +1 (Papailiou et al., 2011b).

*Πίνακας 7.6 Επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της πιθανής επίδρασης του γεωμαγνητικού δείκτη Dst στις παραμέτρους HR τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές).*

Ημέρα	p – values (Dst)			
	HRR	HRMAX	HRFDL	HRSDL
-3	<b>0.02791*</b>	<b>0.03715*</b>	0.07456	<b>0.04818*</b>
-2	<b>0.00684*</b>	<b>0.00100*</b>	<b>0.00635*</b>	<b>0.00035*</b>
-1	<b>0.04488*</b>	0.16675	0.15666	0.27072
0	0.21087	0.27090	0.96654	0.91616
+1	0.14685	0.07426	0.58184	0.66781
+2	0.30181	0.43466	0.54927	0.78145
+3	0.27063	0.22179	0.92533	0.88275

*Πίνακας 7.7 Επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της πιθανής επίδρασης του γεωμαγνητικού δείκτη Dst στις παραμέτρους SP και DP τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές).*

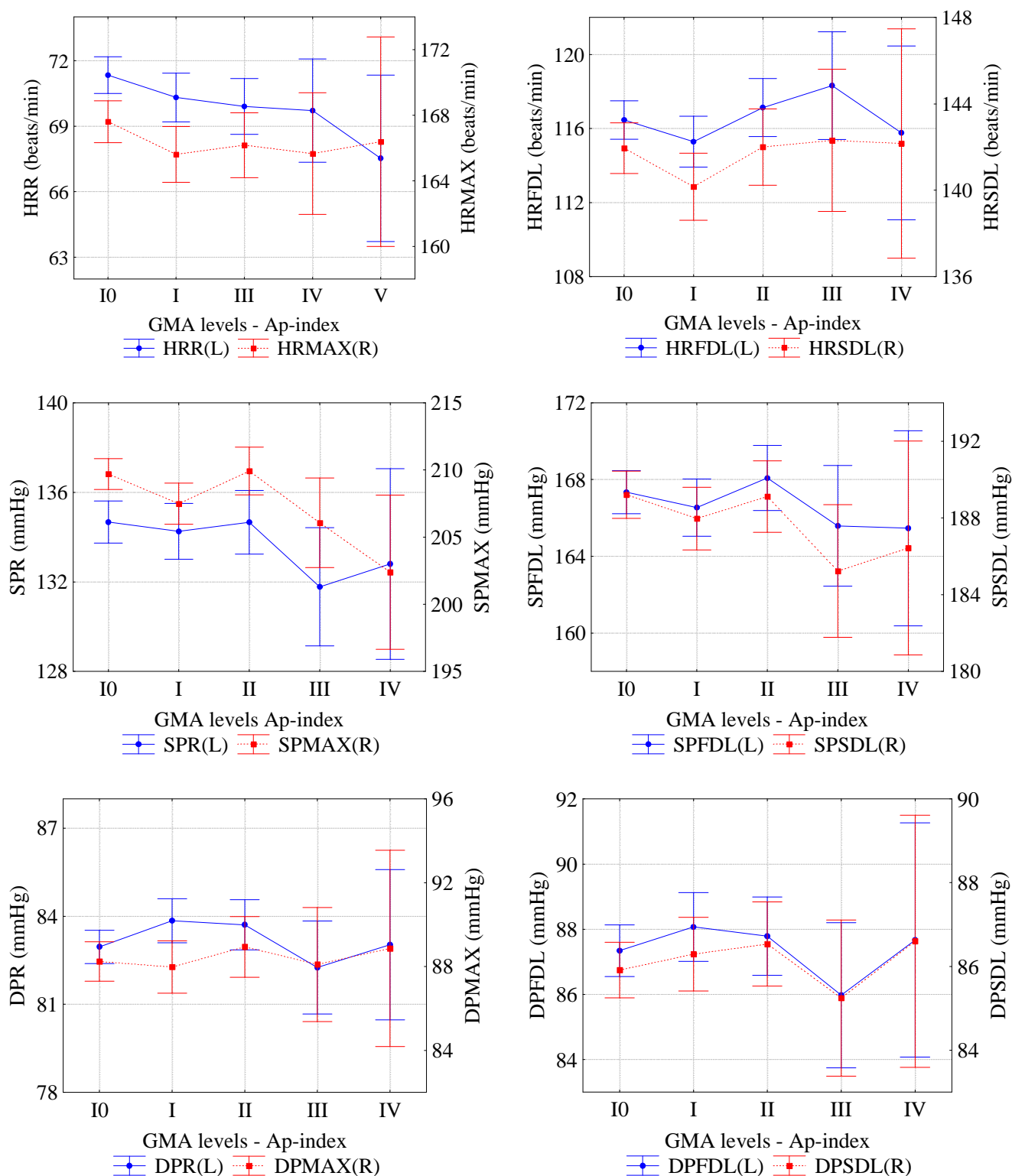
Ημέρα	p – values (Dst)							
	SPR	SPMAX	SPFDL	SPSDL	DPR	DPMAX	DPFDL	DPSDL
-3	0.28007	0.33845	0.52260	0.25511	0.69359	0.18878	0.56501	0.54967
-2	0.15888	0.13661	0.27832	0.44135	0.61007	0.29944	0.40561	0.52146
-1	0.18042	0.51424	0.41089	0.41301	0.09098	0.46883	0.61261	0.36882
0	0.77808	0.19865	0.42493	0.64462	0.34181	0.50361	0.35710	0.52160
+1	0.27445	0.19175	0.76355	0.37106	0.27568	0.13068	0.10520	<b>0.01404*</b>
+2	0.17498	0.16290	0.45766	0.36437	0.13525	0.23740	0.31969	0.56027
+3	<b>0.00930*</b>	<b>0.01096*</b>	<b>0.00639*</b>	<b>0.01048*</b>	<b>0.00205*</b>	<b>0.00005*</b>	<b>0.02729*</b>	<b>0.00739*</b>

Στα σχήματα 7.9 και 7.10 που ακολουθούν δίνονται οι μεταβολές όλων των υπό εξέταση παραμέτρων σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα των γεωμαγνητικών δεικτών Ap και Dst αντίστοιχα, όπως αυτά έχουν καθοριστεί προηγουμένως (βλ. Πίνακας 7.1).

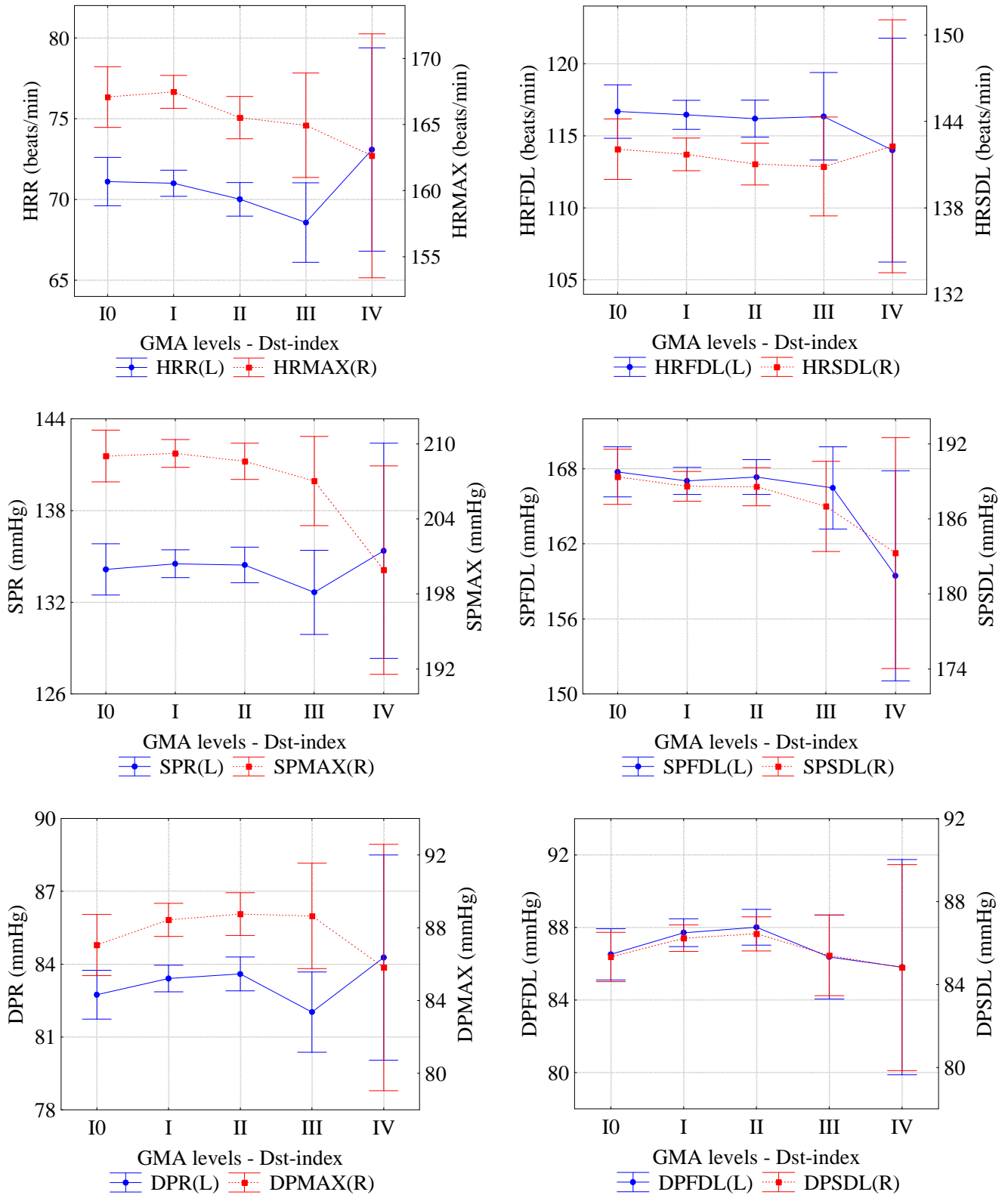
Για τις παραμέτρους HR η τάση σε σχέση με τα επίπεδα του γεωμαγνητικού δείκτη Ap δεν είναι ξεκάθαρη (Σχ. 7.9, άνω διαγράμματα). Παρατηρείται μία μείωση των τιμών των παραμέτρων HRR και HRFDL από το επίπεδο III στο IV του γεωμαγνητικού δείκτη Ap, ενώ σχεδόν σταθερές είναι οι τιμές των HRMAX και HRSDL στα υψηλά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Σχετικά με τις παραμέτρους SP παρατηρούνται μειωμένες τιμές για τα δύο υψηλότερα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας (επίπεδα III και IV), αν και όπως φαίνεται για τις παραμέτρους SPR, SPFDL και SPSDL η τιμή που αντιστοιχεί στο επίπεδο IV είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη του επιπέδου III (Σχ. 7.9, μεσαία διαγράμματα). Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν από το σχήμα 7.9 (κάτω διαγράμματα) για τις παραμέτρους DP (Papaiiou et al., 2011b).

Από το σχήμα 7.10 (άνω διαγράμματα) προκύπτει ότι για το επίπεδο III της γεωμαγνητικής δραστηριότητας σύμφωνα με τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst, οι παράμετροι HR σημειώνουν τη μικρότερη τιμή τους και στη συνέχεια για το επίπεδο IV παρατηρείται αύξηση για τις παραμέτρους HRR και HRSDL και περαιτέρω μείωση για τις παραμέτρους HRMAX και HRFDL. Για όλες τις SP παραμέτρους, εκτός της SPR (Σχ. 7.10, μεσαία διαγράμματα) σημειώνεται μία τάση για μείωση με τα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας και ελάχιστη τιμή στο επίπεδο IV (Papaiiou et al., 2011b). Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι παράμετροι DP (εκτός από την DPR), όπως φαίνεται στο σχήμα 7.10 (κάτω διαγράμματα).



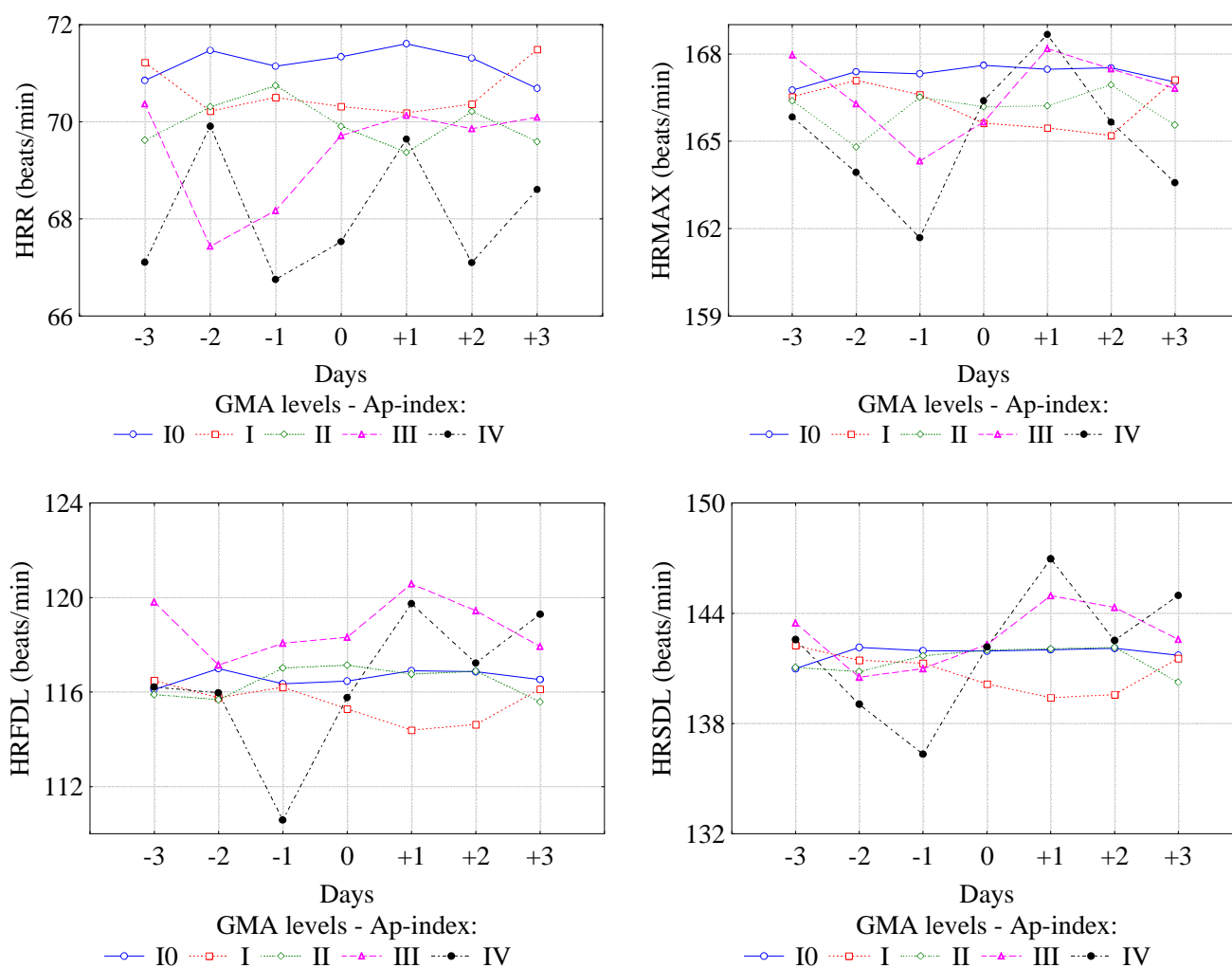


Σχ. 7.9 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, ως προς τον Ap, στις παραμέτρους HR (άνω διαγράμματα), SP (μεσαία διαγράμματα) και DP (κάτω διαγράμματα) για την ημέρα 0 ( $\pm 95\%$  CI).



Σχ. 7.10 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, ως προς τον Dst, στις παραμέτρους HR (άνω διαγράμματα), SP (μεσαία διαγράμματα) και DP (κάτω διαγράμματα) για την ημέρα 0 ( $\pm 95\%$  CI).

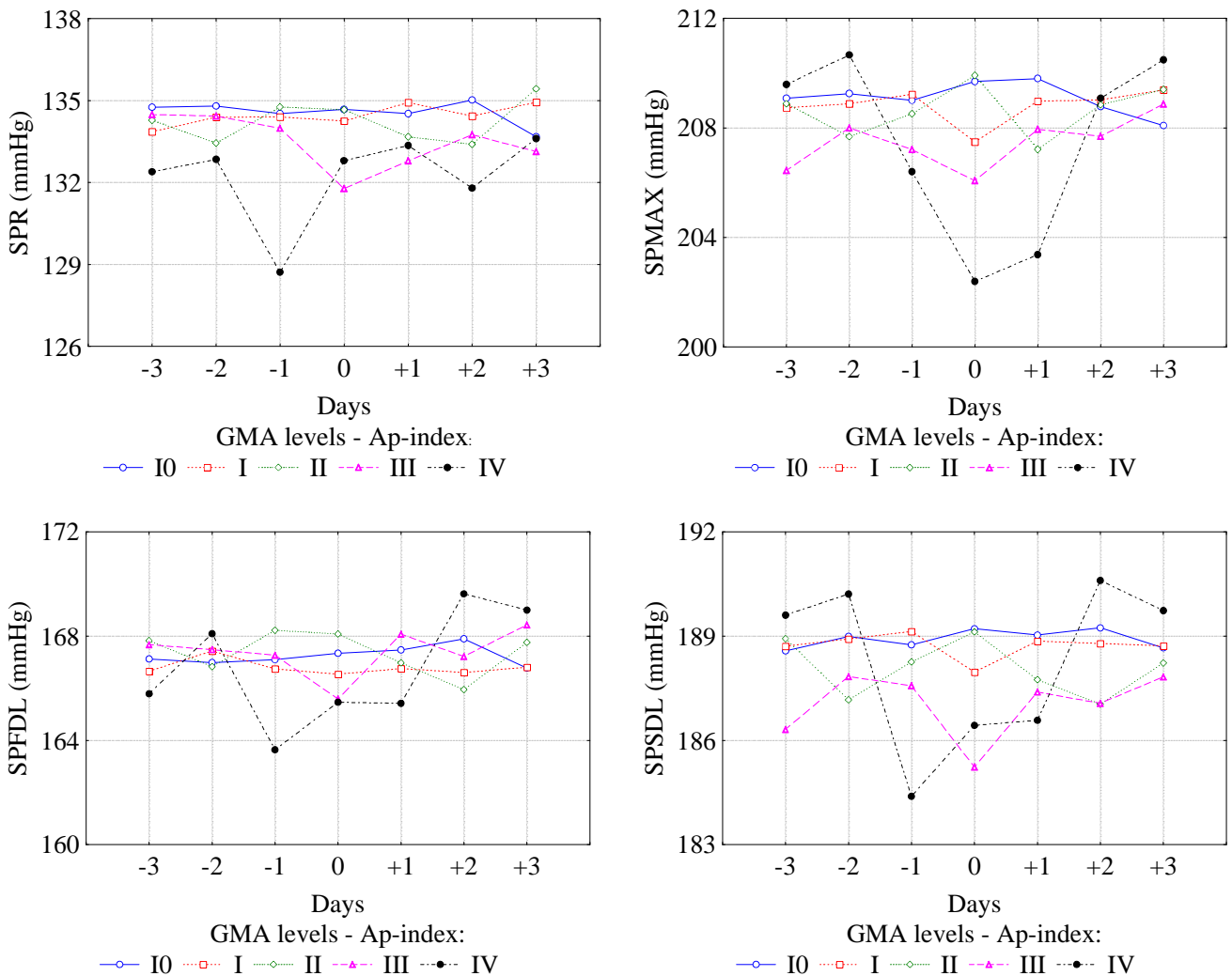
Στο σχήμα 7.11 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων HRR (άνω αριστερά διάγραμμα), HRMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), HRFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και HRSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Ap, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.



Σχ. 7.11 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Ap, στις HR παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Οι πιο έντονες μεταβολές παρατηρούνται για τα επίπεδα III και IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (Σχ. 7.11). Συγκεκριμένα για την παράμετρο HRR σε ότι αφορά στο επίπεδο III της γεωμαγνητικής δραστηριότητας σημειώνεται αύξηση από την ημέρα -2 πριν το γεγονός έως την +1 μετά το γεγονός. Αντίστοιχα για το

επίπεδο IV η αύξηση καθυστερεί κατά μία ημέρα και ξεκινάει από την ημέρα -1. Για την παράμετρο HRMAX οι μεταβολές για τα επίπεδα III και IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας είναι παρόμοιες, αφού παρατηρείται μείωση από την ημέρα -3 έως την ημέρα -1, στη συνέχεια αύξηση έως και μία ημέρα μετά τη γεωμαγνητική καταιγίδα (ημέρα +1) και τέλος μείωση έως την ημέρα +3 μετά την καταιγίδα. Παρόμοια συμπεριφορά σημειώνεται για το επίπεδο IV των παραμέτρων HRFDL και HRSDL με τη διαφορά ότι η τιμή τους την ημέρα +3 είναι υψηλότερη από ότι την ημέρα +2.



Σχ. 7.12 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Ap, στις SP παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

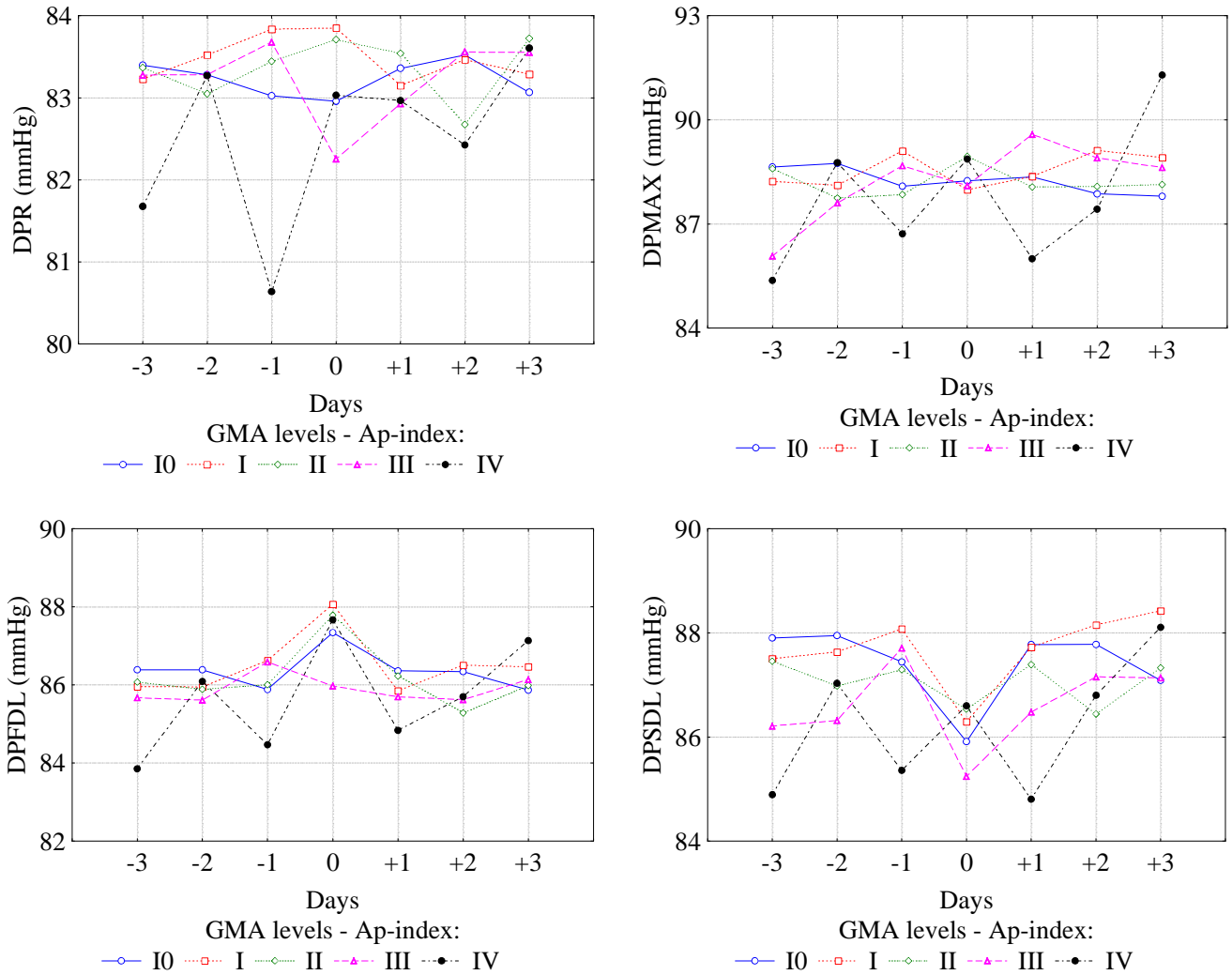
Στο σχήμα 7.12 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων SPR (άνω αριστερά διάγραμμα), SPMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), SPFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και SPSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Ap, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Η ελάχιστη τιμή για τις παραμέτρους SPR, SPFDL και SPSDL σημειώνεται μία ημέρα πριν (ημέρα -1) τη γεωμαγνητική καταιγίδα επιπέδου IV, ενώ τις επόμενες ημέρες παρατηρούνται αυξημένες τιμές των παραμέτρων και συγκεκριμένα η μέγιστη σημειώνεται δύο ημέρες (ημέρα +2) μετά τη γεωμαγνητική καταιγίδα για τις SPFDL και SPSDL ή τρεις ημέρες μετά (ημέρα +3) για την SPR, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.12. Για την παράμετρο SPMAX και το επίπεδο IV παρατηρείται απότομη μείωση από την ημέρα -1 έως την ημέρα του γεωμαγνητικού γεγονότος (ημέρα 0) και στη συνέχεια αύξηση μετά την ημέρα +1 (Papaiioliou et al., 2011b).

Στο σχήμα 7.13 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων DPR (άνω αριστερά διάγραμμα), DPMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), DPFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και DPSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Ap, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

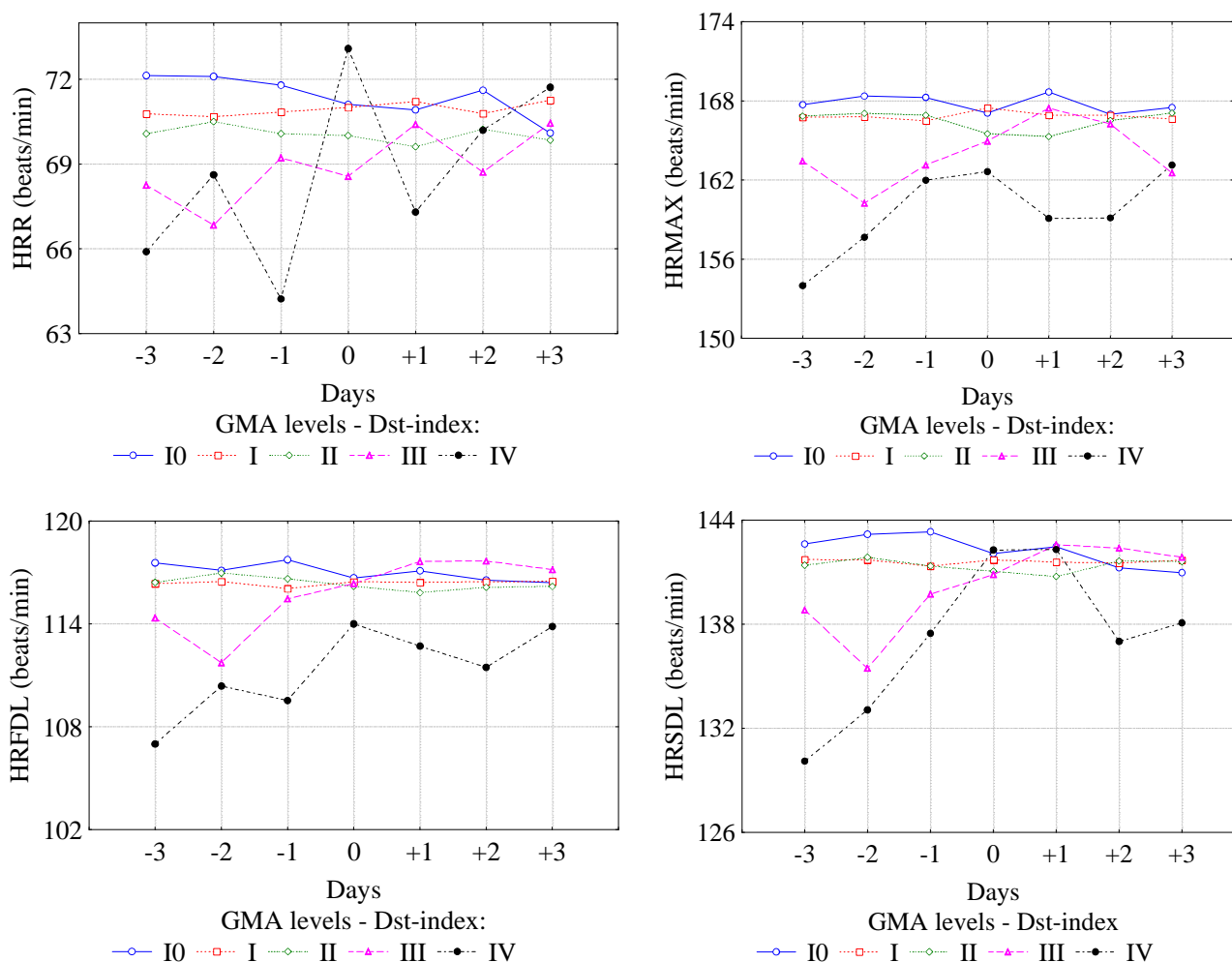
Οι DP παράμετροι παρουσιάζουν κυρίως απότομες αυξομειώσεις τις διάφορες ημέρες για τα επίπεδα III και IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (Σχ. 7.13). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η παράμετρος DPFDL, η οποία εκτός από την παραπάνω συμπεριφορά επιπλέον δίνει κορυφές μεγίστου την ημέρα 0 για όλα σχεδόν τα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας (Papaiioliou et al., 2011b).

Στο σχήμα 7.14 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων HRR (άνω αριστερά διάγραμμα), HRMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), HRFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και HRSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Dst, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.



Σχ. 7.13 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Ap, στις DP παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Οι παράμετροι HR παρουσιάζουν τις πιο έντονες μεταβολές για τα επίπεδα III και IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (Σχ. 7.14). Μάλιστα η συμπεριφορά των HRMAX, HRFDL και HRSDL είναι παρόμοια και για το επίπεδο III η ελάχιστη τιμή παρατηρείται δύο ημέρες (ημέρα -2) πριν το γεωμαγνητικό γεγονός, ενώ για το επίπεδο IV τρεις ημέρες πριν (ημέρα -3). Μόνο οι μεταβολές του HRR διαφέρουν αφού εμφανίζονται απότομες αυξομειώσεις για διάφορες ημέρες.

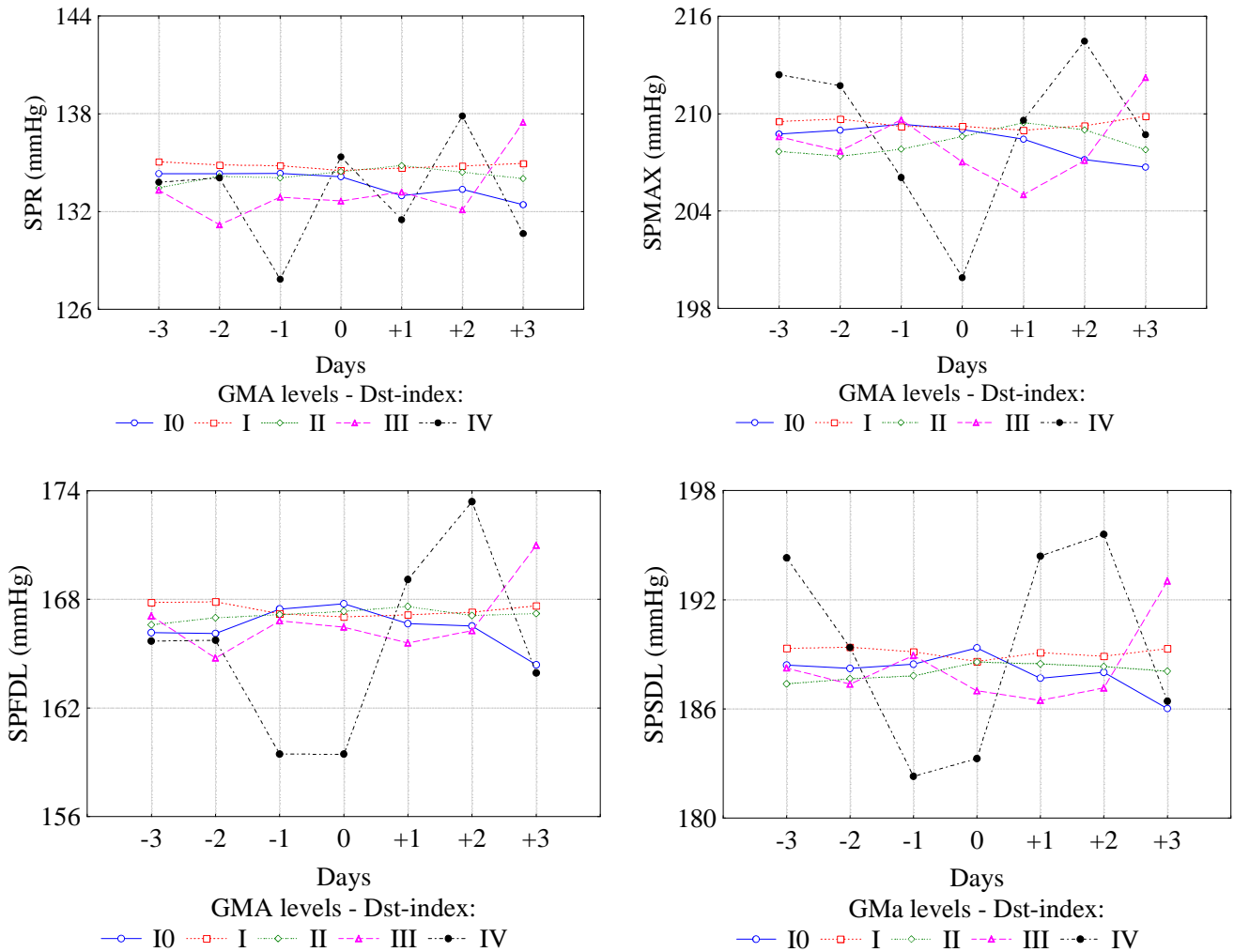


Σχ. 7.14 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Dst, στις HR παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Στο σχήμα 7.15 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων SPR (άνω αριστερά διάγραμμα), SPMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), SPFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και SPSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Dst, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Η συμπεριφορά των παραμέτρων SP ως προς τον γεωμαγνητικό δείκτη Dst είναι παρόμοια με αυτή για τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.15. Πιο συγκεκριμένα για το επίπεδο IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας οι παράμετροι SPR, SPSDL και SPFDL παίρνουν ελάχιστη τιμή την ημέρα -1 και 0

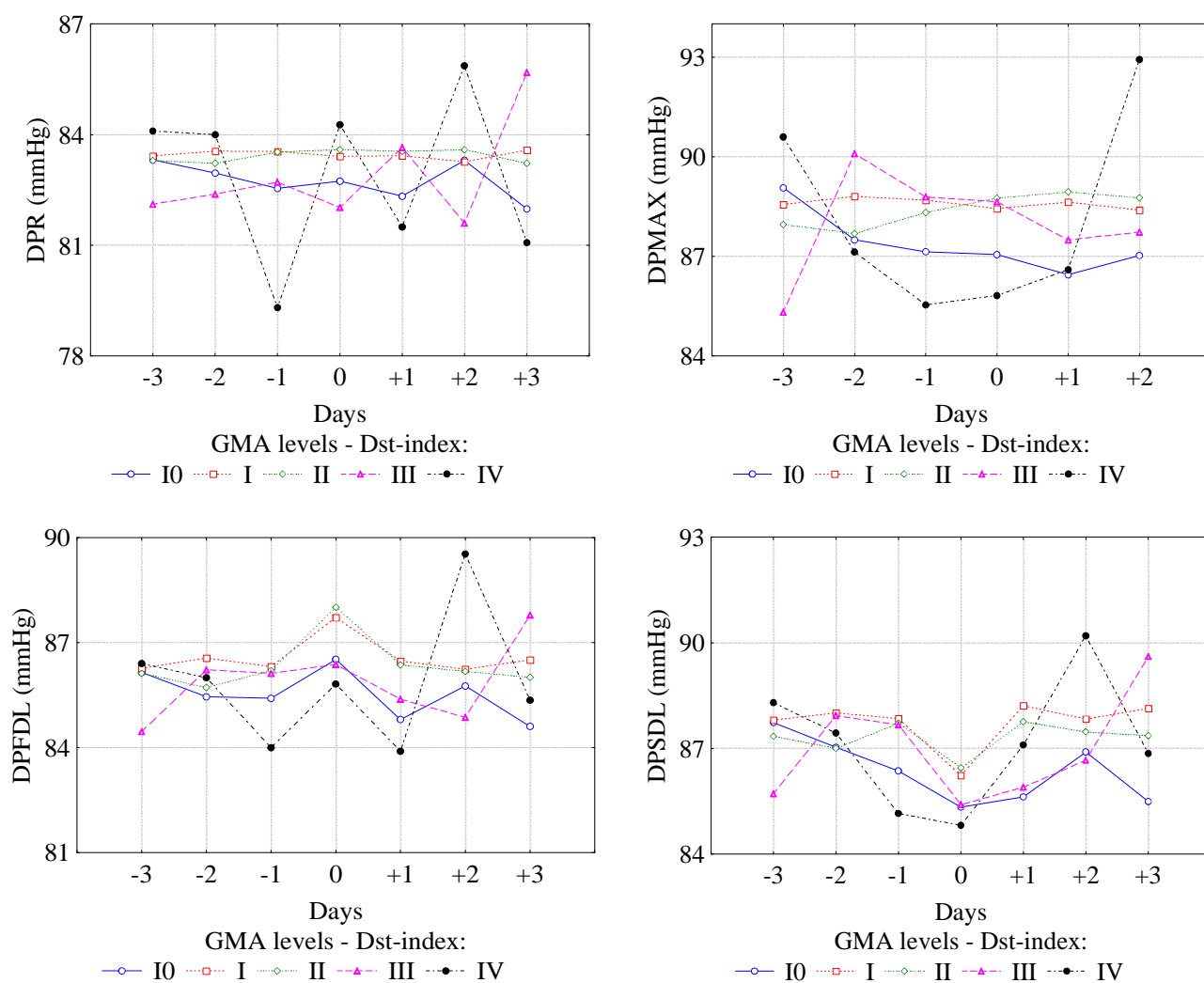
πριν τη γεωμαγνητική καταιγίδα αντίστοιχα και μέγιστη τιμή την ημέρα +2 μετά τη γεωμαγνητική καταιγίδα (Papaiiου et al., 2011b). Η παράμετρος SPMAX (Σχ. 7.15) μειώνεται από την ημέρα -2 έως την ημέρα της καταιγίδας (ημέρα 0) και στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι την ημέρα +2.



Σχ. 7.15 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Dst, στις SP παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Στο σχήμα 7.16 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων DPR (άνω αριστερά διάγραμμα), DPMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), DPFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και DPSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Dst, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.





Σχ. 7.16 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Dst, στις DP παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Οι μεταβολές των παραμέτρων DP παρουσίασαν απότομες αυξομειώσεις χωρίς να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη συμπεριφορά είτε ως προς τα επίπεδα είτε ως προς τις ημέρες (Σχ. 7.16). Όμως, μπορεί να ειπωθεί ότι η τάση για ελάχιστη τιμή την ημέρα -1 και μέγιστη την ημέρα +2 για το επίπεδο IV διατηρείται (Papailiou et al., 2011b).

### 7.5.2.2 Ως προς την κοσμική ακτινοβολία

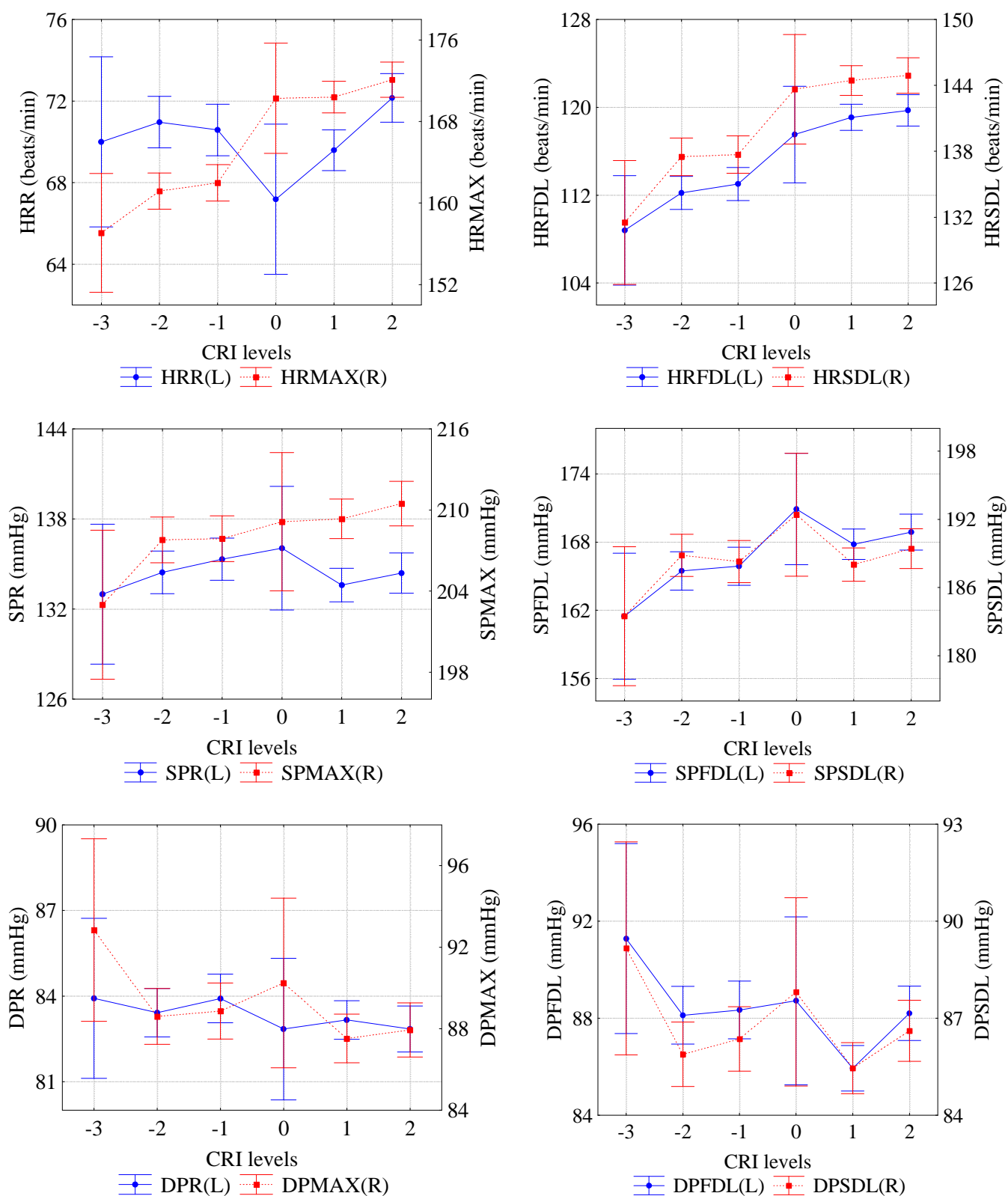
Η μέθοδος ANOVA χρησιμοποιήθηκε ώστε να προκύψουν τα επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της επίδρασης των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις παραμέτρους HR, SP και DP για τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Ο Πίνακας 7.8 δίνει τις p-values για την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για όλες τις υπό εξέταση παραμέτρους που παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα.

*Πίνακας 7.8 Επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της πιθανής επίδρασης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις παραμέτρους HR, SP και DP τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές).*

Ημέρα	p – values (CRI)							
	HRR	HRMAX	HRFDL	HRSDL	SPMAX	SPFDL	DPFDL	DPSDL
-3	0.55187	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.02550*</b>	<b>0.00385*</b>	0.42203	<b>0.00196*</b>
-2	0.19592	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	0.09411	<b>0.01305*</b>	0.44713	<b>0.00633*</b>
-1	0.13180	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.00166*</b>	<b>0.00385*</b>	0.34159	<b>0.00907*</b>
0	<b>0.01508*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.04547*</b>	<b>0.00326*</b>	<b>0.00183*</b>	0.11839
+1	<b>0.02587*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	0.23876	<b>0.00602*</b>	0.12549	<b>0.00073*</b>
+2	0.19773	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	0.23215	<b>0.00559*</b>	0.33813	<b>0.00197*</b>
+3	0.11558	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	<b>0.0000*</b>	0.05270	<b>0.00421*</b>	0.39805	<b>0.01767*</b>

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 7.8 για τις παραμέτρους HRMAX, HRFDL και HRSDL τα αποτελέσματα προκύπτουν στατιστικά σημαντικά για όλες τις ημέρες, ενώ για την HRR μόνο για τις ημέρες 0 και +1. Από τις υπόλοιπες παραμέτρους (Papailiou et al., 2012a) τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα αφορούν στις παραμέτρους SPMAX (ημέρες -3, -1 και 0), SPFDL (όλες τις ημέρες), DPFDL (ημέρα 0) και DPSDL (όλες εκτός από την ημέρα 0).

Στο σχήμα 7.17 δίνονται οι μεταβολές όλων των υπό εξέταση παραμέτρων σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτά έχουν καθοριστεί προηγουμένως (βλ. Πίνακας 7.3).



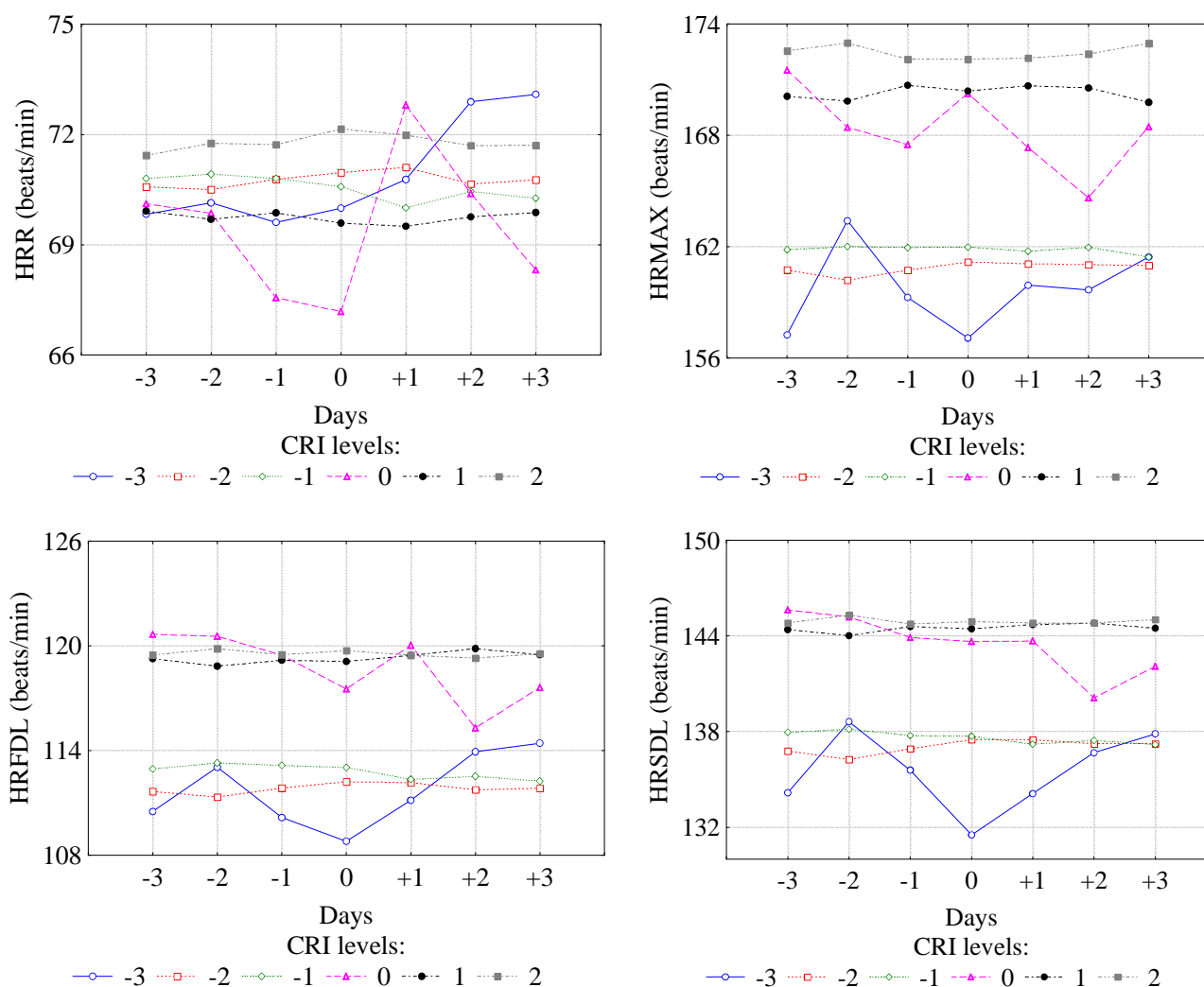
Σχ. 7.17 Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις παραμέτρους HR (άνω διαγράμματα), SP (μεσαία διαγράμματα) και DP (κάτω διαγράμματα) για την ημέρα 0 ( $\pm 95\%$  CI).

Οι παράμετροι HRMAX, HRFDL και HRSDL παρουσιάζουν την ίδια τάση σε σχέση με τα επίπεδα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, δηλαδή μείωση των τιμών τους για επίπεδα που δηλώνουν πιο έντονη δραστηριότητα έως το επίπεδο -3 για το οποίο σημειώνεται η ελάχιστη τιμή τους (Σχ. 7.17, άνω διαγράμματα). Η μόνη εξαίρεση είναι η παράμετρος HRR της οποίας η ελάχιστη τιμή προκύπτει για το επίπεδο 0 (καμία μεταβολή στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας). Το εύρος των παραμέτρων HR (διαφορά μέγιστης και ελάχιστης τιμής) φαίνεται να αυξάνει για τα διάφορα επίπεδα φόρτου: 5 beats/min (για ηρεμία χωρίς φόρτο), 11 beats/min (για 1<sup>ο</sup> βαθμό φόρτου), 13 beats/min (για 2<sup>ο</sup> βαθμό φόρτου) και 15 beats/min (για μέγιστο βαθμό φόρτου).

Η μείωση των τιμών των παραμέτρων SP επίσης συνδέεται με τα υψηλά επίπεδα δραστηριότητας, αφού οι ελάχιστες τιμές τους αναφέρονται στα επίπεδα -2 και -3 (Σχ. 7.17, μεσαία διαγράμματα). Από την άλλη η συμπεριφορά των παραμέτρων DP δείχνει να διαφέρει αφού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.17 (κάτω διαγράμματα), για το επίπεδο -3 της ταξινόμησης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρατηρείται η μέγιστη τιμή των τεσσάρων παραμέτρων (Papaïliou et al., 2012a).

Στο σχήμα 7.18 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων HRR (άνω αριστερά διάγραμμα), HRMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), HRFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και HRSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Η πιο έντονη μεταβολή των παραμέτρων HR σημειώνεται για το επίπεδο -3 της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Σχ. 7.18). Συγκεκριμένα, οι παράμετροι HRMAX, HRFDL και HRSDL μειώνονται από την ημέρα -2 πριν τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, την ημέρα 0 οι παραπάνω παράμετροι έχουν την ελάχιστη τιμή τους και στη συνέχεια αυξάνονται μέχρι και την ημέρα +3 μετά τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι έντονες μεταβολές όλων των παραμέτρων για το επίπεδο 0.

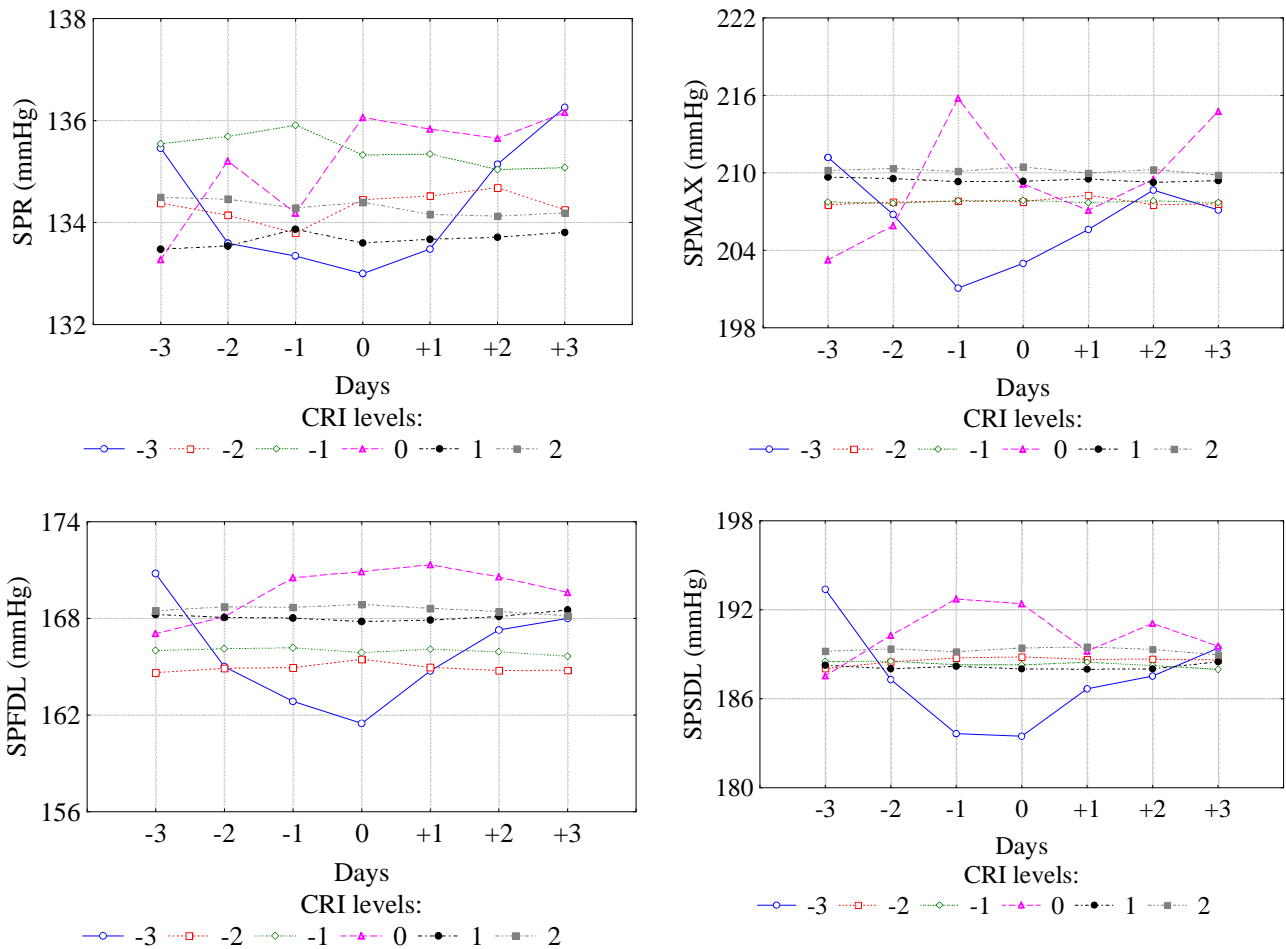


Σχ. 7.18 Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις HR παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Στο σχήμα 7.19 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων SPR (άνω αριστερά διάγραμμα), SPMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), SPFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και SPSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

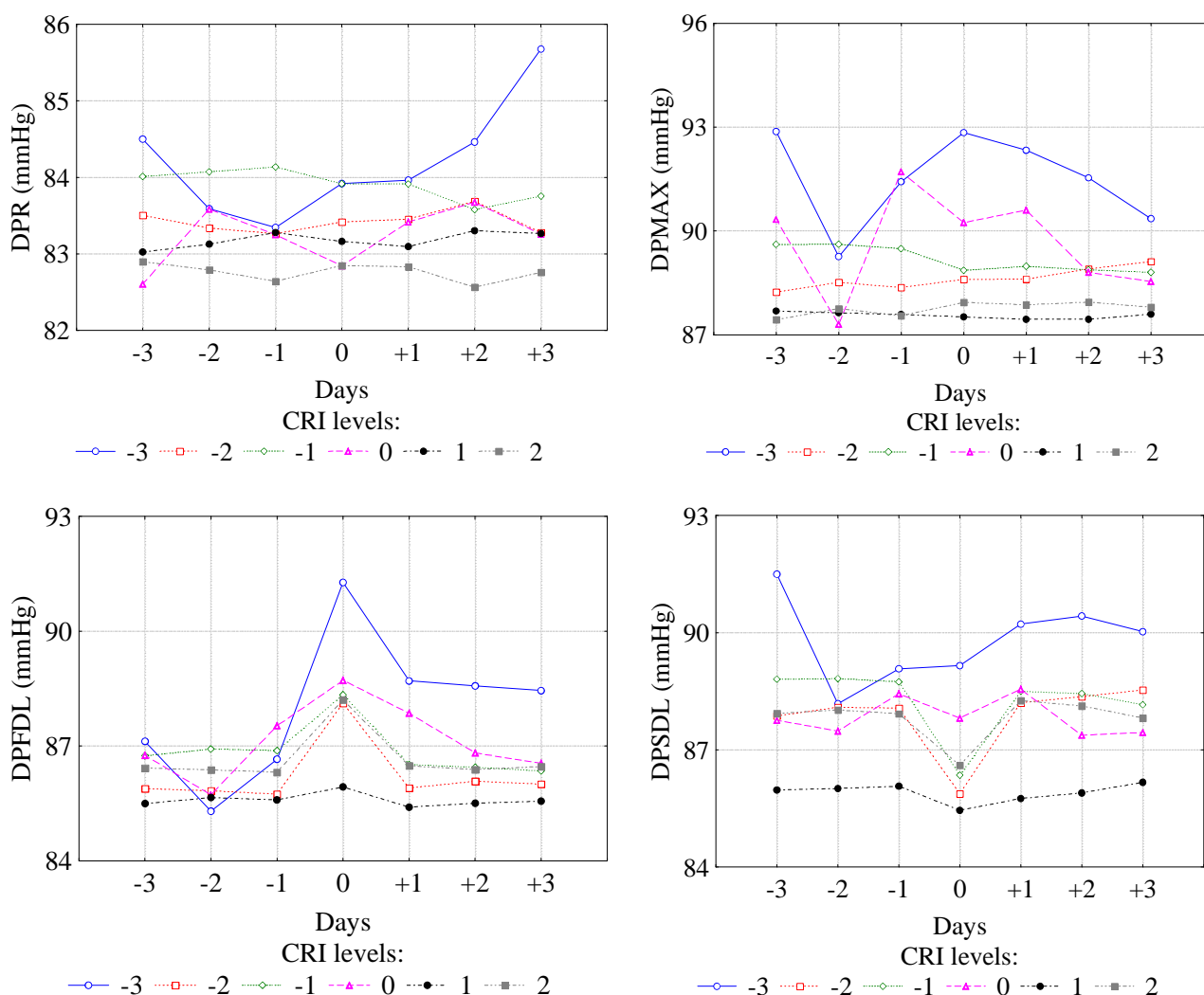
Οι παράμετροι SPR, SPFDL και SPSDL έχουν την πιο έντονη μεταβολή για το επίπεδο -3 (Σχ. 7.19). Συγκεκριμένα αυτές οι φυσιολογικές παράμετροι μειώθηκαν από την ημέρα -2 έως την ημέρα 0 και αυξήθηκαν στη συνέχεια έως την ημέρα +3

μετά την έντονη μεταβολή στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η παράμετρος SPMAX με τη διαφορά ότι η ελάχιστη τιμή της σημειώνεται μία ημέρα πριν (ημέρα -1) τη μείωση (Papaiioliou et al., 2012a).



Σχ. 7.19 Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις SP παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Στο σχήμα 7.20 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων DPR (άνω αριστερά διάγραμμα), DPMAX (άνω δεξιά διάγραμμα), DPFDL (κάτω αριστερά διάγραμμα) και DPSDL (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.



Σχ. 7.20 Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις DP παραμέτρους πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 7.20 για το επίπεδο -3 (μεγάλες μειώσεις) η παράμετρος DPR μειώθηκε τις ημέρες -2 και -1 πριν από το γεγονός και στη συνέχεια αυξήθηκε μέχρι την ημέρα +3 μετά το γεγονός. Η ίδια μείωση την ημέρα -2 πριν τη μεταβολή στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας παρατηρείται, επίσης, για τις παραμέτρους DPMAX, DPFDL και DPSDL. Όμως, η φάση αύξησης για τις παραμέτρους DPMAX και DPFDL ολοκληρώνεται την ημέρα 0 ενώ για την παράμετρο DPSDL η αύξηση διαρκεί μέχρι την ημέρα +2, όπως και για την DPR (Papailiou et al., 2012a).

Συνοπτικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση της αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης για τα υψηλά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας (Papaiioliou et al., 2011b), ενώ ισχυρές μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σχετίζονται με μείωση των παραμέτρων της συστολικής πίεσης και αύξηση της διαστολικής (Papaiioliou et al., 2012a). Περαιτέρω τη μείωση της αρτηριακής πίεσης κατά τη διάρκεια και τις ημέρες πριν τα έντονα γεωμαγνητικά γεγονότα συνήθως ακολουθεί μία αύξηση τις ημέρες μετά τα γεγονότα εκτός από τις περιπτώσεις στις οποίες απότομες αυξομειώσεις παρατηρούνται για τα ίδια επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας για διαφορετικές ημέρες, κυρίως για τις παραμέτρους της διαστολικής πίεσης (Papaiioliou et al., 2011b; 2012a).

Ο καρδιακός ρυθμός, επίσης, σχετίζεται με γεωμαγνητικές διαταραχές και μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα αύξηση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σχετίζονται με μείωση του καρδιακού ρυθμού, ενώ τις ημέρες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από αλλαγές στους παράγοντες του διαστημικού καιρού σημειώνονται έντονες μεταβολές του καρδιακού ρυθμού (Mavromichalaki et al., 2009b; Papaiioliou et al., 2011a).



## 7.6 Πείραμα Baku (Αζερμπαϊτζάν)

Οι πιθανές επιδράσεις των μεταβολών της φυσικής δραστηριότητας, όπως είναι οι διαταραχές του γεωμαγνητικού πεδίου και οι μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας, στην καρδιαγγειακή κατάσταση υγιών ανθρώπων μελετήθηκαν με το πείραμα που διεξήχθη στην πόλη Baku στο Αζερμπαϊτζάν στα πλαίσια της συνεργασίας της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας της Αθήνας (Ελλάδα) με την Ομάδα Ηλιοβιολογίας του Baku (Αζερμπαϊτζάν) και την Ομάδα Ηλιοβιολογίας της Σόφια (Βουλγαρία). Το πείραμα αυτό είναι ένα μοντέρνο πείραμα ηλιοβιολογίας που έλαβε χώρα σε μία περιοχή μεσαίου γεωγραφικού πλάτους κατά την καθοδική και κοντά στο ελάχιστο φάση του 23ου ηλιακού κύκλου (2006 – 2008), όπου παρατηρείται αύξηση στη δραστηριότητα της κοσμικής ακτινοβολίας (Forbush, 1958). Παρακάτω αναλύεται πως η δυναμική του καρδιακού ρυθμού (beats/min) και των διαστημάτων RR (msec) μπορεί να επηρεαστεί από μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

### 7.6.1 Πειραματικά δεδομένα

#### 7.6.1.1 Ιατρικά δεδομένα

Οι σχετικές ηλιοβιολογικές (ιατρικές) μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια μίας μόνιμης ομάδας υγιών ανδρών και γυναικών με μέση ηλικία 31.6 χρόνια (Πίνακας 7.9) στην πόλη Baku του Αζερμπαϊτζάν (γεωγραφικό πλάτος: 40° 23' Βόρεια; γεωγραφικό μήκος: 49° 51' Ανατολικά). Ψηφιοποιημένα καρδιογραφήματα καταγράφονταν σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (πρωί) τις καθημερινές αλλά και τα Σάββατα στο εργαστήριο Ηλιοβιολογίας που βρίσκεται στο Ιατρικό Κέντρο INAM για τη χρονική περίοδο από την 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2006 έως 31<sup>η</sup> Μαρτίου 2008. Συνολικά ο αριθμός των ψηφιακών μετρήσεων που αναλύθηκαν ήταν 1673 και αναφέρονται στις καρδιολογικές παραμέτρους, καρδιακός ρυθμός (HR) και διαστήματα RR, ελάχιστο RR<sub>min</sub>, μέγιστο RR<sub>max</sub>, μέσο RR<sub>avg</sub>.

Για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση από άλλους παράλληλους αντικειμενικούς ή υποκειμενικούς παράγοντες (περιβαντολογικές συνθήκες, τεχνητά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, κτλ) οι μετρήσεις γίνονταν σε ειδικό απομονωμένο δωμάτιο

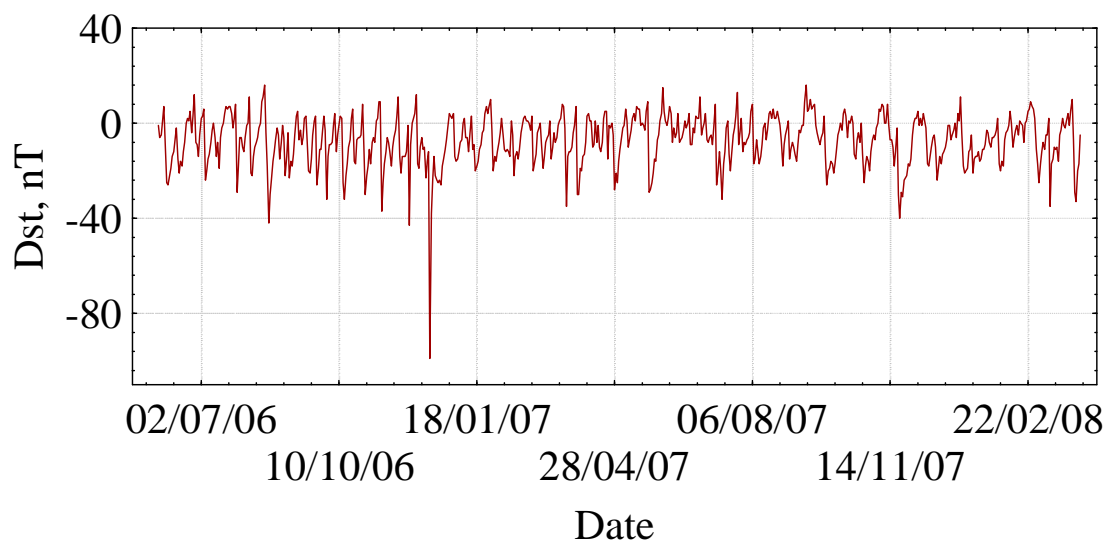
το οποίο είχε σχεδιαστεί για ιατρικούς σκοπούς αφού παρείχε στους εξεταζόμενους τη δυνατότητα πλήρους χαλάρωσης. Τα μέλη της ομάδας δεν είχαν καμία πληροφόρηση σχετικά με τις συνθήκες του διαστημικού καιρού πριν ή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Επιπλέον λαμβάνονταν υπόψη και η φυσιολογική και ψυχοφυσιολογική κατάσταση των ατόμων και σε περίπτωση παραπόνων (άγχος, συγκινησιακές καταστάσεις, γρίπη, ίωση, κτλ) η μέτρηση του συγκεκριμένου ατόμου δεν λαμβάνονταν υπόψη. Αυτά τα κενά στις μετρήσεις είναι σπάνια και μικρά ώστε να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος.

**Πίνακας 7.9** Η ομάδα των επτά ατόμων που συμμετείχαν στην έρευνα.

Εθελοντής	Ηλικία (το 2007)	Φύλο
p1	27	Άνδρας
p2	36	Γυναίκα
p3	22	Γυναίκα
p4	38	Γυναίκα
p5	47	Άνδρας
p6	31	Γυναίκα
p7	26	Άνδρας

#### 7.6.1.2 Δεδομένα γεωμαγνητικού πεδίου

Για την υπό εξέταση χρονική περίοδο χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμαγνητικοί δείκτες Dst και Ap. Συγκεκριμένα τα δεδομένα του γεωμαγνητικού δείκτη Dst προήλθαν από το World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Με βάση τη μέση ημερήσια τιμή του δείκτη Dst (Σχ. 7.21) η γεωμαγνητική δραστηριότητα χωρίστηκε σε τέσσερα επίπεδα (Ι0, Ι, ΙΙ, ΙΙΙ), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.10 (Kamide et al., 1998). Στον Πίνακα αυτό παρουσιάζεται, επίσης, ο αντίστοιχος αριθμός ημερών για κάθε γεωμαγνητικό επίπεδο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το επίπεδο 'Ι0', το οποίο αναφέρεται σε ημέρες με αρκετά χαμηλή γεωμαγνητική δραστηριότητα, έχει εισαχθεί και συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση αφού πολύ ασθενείς διακυμάνσεις ή ακόμη και απουσία διακυμάνσεων στο γεωμαγνητικό πεδίο μπορεί να έχουν δυσμενείς επιδράσεις στην ανθρώπινη φυσιολογική κατάσταση (Palmer et al., 2006; Stoupelet et al., 2007a).



Σχ. 7.21 Ημερήσιες μεταβολές του γεωμαγνητικού δείκτη  $Dst$  (nT) για την υπό εξέταση περίοδο από την 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2006 έως την 31<sup>η</sup> Μαρτίου 2008.

Παρόμοια ταξινόμηση σε επίπεδα (I0, I, II, III, IV) παρουσιάζεται και για τον γεωμαγνητικό δείκτη  $A_p$  (StoupeI, 1999, 2006; StoupeI et al., 2007a) που επίσης χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη (Πίνακας 7.10). Αυτά τα δεδομένα προήλθαν από το Space Weather Prediction Center at NOAA, Boulder, USA ([http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old\\_indices.html](http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html)).

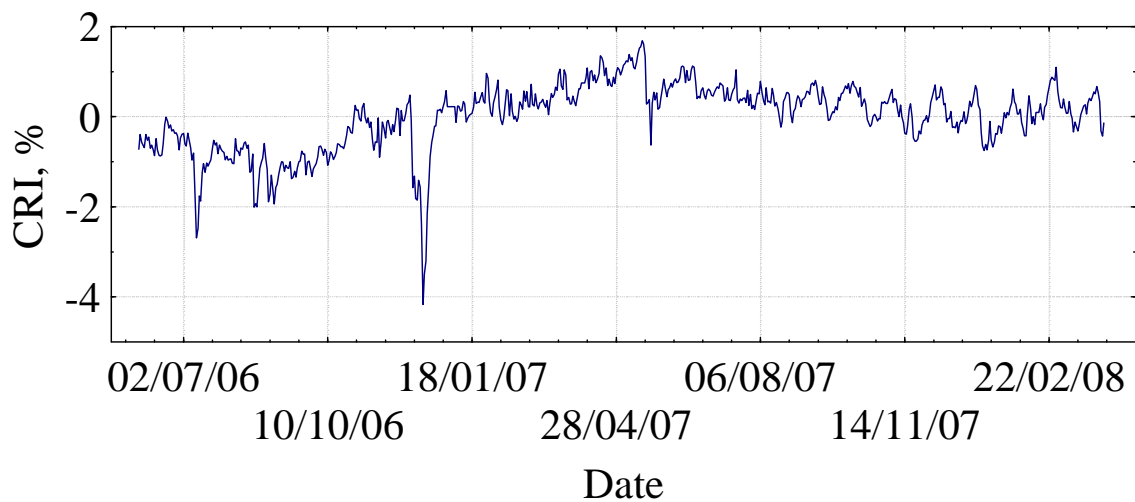
**Πίνακας 7.10** Τα επίπεδα των γεωμαγνητικών δεικτών  $Dst$  και  $A_p$  και ο αντίστοιχος αριθμός ημερών.

Dst επίπεδα	Τιμές δείκτη Dst (nT)	Αριθμός ημερών	$A_p$ επίπεδα	Τιμές δείκτη $A_p$	Αριθμός ημερών
<b>I0</b>	$Dst \geq 0$	494	<b>I0</b>	$A_p < 8$	986
<b>I</b>	$-20 < Dst < 0$	966	<b>I</b>	$8 \leq A_p < 15$	409
<b>II</b>	$-50 < Dst \leq -20$	208	<b>II</b>	$15 \leq A_p < 30$	248
<b>III</b>	$Dst \leq -50$	5	<b>III</b>	$30 \leq A_p < 50$	21
			<b>IV</b>	$A_p \geq 50$	9

### 7.6.1.3 Δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν ημερήσιες τιμές της διορθωμένης με την πίεση αδρονικής συνιστώσας της έντασης της κοσμικής

ακτινοβολίας από τον μετρητή νετρονίων (Super 6NM-64) του Πανεπιστημίου Αθηνών (γεωγραφικό πλάτος: 37° 58' Βόρεια; γεωγραφικό μήκος: 23° 47' Ανατολικά). Ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε ύψος 260m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και έχει κατώφλι μαγνητικής δυσκαμψίας 8.53 GV (βλ. Κεφ. III § 3.3.2). Λειτουργεί από τον Νοέμβριο 2000 παρέχοντας υψηλής ποιότητας δεδομένα πραγματικού χρόνου στο διαδίκτυο (<http://cosray.phys.uoa.gr>). Αυτά τα δεδομένα έχουν ανάλυση 1hr, 1min και 1sec και το στατιστικό λάθος είναι μικρότερο από το 0.3% σε ωριαία δεδομένα (Mavromichalaki et al., 2001; Mavromichalaki et al., 2005b). Πρέπει να σημειωθεί ότι το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού της Αθήνας είναι αρκετά κοντά σε αυτό του Baku, όπου διεξήχθη το πείραμα.



Σχ. 7.22 Κανονικοποιημένες ημερήσιες μεταβολές της CRI κατά τη διάρκεια του πειράματος από την 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2006 έως την 31<sup>η</sup> Μαρτίου 2008.

Τα δεδομένα της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κανονικοποιήθηκαν στη μέση τιμή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για τη χρονική περίοδο 15 Ιουλίου 2006 έως 31 Μαρτίου 2008 (Σχ. 7.22). Οι μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν από -4% έως +1%, δηλαδή οι μειώσεις που παρατηρήθηκαν ήταν μέχρι και -4% ενώ σημειώθηκαν και αυξήσεις έως και +1% (Πίνακας 7.11). Συνεπώς οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας χωρίστηκαν σε 6 επίπεδα βήματος 1%: -4%, -3%, -2%, -1%, 0%, 1%.

Κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου σημειώθηκε ένα σημαντικό γεγονός την 15<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2006 όταν ο δείκτης Dst είχε τιμή -99nT και η αντίστοιχη μείωση στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας ήταν περίπου -4% (Papailiou et al., 2009).

*Πίνακας 7.11 Μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και ο αντίστοιχος αριθμός ημερών.*

<b>CRI, %</b>	<b>Αριθμός ημερών</b>
<b>-4</b>	25
<b>-3</b>	271
<b>-2</b>	273
<b>-1</b>	32
<b>0</b>	435
<b>+1</b>	305

## 7.6.2 Αποτελέσματα

### 7.6.2.1 Ως προς τη γεωμαγνητική δραστηριότητα

Όπως και προηγουμένως, έτσι και στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ANOVA ώστε να προκύψουν τα επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της επίδρασης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας στις παραμέτρους HR, RRavg, RRmax και RRmin για τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες. Οι Πίνακες 7.12 και 7.13 δίνουν τις p-values για τους γεωμαγνητικούς δείκτες Ap και Dst αντίστοιχα ενδεικτικά για κάποιες από τις υπό εξέταση παραμέτρους που παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.12 για τον γεωμαγνητικό δείκτη Ap στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα προέκυψαν για τις παραμέτρους HR πριν (ημέρες -2 και -3) αλλά και μετά (ημέρα +3) το γεωμαγνητικό γεγονός. Για τις RRavg παραμέτρους τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα αφορούν, κυρίως, τις ημέρες πριν το γεωμαγνητικό γεγονός (ημέρες -2 και -3), ενώ για τις άλλες δύο παραμέτρους RRmax και RRmin περιορίζονται, κυρίως, τις ημέρες πριν το γεωμαγνητικό γεγονός (ημέρα -2).

**Πίνακας 7.12** Επίπεδα σημαντικότητας (*p-values*) της πιθανής επίδρασης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη *Ap*, σε όλες τις φυσιολογικές παραμέτρους τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές; *p<sub>i</sub>* δηλώνει το εξεταζόμενο πρόσωπο της ομάδας).

Ημέρα	p – values ( <i>Ap</i> )							
	HR <sub>p<sub>1</sub></sub>	HR <sub>p<sub>4</sub></sub>	RRavg <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRavg <sub>p<sub>4</sub></sub>	RRmax <sub>p<sub>2</sub></sub>	RRmax <sub>p<sub>3</sub></sub>	RRmin <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRmin <sub>p<sub>3</sub></sub>
-3	<b>0.02306*</b>	0.463	<b>0.04688*</b>	<b>0.04688*</b>	0.47880	0.11742	0.07625	0.56347
-2	<b>0.00864*</b>	0.22	<b>0.01353*</b>	0.14028	<b>0.02937*</b>	<b>0.01560*</b>	<b>0.01373*</b>	<b>0.00533*</b>
-1	0.56138	0.41	0.49318	0.49318	0.15785	0.90509	0.48382	0.82570
0	0.35169	0.123	0.41165	0.13451	0.56499	0.79667	0.66897	0.52161
+1	0.13997	0.340	0.29242	0.21052	0.78156	0.48016	0.40731	0.76431
+2	0.23987	0.278	0.15321	0.30478	0.16800	0.75013	0.40490	0.56264
+3	0.71170	<b>0.04*</b>	0.50128	0.66024	0.64108	0.89917	0.46051	<b>0.00062*</b>

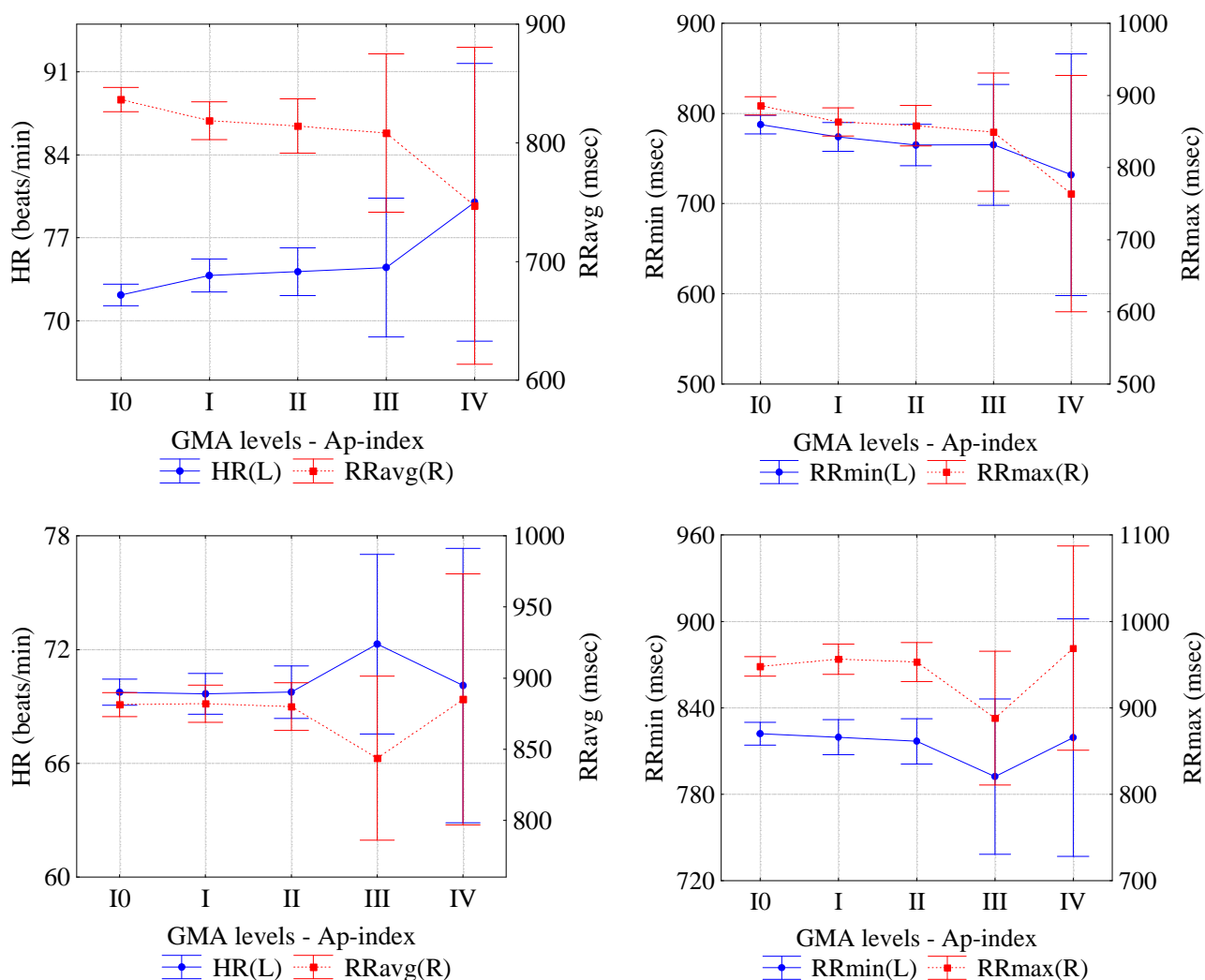
Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για τον γεωμαγνητικό δείκτη *Dst* αφού για όλες τις παραμέτρους τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα σημειώνονται κυρίως τις ημέρες πριν (-3, -2 και -1) ή κατά τη διάρκεια (ημέρα 0) του γεγονότος (Πίνακας 7.13).

**Πίνακας 7.13** Επίπεδα σημαντικότητας (*p-values*) της πιθανής επίδρασης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη *Dst*, σε όλες τις φυσιολογικές παραμέτρους τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές; *p<sub>i</sub>* δηλώνει το εξεταζόμενο πρόσωπο της ομάδας).

Ημέρα	p – values ( <i>Dst</i> )							
	HR <sub>p<sub>1</sub></sub>	HR <sub>p<sub>4</sub></sub>	RRavg <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRavg <sub>p<sub>4</sub></sub>	RRmax <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRmax <sub>p<sub>4</sub></sub>	RRmin <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRmin <sub>p<sub>4</sub></sub>
-3	<b>0.00138*</b>	0.485	<b>0.00382*</b>	<b>0.00382*</b>	<b>0.00905*</b>	<b>0.00905*</b>	<b>0.00414*</b>	<b>0.00414*</b>
-2	<b>0.00320*</b>	0.09	<b>0.00377*</b>	0.06434	0.06031	0.25477	<b>0.00123*</b>	<b>0.04496*</b>
-1	0.85588	<b>0.026*</b>	0.84544	0.84544	0.79558	0.79558	0.53306	0.53306
0	0.77558	0.169	0.67324	0.12296	0.59723	0.33487	0.85070	<b>0.04118*</b>
+1	0.12495	0.399	0.06208	0.99541	0.06738	0.96717	0.09170	0.96435
+2	0.18013	0.130	0.11469	0.07636	0.20320	0.35886	<b>0.04059*</b>	0.08748
+3	0.85657	0.076	0.85522	0.71190	0.90562	0.79373	0.81642	0.80154

Στα σχήματα 7.23 και 7.24 δίνονται οι μεταβολές όλων των υπό εξέταση παραμέτρων για τον εθελοντή *p<sub>4</sub>* (άνω διαγράμματα) και όλους τους εθελοντές (κάτω

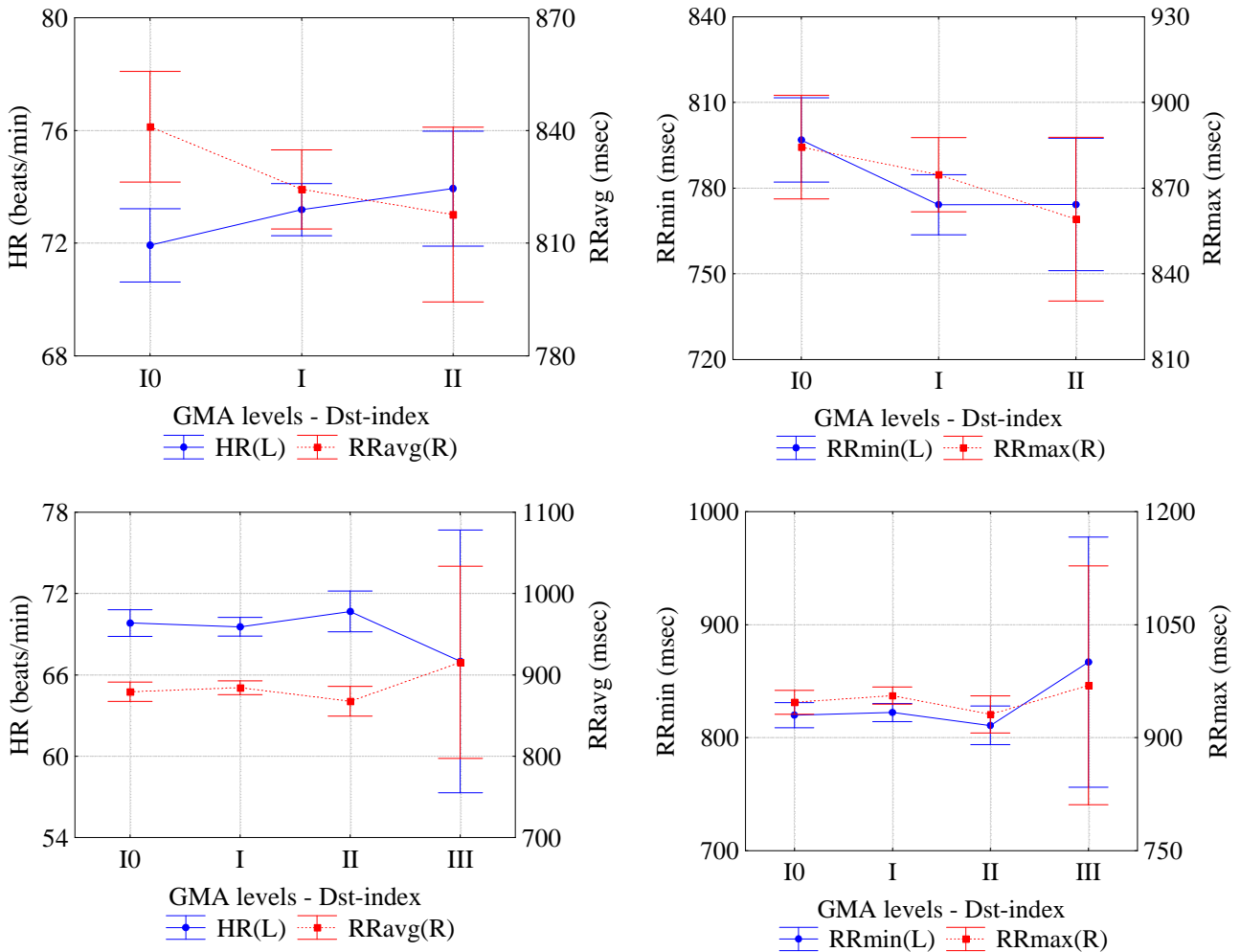
διαγράμματα) σε σχέση με τα διαφορετικά επίπεδα των γεωμαγνητικών δεικτών Ap και Dst αντίστοιχα, όπως αυτά έχουν καθοριστεί προηγουμένως (βλ. Πίνακα 7.9).



Σχ. 7.23 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, ως προς τον Ap, σε όλες τις παραμέτρους για τον εθελοντή p4 (άνω διαγράμματα) και για όλους τους εθελοντές (κάτω διαγράμματα) για την ημέρα 0 ( $\pm 95\%$  CI).

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.23 η υψηλή γεωμαγνητική δραστηριότητα (αύξηση των τιμών του γεωμαγνητικού δείκτη Ap) συνοδεύεται από τάση για αύξηση της παραμέτρου HR και μείωση της παραμέτρου RRavg (Mavromichalaki et al., 2008; Papailiou et al., 2010; Mavromichalaki et al., 2012), το οποίο συμφωνεί και με την αντίστροφη φυσική σχέση των δύο παραμέτρων HR και RR. Την ίδια

συμπεριφορά με την RRavg παρουσιάζουν και οι παράμετροι RRmax και RRmin. Μάλιστα για το επίπεδο IV σημειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή αντίστοιχα για τις παραμέτρους HR και RR. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν στον εθελοντή p4. Για όλη την ομάδα των εθελοντών τα αποτελέσματα φαίνεται να διαφέρουν λίγο, αφού στο επίπεδο III παρατηρείται μία αύξηση της τιμής του HR και μείωση της τιμής των RR και επαναφορά των τιμών τους στο επίπεδο IV.



Σχ. 7.24 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, ως προς τον Dst, σε όλες τις παραμέτρους για τον εθελοντή p4 (άνω διαγράμματα) και για όλους τους εθελοντές (κάτω διαγράμματα) για την ημέρα 0 ( $\pm 95\%$  CI).

Η υψηλή γεωμαγνητική δραστηριότητα (Σχ. 7.24), εκφρασμένη μέσω του γεωμαγνητικού δείκτη Dst (μείωση δηλαδή των τιμών του δείκτη Dst) φαίνεται να



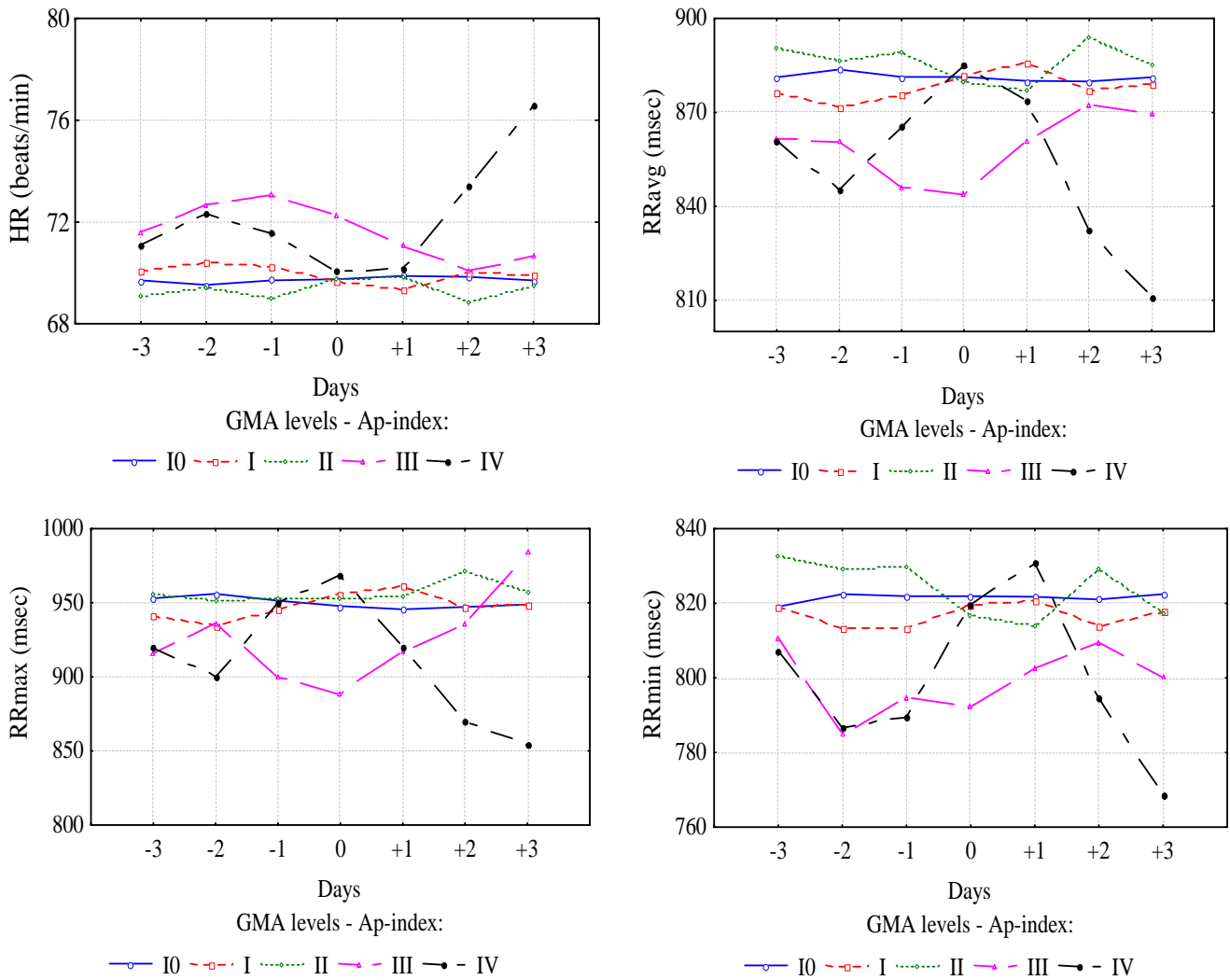
σχετίζεται με αύξηση των τιμών της παραμέτρου HR (Mavromichalaki et al., 2008; Mavromichalaki et al., 2012) και μείωση της παραμέτρου RRavg (Papailiou et al., 2010; Mavromichalaki et al., 2012). Αυτό, άλλωστε, συμφωνεί και με την αντίστροφη φυσική σχέση των δύο παραμέτρων HR και RR. Την ίδια συμπεριφορά με την RRavg παρουσιάζουν και οι RRmax και RRmin για τις οποίες η ελάχιστη τιμή τους αντιστοιχεί στο επίπεδο II του γεωμαγνητικού δείκτη Dst. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν στον εθελοντή p4. Για όλη την ομάδα των εθελοντών, όπως και προηγουμένως, φαίνεται να διαφέρουν.

Στο σχήμα 7.25 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων HR (άνω αριστερά διάγραμμα), RRavg (άνω δεξιά διάγραμμα), RRmax (κάτω αριστερά διάγραμμα) και RRmin (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Ap, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες για όλη την ομάδα εθελοντών.

Οι πιο έντονες μεταβολές των φυσιολογικών παραμέτρων, όπως προκύπτει από το σχήμα 7.25, παρατηρούνται στα υψηλά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας (επίπεδα III και IV). Συγκεκριμένα για το επίπεδο IV η παράμετρος HR παρουσίασε μειωμένες τιμές για τις ημέρες 0 και +1, στη συνέχεια αυξήθηκε την ημέρα +2 και τελικά πήρε μέγιστη τιμή την ημέρα +3 (Mavromichalaki et al., 2008; Mavromichalaki et al., 2012). Για το επίπεδο III οι τιμές του HR ήταν υψηλότερες από την ημέρα -3 έως την ημέρα 0 σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του τις ημέρες μετά από αυτές τις γεωμαγνητικές καταιγίδες μέτριας έντασης. Για τα χαμηλότερα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας (επίπεδα I0, I και II) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές (Mavromichalaki et al., 2012).

Σχετικά με την παράμετρο RRavg (Σχ. 7.25) η μέγιστη τιμή της σημειώνεται την ημέρα 0 για το επίπεδο IV (Papailiou et al., 2010). Τις ημέρες πριν τη γεωμαγνητική καταιγίδα σημειώνεται αύξηση και τις ημέρες που ακολουθούν τη γεωμαγνητική καταιγίδα μείωση. Αντίστροφα είναι τα αποτελέσματα για το επίπεδο III, για το οποίο την ημέρα 0 σημειώνεται ελάχιστη τιμή της RRavg. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι παράμετροι RRmax και RRmin, μόνο που η RRmin σημειώνει το μέγιστο την ημέρα +1 μετά την έντονη γεωμαγνητική καταιγίδα

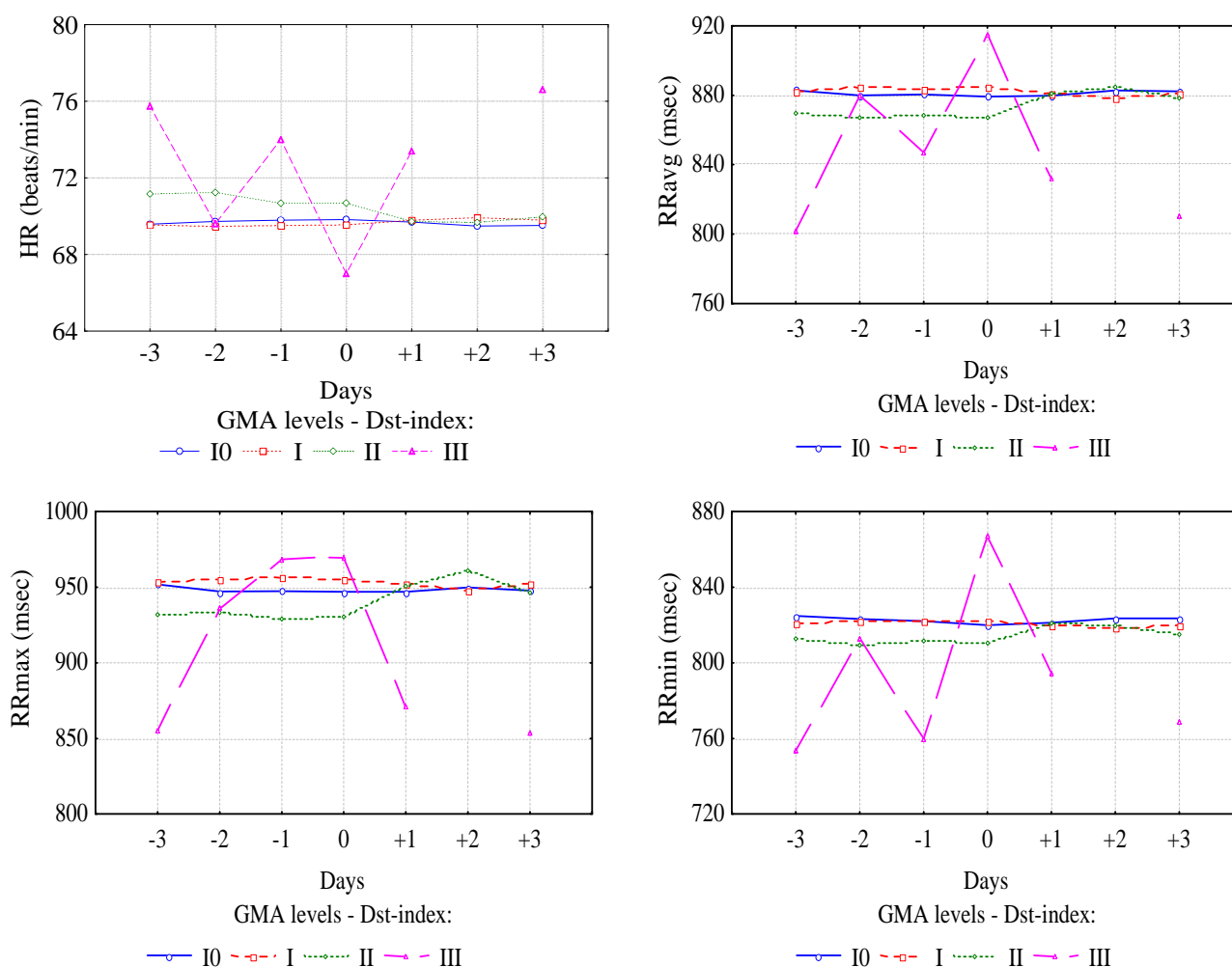
επιπέδου IV και το ελάχιστο την ημέρα -2 πριν τη μέτρια γεωμαγνητική καταιγίδα επιπέδου III.



Σχ. 7.25 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Ap, σε όλη την ομάδα πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

Στο σχήμα 7.26 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων HR (άνω αριστερά διάγραμμα), RRavg (άνω δεξιά διάγραμμα), RRmax (κάτω αριστερά διάγραμμα) και RRmin (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τα διαφορετικά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας, με βάση τον δείκτη Dst, τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες για όλη την ομάδα εθελοντών.

Οι πιο έντονες μεταβολές των φυσιολογικών παραμέτρων αφορούν στα επίπεδα II και III του γεωμαγνητικού δείκτη Dst (Σχ. 7.26). Σχετικά με την παράμετρο HR και για το επίπεδο II σημειώθηκε αύξηση από την ημέρα -3 έως την ημέρα 0 και στη συνέχεια επαναφορά των τιμών (Mavromichalaki et al., 2012). Για το επίπεδο III ο HR παρουσίασε απότομες αυξήσεις για τις ημέρες -3, -1, +1 και +3 και μείωση την ημέρα 0 (Mavromichalaki et al., 2008). Οι πιο έντονες μεταβολές των παραμέτρων RRavg, RRmax και RRmin εμφανίζονται στο υψηλότερο επίπεδο γεωμαγνητικής δραστηριότητας, δηλαδή το επίπεδο III (Mavromichalaki et al., 2012). Η μέγιστη τιμή τους σημειώνεται την ημέρα του γεγονότος (ημέρα 0) και η ελάχιστη την ημέρα -3. Για το επίπεδο II παρατηρούνται μειωμένες τιμές των παραμέτρων RR από την ημέρα -3 έως και την ημέρα 0 και στη συνέχεια επαναφορά των τιμών.



Σχ. 7.26 Επίδραση της γεωμαγνητικής δραστηριότητας, μέσω του δείκτη Dst, σε όλη την ομάδα πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από γεωμαγνητικές καταιγίδες.

### 7.6.2.2 Ως προς την κοσμική ακτινοβολία

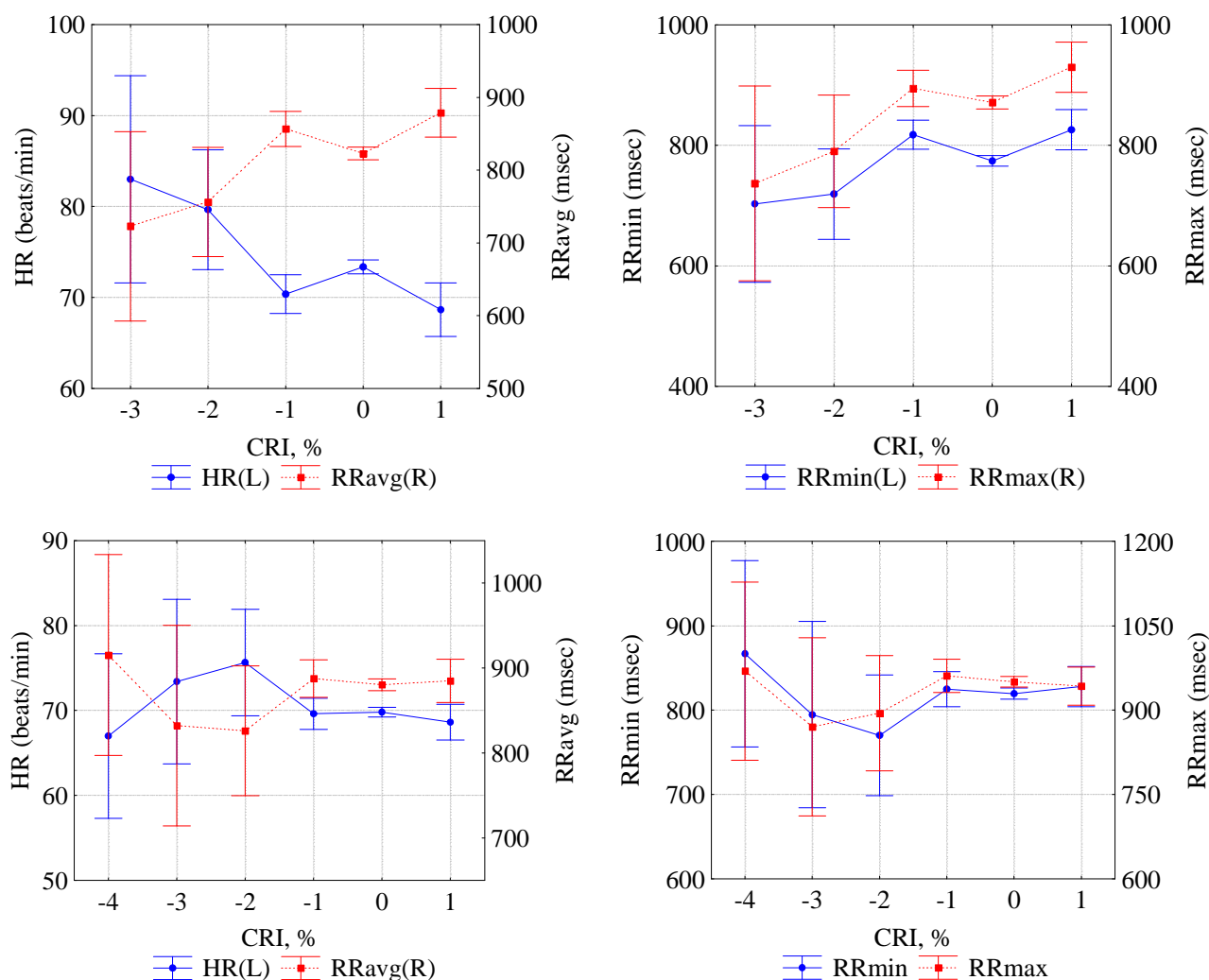
Η μέθοδος ANOVA χρησιμοποιήθηκε ώστε να προκύψουν τα επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της επίδρασης των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στις παραμέτρους HR, RRavg, RRmax και RRmin για τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Ο Πίνακας 7.14 δίνει τις p-values για την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας για όλες τις υπό εξέταση παραμέτρους που παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα (Mavromichalaki et al., 2012).

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.14 για την παράμετρο HR τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα σημειώνονται τις ημέρες πριν, κατά τη διάρκεια αλλά και μετά από μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Για την παράμετρο RRavg τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα για την πλειοψηφία των εθελοντών αφορούν κυρίως στις ημέρες πριν (ημέρες -3 και -2), κατά τη διάρκεια (ημέρα 0) και μετά (ημέρα +2) τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Papaïliou et al., 2010). Στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα προέκυψαν, επίσης, για τις παραμέτρους RRmax και RRmin για τις ημέρες πριν (ημέρες -3 και -2), κατά τη διάρκεια (ημέρα 0) και μετά (ημέρες +1 και +2) τη μεταβολή της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Mavromichalaki et al., 2012).

*Πίνακας 7.14 Επίπεδα σημαντικότητας (p-values) της πιθανής επίδρασης της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε όλες τις φυσιολογικές παραμέτρους τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (οι τιμές που σημειώνονται με <\*> είναι στατιστικά σημαντικές; p<sub>i</sub> δηλώνει το εξεταζόμενο πρόσωπο της ομάδας).*

Ημέρα	p – values (CRI)							
	HRp <sub>1</sub>	HRp <sub>4</sub>	RRavgp <sub>1</sub>	RRavgp <sub>4</sub>	RRmaxp <sub>3</sub>	RRmaxp <sub>4</sub>	RRminp <sub>1</sub>	RRminp <sub>4</sub>
-3	<b>0.04109*</b>	<b>0.0003*</b>	<b>0.03878*</b>	<b>0.03878*</b>	0.64559	0.19476	<b>0.02936*</b>	<b>0.02936*</b>
-2	<b>0.02374*</b>	<b>0.0002*</b>	<b>0.01175*</b>	<b>0.00013*</b>	0.31369	<b>0.01338*</b>	<b>0.01107*</b>	<b>0.00014*</b>
-1	0.21960	<b>0.003*</b>	0.19345	0.19345	0.07788	0.40637	0.16417	0.16417
0	<b>0.04282*</b>	<b>0.0003*</b>	<b>0.03916*</b>	<b>0.00031*</b>	0.07255	<b>0.00576*</b>	0.08669	<b>0.00026*</b>
+1	0.11133	<b>0.00007*</b>	0.06004	0.74668	<b>0.00419*</b>	0.69609	<b>0.03539*</b>	0.90353
+2	0.05431	<b>0.00012*</b>	<b>0.02587*</b>	<b>0.00011*</b>	0.16539	<b>0.00129*</b>	<b>0.03984*</b>	<b>0.00020*</b>
+3	0.16539	<b>0.0002*</b>	0.13795	0.25258	<b>0.03215*</b>	0.46216	0.36634	0.46453

Στο σχήμα 7.27 δίνονται οι μεταβολές όλων των υπό εξέταση παραμέτρων για τον εθελοντή p4 (άνω διαγράμματα) και όλους τους εθελοντές (κάτω διαγράμματα) σε σχέση με τις διάφορες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, όπως αυτές έχουν καθοριστεί προηγουμένως (βλ. Πίνακας 7.11).



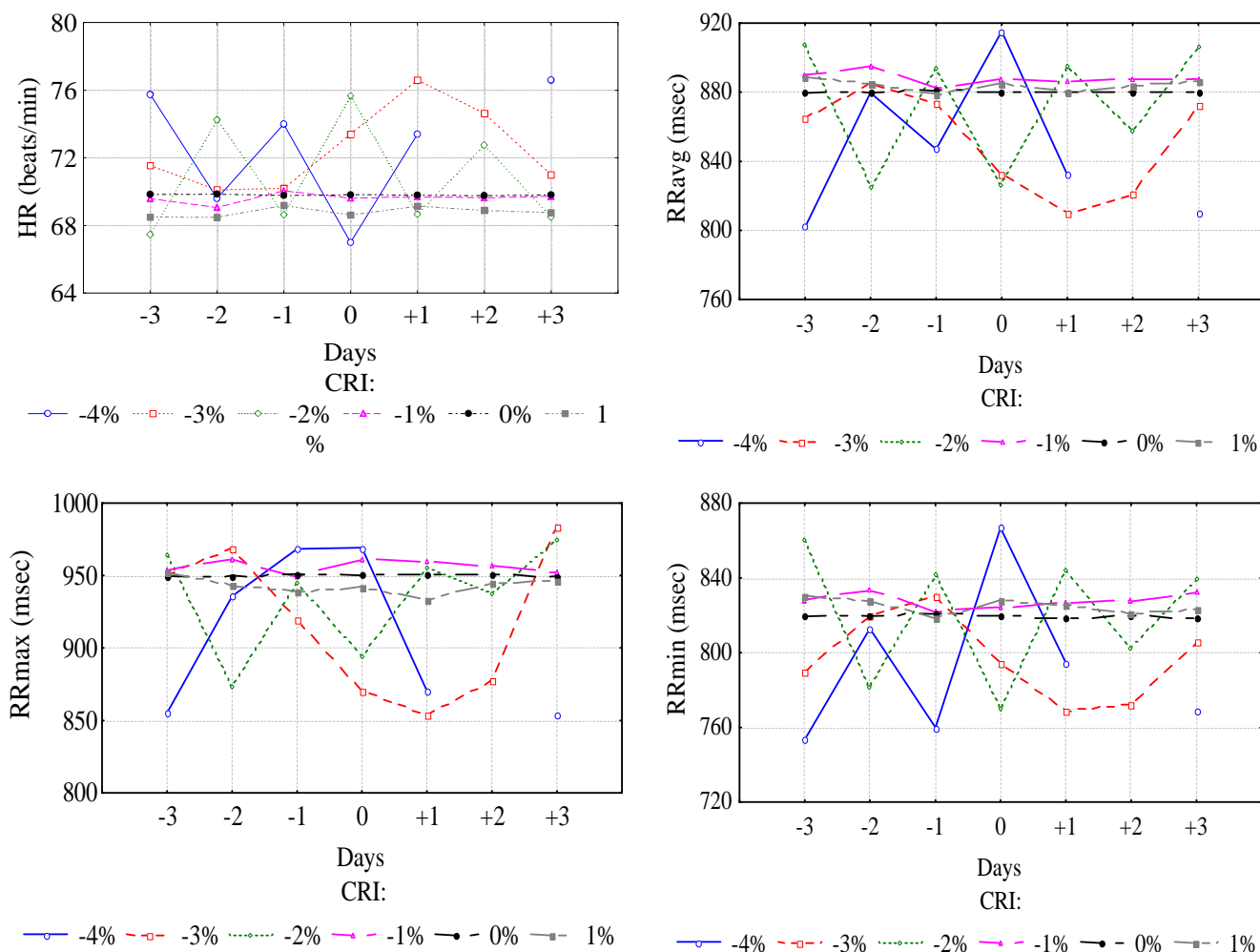
Σχ. 7.27 Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε όλες τις παραμέτρους για τον εθελοντή p4 (άνω διαγράμματα) και για όλους τους εθελοντές (κάτω διαγράμματα) για την ημέρα 0 ( $\pm 95\%$  CI).

Για τον εθελοντή p4 (Σχ. 7.27, άνω διαγράμματα) μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (-2% και -3%) συνοδεύονται από τάση για αύξηση της HR (Mavromichalaki et al., 2008). Μάλιστα η μέγιστη τιμή παρατηρείται για μειώσεις της τάξης -3%. Αντίστοιχα για την παράμετρο RRavg σημειώνεται η

αντίστροφη συμπεριφορά (Papaïliou et al., 2010), δηλαδή ελάχιστη τιμή της RRavg για μειώσεις της τάξης του -3%. Παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή τάση για μείωση για τις μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζουν και οι παράμετροι RRmax και RRmin (Mavromichalaki et al., 2012). Αυτό, άλλωστε, συμφωνεί και με την αντίστροφη φυσική σχέση των δύο παραμέτρων HR και RR. Για όλη την ομάδα στις μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας η συμπεριφορά των παραμέτρων παρουσιάζεται αντιστραμμένη, αφού για μειώσεις της τάξης -4% η παράμετρος HR έχει ελάχιστη τιμή και η RR (RRavg, RRmax και RRmin) μέγιστη.

Στο σχήμα 7.28 δίνονται οι μεταβολές των παραμέτρων HR (άνω αριστερά διάγραμμα), RRavg (άνω δεξιά διάγραμμα), RRmax (κάτω αριστερά διάγραμμα) και RRmin (κάτω δεξιά διάγραμμα) για τις διαφορετικές μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για όλη την ομάδα εθελοντών.

Η παράμετρος HR για όλη την ομάδα των εθελοντών (Σχ. 7.28) παρουσίασε απότομες αυξομειώσεις τις ημέρες πριν (-3, -2, -1), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+1, +2, +3) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας της τάξης του -4%, -3% και -2% (Mavromichalaki et al., 2008). Η ελάχιστη τιμή της HR, για μειώσεις της τάξης -4%, παρατηρείται την ημέρα 0. Για μειώσεις της τάξης -3% και -2% σημειώνεται μέγιστο τις ημέρες +1 και 0 αντίστοιχα. Ομοίως απότομες αυξομειώσεις κάποιες ημέρες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τις μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσίασε και η παράμετρος RRavg (Papaïliou et al., 2010) αλλά και οι RRmax και RRmin. Συγκεκριμένα, για μειώσεις της τάξης -4% οι παράμετροι RR είχαν μέγιστη τιμή την ημέρα 0 και ελάχιστη την ημέρα -3. Για μειώσεις της τάξης -3% σημειώνεται ελάχιστο την ημέρα +1 για όλες τις παραμέτρους και για μειώσεις της τάξης -2% σημειώνεται ελάχιστο την ημέρα -2 (RRavg και RRmax) και την ημέρα 0 (RRmin). Πρέπει να τονιστεί ότι ασθενείς μειώσεις (-1%), καμία μεταβολή (0%), ή ασθενείς θετικές μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας δεν φαίνεται να επηρεάζουν τις φυσιολογικές παραμέτρους (Mavromichalaki et al., 2012).



Σχ. 7.28 Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε όλη την ομάδα πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι μία ημέρα πριν (ημέρα -1) από τις έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες, ως προς τους δείκτες Ap (Σχ. 7.25) και Dst (Σχ. 7.26), αλλά και τις πιο έντονες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Σχ. 7.28) οι παράμετροι RRmin και RRmax δεν παρουσίασαν αντίστοιχες μεταβολές. Αυτό μπορεί να είναι ένδειξη αρρυθμίας, αλλά απαιτείται περαιτέρω μελέτη και ανάλυση (Papailiou et al., 2010; Mavromichalaki et al., 2012).

Τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος προέκυψαν μετά από την επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων για όλους τους εθελοντές (all data), δηλαδή λήφθηκαν υπόψη όλες οι μετρήσεις από όλα τα άτομα της ομάδας, αλλά και για κάθε

άτομο της ομάδας (p1, p2, p3, p4, p5, p6 και p7) ξεχωριστά, όπου λήφθηκαν υπόψη κάθε φορά οι μετρήσεις των ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων καθενός εθελοντή.

Συνοπτικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεταβολές των παραμέτρων HR και RR φαίνεται να σχετίζονται με γεωμαγνητικές διαταραχές και μεταβολές στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι επιδράσεις είναι πιο έντονες για τα υψηλά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας (γεωμαγνητική καταιγίδα) και τις ισχυρές μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Mavromichalaki et al., 2008; Parailiou et al., 2010, Παπαηλιού, κ.α. 2010; Mavromichalaki et al., 2012).

## 7.7 Συμπεράσματα

Η πιθανή επίδραση των μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στην ανθρώπινη φυσιολογία έχει απασχολήσει τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα και έχει αποτελέσει κύριο θέμα σύγχρονων ερευνών (Zhadin, 2001; Dorman, 2005; Palmer et al., 2006; Dimitrova, 2007; Babayev et al., 2007; Stoupel et al., 2007c; 2009). Η συγκεκριμένη μελέτη, μέσω της ανάλυσης των δεδομένων δύο πειραμάτων ηλιοβιολογίας, όπως περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, είχε ως στόχο να ρίξει φως στην πιθανή σχέση διαστημικού καιρού και ανθρώπινης υγείας και να συμβάλει σε αυτού του τύπου τις έρευνες.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο πειράματα είναι αρκετά ενδιαφέροντα και συνοψίζονται παρακάτω.

Στο **πείραμα του Košice** (Σλοβακία) μέσες ημερήσιες τιμές καρδιακού ρυθμού και αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης που αφορούν σε μία ομάδα 4018 αεροπόρων αναλύθηκαν σε σχέση με γεωμαγνητικές διαταραχές και μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Παρακάτω δίνονται συνοπτικά τα σημαντικότερα αποτελέσματα.



❖ **Ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο**

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης παρουσίασαν τάση για μείωση στα υψηλά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας για την ημέρα 0. Μάλιστα οι ελάχιστες τιμές τους παρατηρούνται στα επίπεδα III ( $-100 < Dst \leq -50$  και  $30 \leq Ap < 50$ ) και IV ( $Dst \leq -100$  και  $Ap \geq 50$ ) των γεωμαγνητικών δεικτών Ap και Dst.

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης μεταβάλλονται σημαντικά τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες. Μάλιστα, οι μεταβολές αυτές είναι εντονότερες για τα επίπεδα III και IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας.

- Για το επίπεδο IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας παρατηρείται μείωση των τιμών των φυσιολογικών παραμέτρων τις ημέρες πριν τα έντονα γεγονότα και στη συνέχεια αύξηση αυτών τις ημέρες μετά τα γεγονότα. Τη συμπεριφορά αυτή παρουσιάζει η πλειοψηφία των φυσιολογικών παραμέτρων, εκτός από τις περιπτώσεις που σημειώνονται απότομες αυξομειώσεις για διαφορετικές ημέρες, κυρίως για τις παραμέτρους της διαστολικής πίεσης.

- Για το επίπεδο IV του γεωμαγνητικού δείκτη Ap οι παράμετροι του καρδιακού ρυθμού και της συστολικής πίεσης (εκτός της SPMAX) παρουσιάζουν ελάχιστη τιμή μία ημέρα πριν τη γεωμαγνητική καταιγίδα (ημέρα -1), ενώ οι παράμετροι της διαστολικής πίεσης (εκτός της DPR και της DSDL) την ημέρα -3.

- Για το επίπεδο IV του γεωμαγνητικού δείκτη Dst, οι παράμετροι του καρδιακού ρυθμού (εκτός της HRR), εμφανίζουν ελάχιστη τιμή την ημέρα -3, ενώ οι παράμετροι της συστολικής πίεσης είτε την ημέρα 0 (SPMAX και SPFDL) είτε την ημέρα -1 (SPR και SPSDL). Οι παράμετροι της διαστολικής πίεσης DPR, DPMAX και DPSDL εμφανίζουν ελάχιστο τις

ημέρες -1 και 0 αντίστοιχα, ενώ η DPFDL εμφανίζει απότομες αυξομειώσεις.

- Όπως προκύπτει από τις p-values, τα επίπεδα του δείκτη  $A_p$  φαίνεται να επιδρούν περισσότερο στον καρδιακό ρυθμό (HRR, HRFDL και HRSDL) και στη συνέχεια στη συστολική πίεση (μόνο στην παράμετρο SPMAX τις ημέρες 0 και +1). Δεν εμφανίζονται στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα για καμία παράμετρο της διαστολικής πίεσης.

- Όπως προκύπτει από τις p-values, τα επίπεδα του δείκτη  $D_{st}$  φαίνεται να επιδρούν σε όλες τις παραμέτρους του καρδιακού ρυθμού (HRR, HRMAX, HRFDL και HRSDL) τις ημέρες πριν (-3, -2 και -1) από μεταβολές της γεωμαγνητικής δραστηριότητας. Για τις παραμέτρους της συστολικής (SPR, SPMAX, SPFDL και SPSDL) και της διαστολικής πίεσης (DPR, DPMAX, DPFDL και DPSDL) στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα σημειώνονται την ημέρα +3 μετά τη γεωμαγνητική διαταραχή.

#### ❖ Ως προς την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και συστολικής πίεσης παρουσίασαν τάση για μείωση κατά τις έντονες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (μειώσεις της τάξης από -16% έως -6%). Η συμπεριφορά των παραμέτρων της διαστολικής πίεσης διαφοροποιείται, αφού παρατηρήθηκε αύξηση των τιμών τους από το επίπεδο -2 (μειώσεις από -11% έως -6%) στο επίπεδο -3 (μειώσεις από -16% έως -11%), όπου σημειώθηκε και η μέγιστη τιμή.

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και αρτηριακής συστολικής και διαστολικής πίεσης μεταβάλλονται σημαντικά τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Μάλιστα, οι μεταβολές αυτές είναι εντονότερες για το επίπεδο -3 της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

- Για το επίπεδο -3 της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, παρατηρείται μείωση των τιμών των φυσιολογικών παραμέτρων τις ημέρες πριν τις έντονες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και στη συνέχεια αύξηση αυτών τις ημέρες μετά. Τη συμπεριφορά αυτή παρουσιάζει η πλειοψηφία των φυσιολογικών παραμέτρων, εκτός από τις περιπτώσεις που σημειώνονται απότομες αυξομειώσεις για διαφορετικές ημέρες, κυρίως για τις παραμέτρους της διαστολικής πίεσης.

- Για το επίπεδο -3, οι παράμετροι του καρδιακού ρυθμού λαμβάνουν τις ελάχιστες τιμές τους την ημέρα της μείωσης, δηλαδή την ημέρα 0 (εκτός της HRR). Για τις παραμέτρους της συστολικής πίεσης, οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται, επίσης την ημέρα 0 (εκτός της SPMAX). Οι παράμετροι της διαστολικής πίεσης σημειώνουν ελάχιστη τιμή δύο ημέρες πριν τη μείωση (ημέρα -2) εκτός της DPR (ημέρα -1).

- Όπως προκύπτει από τις p-values, οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας φαίνεται να έχουν σημαντικότερη επίδραση στον καρδιακό ρυθμό (οι παράμετροι HRMAX, HRFDL και HRSDL παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα για όλες τις ημέρες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας). Στη συνέχεια ακολουθούν η συστολική και η διαστολική πίεση.

Στο **πείραμα του Baku** (Αζερμπαϊτζάν) ημερήσιες τιμές καρδιακού ρυθμού και διαστημάτων RR που αφορούν σε μία ομάδα υγιών εθελοντών αναλύθηκαν σε σχέση με γεωμαγνητικές διαταραχές και μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Παρακάτω δίνονται συνοπτικά τα σημαντικότερα αποτελέσματα.

#### ❖ Ως προς το γεωμαγνητικό πεδίο

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και διαστημάτων RR παρουσίασαν τάση για αύξηση και μείωση αντίστοιχα στα υψηλά επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας για την ημέρα 0. Μάλιστα οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους αντίστοιχα παρατηρούνται στα επίπεδα III ( $30 \leq A_p$

< 50) και IV ( $A_p \geq 50$ ) του γεωμαγνητικού δείκτη  $A_p$  και στο επίπεδο III ( $Dst \leq -50$ ) του γεωμαγνητικού δείκτη  $Dst$ .

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και διαστημάτων RR μεταβάλλονται σημαντικά τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες. Μάλιστα, οι μεταβολές αυτές είναι εντονότερες για τα επίπεδα III και IV της γεωμαγνητικής δραστηριότητας.

- Για το επίπεδο IV του γεωμαγνητικού δείκτη  $A_p$ , οι ελάχιστες τιμές του καρδιακού ρυθμού σημειώθηκαν τις ημέρες 0 και +1, ενώ για τις παραμέτρους RR τις ίδιες ημέρες σημειώθηκαν οι μέγιστες τιμές τους.

- Για το επίπεδο IV του γεωμαγνητικού δείκτη  $Dst$ , τόσο στον καρδιακό ρυθμό όσο και στα διαστήματα RR παρατηρήθηκαν απότομες αυξομειώσεις και την ημέρα 0 σημειώθηκε η ελάχιστη τιμή για τον καρδιακό ρυθμό και η μέγιστη για τις παραμέτρους RR.

- Όπως προκύπτει από τις p-values σχετικά με την επίδραση των μεταβολών της γεωμαγνητικής δραστηριότητας στις παραμέτρους HR και RR τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα αφορούν κυρίως τις ημέρες πριν το γεωμαγνητικό γεγονός.

#### ❖ Ως προς την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και διαστημάτων RR παρουσίασαν τάση για αύξηση και μείωση αντίστοιχα κατά τις έντονες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για την ημέρα 0. Μάλιστα οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους αντίστοιχα παρατηρούνται για μειώσεις της τάξης από -3% έως -2%.

- Οι φυσιολογικές παράμετροι καρδιακού ρυθμού και διαστημάτων RR μεταβάλλονται σημαντικά τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Μάλιστα,

οι μεταβολές αυτές είναι εντονότερες για μεταβολές της τάξης του -3% και -4% της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας.

- Για έντονες μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (μειώσεις από -4% έως -2%) ο καρδιακός ρυθμός παρουσίασε απότομες αυξομειώσεις τις ημέρες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από αυτές τις μεταβολές. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν και οι παράμετροι RR για όλη την ομάδα.

- Συγκεκριμένα για τις πιο έντονες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (-4%), την ημέρα της μείωσης ο καρδιακός ρυθμός είχε ελάχιστη τιμή και οι παράμετροι RR μέγιστη.

- Όπως προκύπτει από τις p-values σημαντικότερη φαίνεται να είναι η επίδραση των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στην παράμετρο του καρδιακού ρυθμού σε σχέση με τις παραμέτρους RR.

Όπως παρατηρείται η συμπεριφορά του καρδιακού ρυθμού και των διαστημάτων RR σε σχέση με τις μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας επαληθεύει και τη μεταξύ τους φυσική σχέση: όσο πιο μεγάλος είναι ο καρδιακός ρυθμός (περισσότεροι παλμοί ανά δευτερόλεπτο) τόσο μικρότερα είναι τα διαστήματα RR. Επίσης, μπορεί να σημειώνονται διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων όταν η ανάλυση αφορά στον κάθε εθελοντή ξεχωριστά, το οποίο είναι μία ένδειξη ότι οι περιβαλλοντικές μεταβολές είναι πιθανό να έχουν διαφορετική επίδραση στη φυσιολογία του κάθε ατόμου.

Σύμφωνα με τη θεωρία περί προσαρμογής (General Adaptation Syndrome Theory) του Hans Selye (Selye, 1956) η τυπική αντίδραση του ανθρώπινου οργανισμού σε κάθε στρεσογόνο παράγοντα μεγάλης διάρκειας χαρακτηρίζεται από τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο (Alarm) οι φυσιολογικές λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού πέφτουν κάτω από το βέλτιστο επίπεδο. Στο δεύτερο στάδιο (Resistance) τα αντισταθμιστικά συστήματα του οργανισμού φτάνουν στο μέγιστο της απόδοσης τους δουλεύοντας σε επίπεδα πάνω από τα ομοιοστατικά. Όταν, όμως, ο οργανισμός εξαντλήσει την ενέργεια του ξεκινάει το τρίτο στάδιο (Exhaustion) και

οι φυσιολογικές παράμετροι πέφτουν. Η φάση αυτή είναι η πιο επικίνδυνη για τον οργανισμό ο οποίος δεν μπορεί πλέον να συνεχίσει να αντιστέκεται στους περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες, με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπής σε κάθε ασθένεια. Αυτό είναι το στάδιο που συνήθως οι ασθενείς εκφράζουν τις ενοχλήσεις τους ή καλούν ασθενοφόρο (Khabarova & Dimitrova, 2009). Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν από την ανάλυση της αρτηριακής πίεσης ατόμων που εξετάστηκαν στη Σόφια και στη Μόσχα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση της αρτηριακής πίεσης πριν από μεταβολές τόσο του καιρού όσο και του διαστημικού καιρού, αύξηση κατά τη διάρκεια των περιβαντολλογικών μεταβολών καθώς και λίγο μετά από αυτές και τέλος απότομη μείωση μετά το πέρας των γεγονότων αυτών (Khabarova & Dimitrova, 2009). Τα αποτελέσματα στην παρούσα μελέτη επιβεβαιώνουν για ακόμα μία φορά ότι η γεωμαγνητική δραστηριότητα και οι μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να επιδράσουν στην ανθρώπινη φυσιολογική κατάσταση. Επίσης, δείχνουν ότι πρόκειται, όπως άλλωστε επισημάνθηκε στον Selye (1956) και σύμφωνα με το ‘General Adaptation Syndrome’, για μία αναγκαία αντίδραση προσαρμογής και όχι για κάτι που συμβαίνει κατ’ εξαίρεση.

Συνοπτικά από την ανάλυση των δεδομένων των δύο πειραμάτων, όπως παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, προκύπτει ότι τα πιο σημαντικά αποτελέσματα αφορούν στην επίδραση των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας στον καρδιακό ρυθμό. Επιπλέον, οι μέγιστες ή οι ελάχιστες τιμές των φυσιολογικών παραμέτρων σημειώνονται στα υψηλότερα επίπεδα γεωμαγνητικής δραστηριότητας ή στις μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Τέλος, οι φυσιολογικές παράμετροι μεταβάλλονται σημαντικά τις ημέρες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από έντονα γεγονότα (γεωμαγνητικές καταιγίδες και μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

#### 8.1 Εισαγωγή

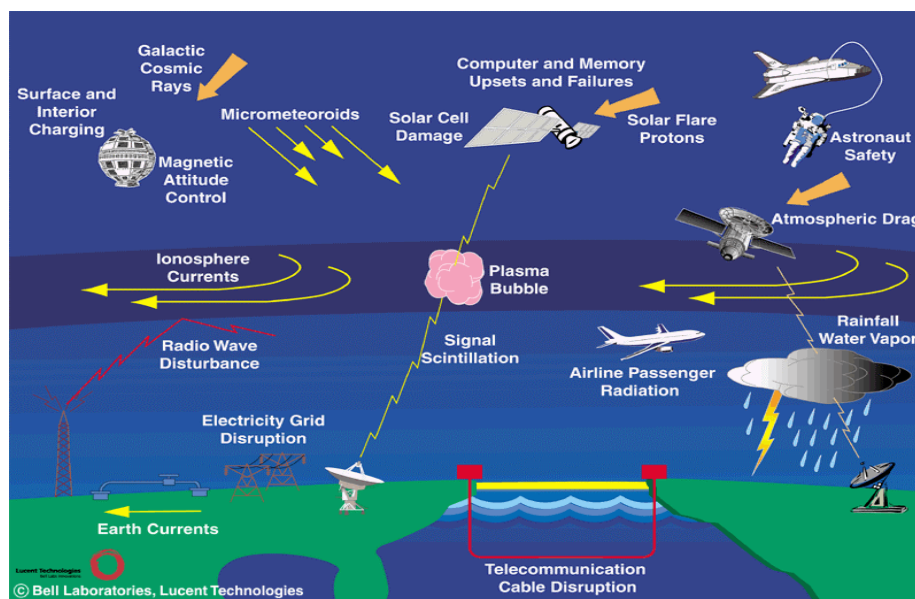
Πριν να παρουσιαστούν τα τελικά συμπεράσματα και οι προοπτικές αυτής της εργασίας κρίθηκε απαραίτητο να παρουσιαστούν περιληπτικά μερικές από τις πιο σημαντικές επιπτώσεις του διαστημικού καιρού που αφορούν αφενός μεν στις ανθρώπινες δραστηριότητες αφετέρου δε στην ανθρώπινη υγεία. Στη συνέχεια, συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα αυτής της διατριβής και τέλος αναφέρονται οι προοπτικές και οι δυνατότητες για τη συνέχιση της παρούσας μελέτης.

#### 8.2 Επιπτώσεις διαστημικού καιρού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. Εισαγωγή) ο Διαστημικός Καιρός (space weather) είναι ένα σχετικά νέο πεδίο της επιστήμης το οποίο είναι αφιερωμένο στην κατανόηση των μηχανισμών του συστήματος Ήλιος – Διαπλανητικός χώρος – Γη (<http://www.spaceweather.com/>). Μάλιστα, όσο αυξάνεται η εξάρτηση του ανθρώπου από τις διαστημικές ή επίγειες τεχνολογίες, οι οποίες επηρεάζονται από μεταβολές στο ηλιακό – γήινο περιβάλλον (geospace), τόσο πιο επιτακτική γίνεται και η ανάγκη μελέτης αυτού του κλάδου. Η μεγαλύτερη πρόκληση αλλά και απώτερος σκοπός είναι η πρόγνωση επικίνδυνων διαταραχών που λαμβάνουν χώρα στο ευρύτερο περιβάλλον της Γης, αφού οι ποικίλες περίπλοκες διαδικασίες, οι οποίες συμβαίνουν σε αυτό το σύστημα, μπορούν να επηρεάσουν, όχι μόνο τη λειτουργία τεχνολογικών συσκευών, αλλά επίσης και διαφορετικές πλευρές της ζωής στη Γη (Kudela et al., 2000; Kudela, 2013).

Τα φαινόμενα του διαστημικού καιρού οφείλονται σε παροδικά ηλιακά φαινόμενα, όπως ηλιακές εκλάμψεις και στεμματικές εκτινάξεις μάζας και η επίδραση τους εμφανίζεται με διάφορους τρόπους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.1.

Τα συγκεκριμένα φαινόμενα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ([http://www.iiar.res.in/ihy/school/prasad\\_lecture.pdf](http://www.iiar.res.in/ihy/school/prasad_lecture.pdf)), αυτά που οφείλονται στις ηλιακές κοσμικές ακτίνες/ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (solar energetic particles, SEPs) (βλ. Κεφ. II § 2.2) και αυτά που συνδέονται με τις γεωμαγνητικές καταιγίδες (βλ. Κεφ. I § 1.6). Στο σχήμα 8.2 δίνονται σχηματικά οι επιδράσεις των διαφόρων ηλιακών φαινομένων στις ανθρώπινες δραστηριότητες.



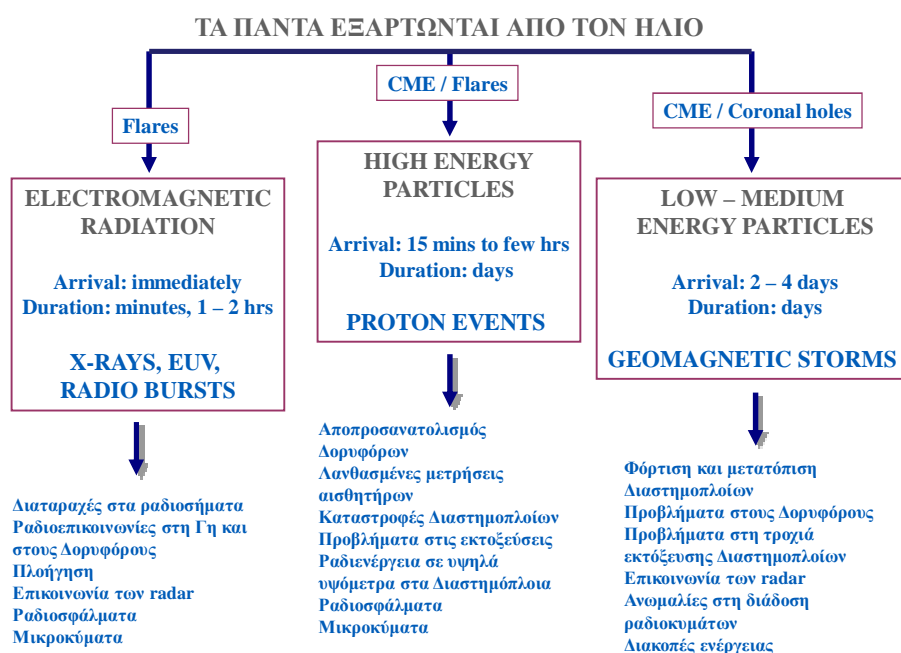
Σχ. 8.1 Σχηματική παράσταση των επιδράσεων του διαστημικού καιρού.

Σχετικά με την πρώτη κατηγορία, πρόκειται για πρωτόνια και άλλους βαρύτερους πυρήνες, που επιταχύνονται από ηλιακές εκλάμψεις και κρουστικά κύματα τα οποία συνδέονται με CMEs. Αυτά τα ενεργητικά σωματίδια, τα οποία συχνά ανιχνεύονται από τους επίγειους μετρητές νετρονίων ως επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLEs) (βλ. Κεφ. II § 2.3), μπορεί να αποδειχθούν επιζήμια για τα ηλεκτρονικά συστήματα των δορυφόρων και τα ηλιακά πάνελ και να προκαλέσουν single event upsets σε επίγεια ηλεκτρονικά τσιπς και άλλα παρόμοια φαινόμενα ([http://www.iiar.res.in/ihy/school/prasad\\_lecture.pdf](http://www.iiar.res.in/ihy/school/prasad_lecture.pdf)). Συγκεκριμένα, οι κυριότερες επιδράσεις του διαστημικού καιρού στους δορυφόρους συνοψίζονται στα παρακάτω (<http://www.swpc.noaa.gov/info/Satellites.html>): 1) Επιφανειακή φόρτιση, 2) Βαθιά διηλεκτρική ή ολική φόρτιση, 3) Single Event Upset (SEU), 4) Μετατόπιση διαστημοπλοίων, 5) Δόσεις, 6) Παρεμβολές στις ραδιοσυχνότητες και τηλεμετρία σπινθηρισμών, 7) Συντρίμμια, 8) Προσανατολισμός



διαστημοπλοίων, 9) Φωτονικός θόρυβος, 10) Υποβάθμιση υλικών, 11) Πρόσκρουση μετεωριτών.

Σε ότι αφορά στη δεύτερη κατηγορία πρέπει να αναφερθεί ότι η γεωμαγνητική καταιγίδα είναι μία περίοδος κατά την οποία το δακτυλιοειδές ρεύμα στο σύστημα μαγνητόσφαιρα – ιονόσφαιρα έχει ενταθεί (βλ. Κεφ. I § 1.6). Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες είναι υπεύθυνες για μία σειρά γεγονότων από το σέλας, το οποίο παρατηρείται στους πόλους, έως ανώμαλα ρεύματα που προκαλούνται σε καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος και σωλήνες μεταφοράς πετρελαίου. Αυτές οι καταιγίδες, συνήθως, οφείλονται στην αλληλεπίδραση των CMEs (και των σχετιζόμενων με αυτές κρουστικών κυμάτων) με κατάλληλα προσανατολισμένα μαγνητικά πεδία στη μαγνητόσφαιρα της Γης ([http://www.iiap.res.in/ihy/school/prasad\\_lecture.pdf](http://www.iiap.res.in/ihy/school/prasad_lecture.pdf)).



(προσαρμογή από την αντίστοιχη εικόνα του R. Schwenn, Max – Planck Institut für Aeronomie, Lindau, Germany)

Σχ. 8.2 Σχηματική αναπαράσταση των επιδράσεων των διαφόρων ηλιακών φαινομένων στις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Στη συνέχεια δίνονται πιο αναλυτικά οι επιπτώσεις του διαστημικού καιρού, τόσο οι τεχνολογικές όσο και οι βιολογικές (<http://www.nmdb.eu>).

### α) Τεχνολογικές επιπτώσεις

Τα άτομα ιονίζονται από τα ενεργητικά σωματίδια με αποτέλεσμα να μετατοπίζονται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Τα ενεργητικά σωματίδια είναι, για παράδειγμα, υπεύθυνα για βλάβες που παρατηρούνται σε ηλιακά πάνελ σε διαστημόπλοια τα οποία εξέρχονται από τη γήινη ατμόσφαιρα, με συνέπεια αυτά να παύουν να λειτουργούν. Οι βλάβες οι οποίες μπορούν να προκληθούν σε διάστημα λίγων ημερών λόγω ενός έντονου γεγονότος, που σχετίζεται με ενεργητικά ηλιακά σωματίδια, είναι συγκρίσιμες με αυτές που προκαλούνται από τη χρήση διάρκειας ενός έτους κάτω από την επίδραση μόνο γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων. Μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας, καθώς επίσης και χρώμα που χρησιμοποιείται για θερμική ρύθμιση μπορούν να μεταβάλλουν τις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του τεφλόν. Όλα τα παραπάνω μειώνουν τον χρόνο ζωής του εξοπλισμού (<http://www.nmdb.eu>).

Στα single event effects (SEE) ένα μεμονωμένο ιονίζον σωματίδιο, το οποίο διαπερνά μια μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να προκαλέσει βλάβη. Η συνήθης απόκριση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων επηρεάζεται από τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων – οπών, που προέρχονται από το προσπίπτον ενεργητικό σωματίδιο (<http://www.spaceweather.gc.ca/tech/satellite/se-sat-eng.php>). Τα single event upsets (SEU) παράγονται κυρίως από βαρέα ιόντα πρωτογενών κοσμικών ακτίνων (Baker, 1998; Hanslmeier, 2007) ή από δευτερογενείς κοσμικές ακτίνες, που δημιουργούνται από ένα πρωτόνιο υψηλής ενέργειας (<http://www.nmdb.eu>). Μπορούν να προκαλέσουν εσφαλμένες εντολές σε υπολογιστές πάνω σε διαστημόπλοια, ενώ τα ‘latch-ups’ είναι ανώμαλες καταστάσεις ηλεκτρονικών συσκευών, όπου αυτές πλέον δεν αποκρίνονται στα σήματα εισόδου. Η χειρότερη περίπτωση των SEEs είναι τα burn outs, δηλαδή η μόνιμη και μη αναστρέψιμη βλάβη του κυκλώματος από παρασιτικές ροές ρεύματος. Η αυξημένη ευαισθησία των συγκεκριμένων συσκευών οφείλεται στο μικρό τους μέγεθος. Ως αποτέλεσμα ένα μεμονωμένο φορτίο μπορεί να αποδώσει αρκετή ενέργεια ώστε να προκληθεί SEE (Baker, 1998; <http://www.nmdb.eu>).

Τα ενεργητικά ηλεκτρόνια μπορούν να διεισδύσουν μέσα στο διαστημόπλοιο αποδίδοντας την ενέργεια και το ηλεκτρικό τους φορτίο (Baker, 1998), δημιουργώντας, έτσι, διάφορες βλάβες. Η αποφόρτιση που προκαλείται εμποδίζει τη

λειτουργία των οργάνων και των ανιχνευτών, δημιουργεί εσφαλμένες ενδείξεις και οδηγεί στη διάβρωση των υλικών. Η ενέργεια του σωματιδίου καθορίζει το βάθος της διείσδυσης, καθώς επίσης και την περιοχή που δημιουργούνται τα προβλήματα (Hanslmeier, 2007; <http://www.nmdb.eu>).

Σημαντικό ρόλο για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων παίζει ο τρόπος κατασκευής των υλικών και των συσκευών. Επιδιώκεται ανθεκτικότητα στους διάφορους τύπους βλαβών που μπορεί να προκληθούν από σωματίδια, η οποία εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η ένταση των σωματιδίων καθώς και από τον αριθμό των ηλιακών γεγονότων, δηλαδή από τη φάση του ηλιακού κύκλου.

Παρ' όλα αυτά, λόγω των μεταβολών του διαστημικού καιρού και ιδιαίτερα της ροής των σωματιδίων, υπάρχουν περίοδοι που δεν ενδείκνυνται για τέτοιες επιχειρήσεις. Έτσι, πρέπει να αποφεύγεται η εκτόξευση ενός αεροσκάφους ή η λειτουργία διαστημικών οχημάτων σε περιόδους έντονων γεγονότων, που σχετίζονται με ηλιακά ενεργητικά σωματίδια, ειδικότερα όταν οι επιχειρήσεις αυτές πραγματοποιούνται σε τροχιές που διέρχονται από τους πόλους.

Τα ενεργητικά σωματίδια, καθώς επίσης και τα δευτερογενή σωματίδια που αυτά δημιουργούν στην ατμόσφαιρα της Γης επηρεάζουν τη λειτουργία των αεροσκαφών σε διαδρομές που περνάνε από τους πόλους. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να προκαλέσουν μεταβολές στην κατάσταση της ατμόσφαιρας, ειδικότερα σε αυτή της πολικής ατμόσφαιρας, η οποία προστατεύεται λιγότερο από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Η πολική ιονόσφαιρα ιονίζεται από τα πολυάριθμα πρωτόνια χαμηλών σχετικά ενεργειών, τα οποία μπορούν να διεισδύσουν μέσα στην ατμόσφαιρα μέχρι και σε ύψος 50 – 70 km από το έδαφος, προκαλώντας μία επίδραση που ονομάζεται 'polar cap absorption' (PCA) (Hanslmeier, 2007). Αποτέλεσμα του αυξημένου ιονισμού είναι μία αυξημένη απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε χαμηλές συχνότητες, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με αεροπλάνα. Κατά τη διάρκεια έντονων γεγονότων (π.χ. Ιανουάριος 2005), τα πολιτικά αεροπλάνα, προκειμένου να επανακτήσουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με τους σταθμούς ελέγχου, αλλάζουν την πορεία τους και πετούν σε χαμηλότερα ύψη (<http://www.nmdb.eu>).

Οι μαγνητοσφαιρικές υποκαταιγίδες αποτελούν παράδειγμα για το ότι η μαγνητόσφαιρα της Γης δεν αποτελεί πάντα ασπίδα προστασίας, αλλά κρύβει και κινδύνους. Κατά τη διάρκεια αυτών των εκρηκτικών γεγονότων, ο ηλιακός άνεμος αποδίδει συνεχώς ενέργεια στο σύστημα, η οποία σχετίζεται με τη ροή ενεργητικών σωματιδίων μέσα στη μαγνητόσφαιρα και δημιουργεί φόρτιση των διαστημοπλοίων στους δορυφόρους επικοινωνίας. Πρόκειται για γεγονότα που συμβαίνουν υπό συνθήκες ήσυχου Ήλιου (Hanslmeier, 2007), όταν τα ταχέως κινούμενα ρεύματα ηλιακού ανέμου από τις στεμματικές οπές είναι ιδιαίτερος ικανά να μεταφέρουν ενέργεια στη μαγνητόσφαιρα της Γης (<http://www.nmdb.eu>).

### **β) Βιολογικές επιπτώσεις**

Τα ενεργητικά σωματίδια μπορούν να αποβούν επικίνδυνα και για την ανθρώπινη υγεία, αφού είναι δυνατόν να προκαλέσουν βλάβες στα κύτταρα. Όταν ένα ενεργητικό σωματίδιο προσπίπτει σε ένα κύτταρο, αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια των μορίων που το αποτελούν και αποδίδει μέρος της ενέργειάς του. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης αυτής εξαρτάται από το είδος και την ενέργεια του ενεργητικού σωματιδίου (πρωτόνιο, ιόν, ηλεκτρόνιο, νετρόνιο, φωτόνιο). Οποιαδήποτε βλάβη προκληθεί στα μόρια, ειδικώς στο DNA, μπορεί να επηρεάσει τη μελλοντική εξέλιξη του κυττάρου, όπως την ικανότητά του να διαιρείται και να διατηρεί τη δομή του. Οι ιστοί και τα όργανα στα οποία ανήκουν τα κύτταρα που έχουν υποστεί βλάβες, επηρεάζονται και αυτά με τη σειρά τους (<http://www.nmdb.eu>).

Υπάρχουν δύο τρόποι επίδρασης της ακτινοβολίας στο DNA των κυττάρων ενός οργανισμού, (Hanslmeier, 2007; <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/09.pdf>):

- ❖ άμεσος, όπου η ακτινοβολία αλληλεπιδρά απ' ευθείας με τα άτομα στο μόριο του DNA, τα ιονίζει και προκαλεί βλάβη
- ❖ έμμεσος, όπου το νερό, από το οποίο αποτελείται το κύτταρο, απορροφά μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας και ιονίζεται. Σε αυτή την περίπτωση σχηματίζονται οι ελεύθερες ρίζες, οι οποίες θα αλληλεπιδράσουν και τελικά θα βλάψουν τα μόρια του DNA

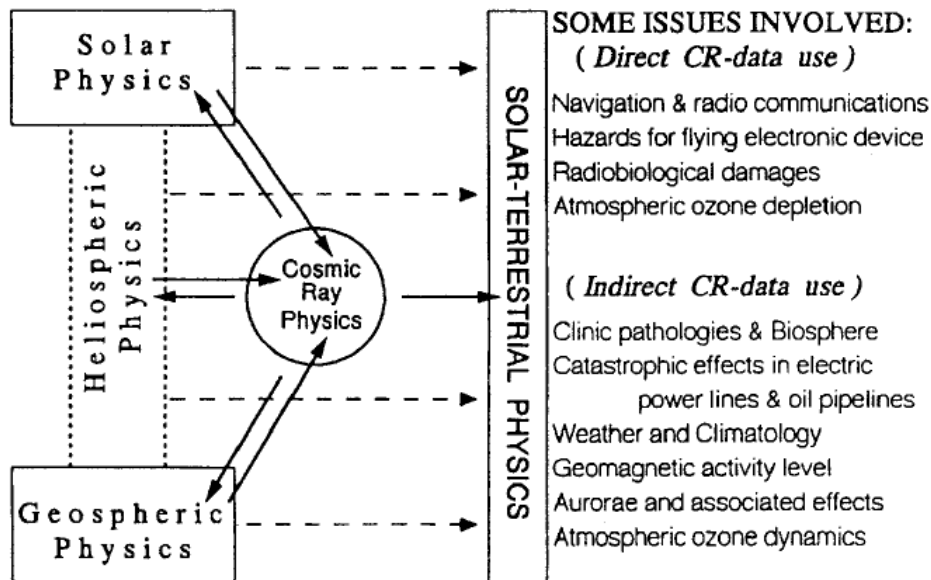
Η λειτουργία ενός κυττάρου που έχει υποστεί βλάβη είναι δυνατόν να αποκατασταθεί από μόνη της. Σε αντίθετη περίπτωση, το κύτταρο πεθαίνει. Όταν αυτό συμβεί σε πολλά κύτταρα, παύει η σωστή λειτουργία του οργάνου. Ακόμη και αν η αποκατάσταση δεν ολοκληρωθεί, το κύτταρο μπορεί να καταφέρει να διαιρεθεί κάποιες φορές, μεταφέροντας, ωστόσο, ορισμένες βλάβες στα θυγατρικά κύτταρα, με αποτέλεσμα την δυσλειτουργία τους. Συνέπεια αυτού είναι η σημαντική ή και η οριστική βλάβη του οργάνου. Κύτταρα που έχουν υποστεί βλάβες και επιζούν αποτελούν πρόδρομο καρκινικών κυττάρων (Hanslmeier, 2007).

Οι επιπτώσεις της κοσμικής ακτινοβολίας στους ζωντανούς οργανισμούς είναι δύο τύπων (<http://www.nmdb.eu>):

- ❖ Άμεση απειλή για την υγεία ή ακόμα και την ανθρώπινη ζωή από υψηλές δόσεις ακτινοβολίας. Ο κίνδυνος αυτός σχετίζεται, κυρίως, με επανδρωμένες αποστολές έξω από τη γήινη μαγνητόσφαιρα, όπως πτήσεις στη Σελήνη ή τον Άρη, όπου τα γεγονότα ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων αποτελούν μεγάλη απειλή.
- ❖ Μακροπρόθεσμοι κίνδυνοι λόγω μικρών δόσεων ακτινοβολίας. Προβλήματα, που μπορεί να μην έχουν άμεσες και παρατηρήσιμες επιπτώσεις, αντιμετωπίζουν τα πληρώματα των διαστημικών αποστολών ακόμα και αεροσκαφών που πραγματοποιούν συχνά ταξίδια σε περιοχές της γήινης ατμόσφαιρας όπου είναι εκτεθειμένα σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, όπως για παράδειγμα οι πολικές περιοχές.

Καθοριστικός παράγοντας για τις επιδράσεις στην υγεία που προκαλούνται από την έκθεση σε ακτινοβολία είναι το ποσό ενέργειας που απορροφάται από τον ιστό (όσο πιο ισχυρή είναι η ροή των σωματιδίων τόσο περισσότερη ενέργεια εναποτίθεται). Περαιτέρω, σημαντικό ρόλο παίζουν και το είδος των σωματιδίων, η ενέργειά τους και το συγκεκριμένο όργανο. Για παράδειγμα, οι ακτίνες – Χ αποδίδουν ενέργεια σε έναν δεδομένο όγκο με σχετικά ομοιόμορφο τρόπο, ενώ τα νετρόνια αποθέτουν την ενέργεια τους πιο εντοπισμένα αναλόγως με τις πυρηνικές αλληλεπιδράσεις στους ιστούς. Τα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν οργανικές βλάβες πιο εύκολα από ότι τα πρωτόνια υψηλής ενέργειας, τα ηλεκτρόνια ή οι ακτίνες γ.

Επειδή η έκθεση σε χαμηλής ενέργειας ακτινοβολία είναι αθροιστική, είναι αναγκαίο να παρακολουθείται η ακτινοβολία που λαμβάνουν τα πληρώματα διαστημικών σταθμών και αεροσκαφών. Ως μονάδα μέτρησης της αθροιστικής επίδρασης εκτεταμένης έκθεσης σε ακτινοβολία σχετικά χαμηλής έντασης χρησιμοποιείται το Sievert (Rolf Sievert, Σουηδός Φυσικός 1896 – 1966). Συγκριμένα, εκφράζει το σύνολο της ακτινοβολίας που έχει απορροφηθεί από διάφορα όργανα του οργανισμού με συντελεστές βάρους που αφορούν: 1) στο είδος του σωματιδίου (μεγαλύτεροι συντελεστές για σωματίδια άλφα και βαρείς πυρήνες, νετρόνια, πρωτόνια και τέλος φωτόνια και ηλεκτρόνια) και 2) στο όργανο που έχει εκτεθεί στην ακτινοβολία προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ευαισθησία του σε ιονίζουσες ακτινοβολίες (<http://www.nmdb.eu>).



Σχ. 8.3 Κοσμικές ακτίνες και μελέτη του διαστημικού καιρού (Kudela et al., 2000).

Είναι, επομένως, φανερό ότι η κατανόηση και ερμηνεία των φαινομένων του διαστημικού καιρού απαιτούν μία ευρέος φάσματος μελέτη, χρησιμοποιώντας διαφορετικού τύπου δεδομένα και θεωρητικές προσεγγίσεις. Η μελέτη των φαινομένων του διαστημικού καιρού, διαμέσου της φυσικής των κοσμικών ακτίνων, παρέχει μία τέτοια δυνατότητα. Άλλωστε, η έρευνα πάνω στις κοσμικές ακτίνες συνδέεται με μία πληθώρα άλλων επιστημονικών πεδίων, όπως δείχνει και το σχήμα 8.3 (Kudela et al., 2000).

### 8.3 Συμπεράσματα

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αυτής έγινε μία προσπάθεια εντοπισμού προειδοποιητικών σημάτων των μειώσεων Forbush για τρεις κατηγορίες γεγονότων, τα οποία επελέγησαν από τη βάση των μειώσεων Forbush της ερευνητικής ομάδας του IZMIRAN και της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Η βάση αυτή περιλαμβάνει όλες τις μειώσεις Forbush από το 1957 έως το 2012, όπως καταγράφηκαν από το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων, το οποίο περιλαμβάνει περίπου 40 σταθμούς κατανεμημένους σε όλη τη Γη. Αυτές οι μειώσεις ανέρχονται στο σύνολό τους σε 6519 και περιλαμβάνονται όλα τα χαρακτηριστικά τους όπως πλάτος, χρόνος ελαχίστου, πηγές, ανισοτροπία, κ.τ.λ. Σε αυτή την εργασία έχουν αναλυθεί γεγονότα για το χρονικό διάστημα 1967 – 2006 με βάση τρία διαφορετικά κριτήρια, όπως το κριτήριο της ανισοτροπίας, το κριτήριο των δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων και το κριτήριο των μεγάλων μειώσεων Forbush.

Από τη συγκεκριμένη λεπτομερή ανάλυση προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✓ Σύμφωνα με το κριτήριο της ανισοτροπίας, από την προαναφερθείσα βάση, επελέγησαν 93 γεγονότα με πλάτος ανισοτροπίας  $A_{xy} > 1.2\%$ . Από τα γεγονότα αυτά τα 27 έδωσαν προειδοποιητικά σήματα, δηλαδή προ-μειώσεις και προ-αυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα χρονικής κατανομής της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας για διάφορα ασυμπτωτικά μήκη για κάθε ένα από τα επιλεγμένα γεγονότα. Έπειτα τα γεγονότα αυτά λόγω της κοινής συμπεριφοράς τους στα προηγούμενα διαγράμματα ταξινομήθηκαν σε τρεις ομάδες:

#### α) 1<sup>η</sup> ομάδα

##### **Προ-μείωση στη ζώνη μηκών 90° – 180° διάρκειας περίπου 24 ωρών**

Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει 5 γεγονότα (24 Ιουνίου 1980, 28 Οκτωβρίου 2000, 17 Αυγούστου 2001, 23 Απριλίου 2002 και 10 Μαΐου 2002).

Τα συγκεκριμένα γεγονότα σχετίζονται με δυτικές ηλιακές εκλάμψεις (τρία γεγονότα) και με ανατολικές ηλιακές εκλάμψεις (δύο γεγονότα). Για την πλειοψηφία

των γεγονότων παρατηρείται μία αύξηση της έντασης του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου και της ταχύτητας του ηλιακού ανέμου. Επίσης, παρατηρούνται γεωμαγνητικές καταιγίδες μέτριας ή ισχυρής έντασης, οι οποίες φαίνεται να σχετίζονται με τις εξεταζόμενες μειώσεις Forbush.

### **β) 2<sup>η</sup> ομάδα**

#### **Προ-αύξηση σε μήκη άνω των 180<sup>ο</sup> διάρκειας περίπου 12 ωρών**

Η παρούσα ομάδα περιλαμβάνει 14 γεγονότα (3 Ιανουαρίου 1978, 13 Ιουλίου 1978, 11 Ιανουαρίου 1980, 30 Μαρτίου 1980, 25 Ιουλίου 1980, 11 Δεκεμβρίου 1980, 2 Οκτωβρίου 1981, 10 Οκτωβρίου 1988, 9 Σεπτεμβρίου 1992, 26 Αυγούστου 1998, 20 Φεβρουαρίου 2000, 25 Σεπτεμβρίου 2001, 7 Σεπτεμβρίου 2002, 9 Ιουλίου 2006).

Τα υπό εξέταση γεγονότα σχετίζονται, κυρίως, με κεντρικές ή ανατολικές ηλιακές εκλάμψεις και συνδέονται με γεωμαγνητικές καταιγίδες (μέτριας, ισχυρής ή πολύ ισχυρής έντασης). Ακόμη, παρατηρείται αύξηση στην ένταση του διαπλανητικού πεδίου για κάποιες από τις μειώσεις Forbush.

### **γ) 3<sup>η</sup> ομάδα**

#### **Προ-μείωση σε διαφορετικά μήκη και διαφορετικής διάρκειας**

Η συγκεκριμένη ομάδα περιλαμβάνει 8 γεγονότα (8 Σεπτεμβρίου 1981, 16 Απριλίου 1982, 4 Μαρτίου 1995, 10 Αυγούστου 1998, 18 Οκτωβρίου 1998, 15 Σεπτεμβρίου 2000, 3 Αυγούστου 2001, 25 Αυγούστου 2002).

Τα υπό εξέταση γεγονότα φαίνεται ότι δεν συνδέονται με έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα και παρουσιάζουν μικρό πλάτος της μεταβολής.

- ✓ Σύμφωνα με το κριτήριο των δυτικών πηγών, δηλαδή εκλάμψεις με ηλιογραφικό μήκος από 50<sup>ο</sup> έως 70<sup>ο</sup>, οι οποίες συνοδεύονται από γεωμαγνητικές καταιγίδες, με τιμές του δείκτη K<sub>p</sub> από 5 έως 9, προέκυψαν 25 γεγονότα από το σύνολο των γεγονότων της βάσης που πληρούν το κριτήριο αυτό. Από αυτά τα 15 έδωσαν προειδοποιητικά σήματα.

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα εξής γεγονότα, 10 Μαΐου 1978, 28 Ιανουαρίου 1980, 30 Οκτωβρίου 1980, 23 Ιουλίου 1981, 4 Οκτωβρίου 1983, 12 Αυγούστου 1985, 19 Μαρτίου 1989, 26 Μαΐου 1990, 27 Ιουνίου 1992, 29 Μαΐου 1998, 6 Απριλίου 2000, 28 Οκτωβρίου 2000, 4 Νοεμβρίου 2003, 21 Ιανουαρίου 2005,



24 Αυγούστου 2005. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα γεγονότα αυτά έχουν σχετικά μικρό πλάτος ή δεν είναι τόσο σαφώς εκφρασμένα στις μεταβολές των κοσμικών ακτίνων κοντά στη Γη σε σχέση με αυτά που σχετίζονται με ανατολικές ή κεντρικές πηγές, αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανισοτροπία πριν το κρουστικό κύμα.

- ✓ Σύμφωνα με το κριτήριο των μεγάλων μειώσεων Forbush που έχουν πλάτος > 3.99% και οι οποίες εξελίσσονται σε ήρεμο υπόβαθρο, με χρονική διαφορά 48 και 18 ωρών από το προηγούμενο και το επόμενο γεγονός αντίστοιχα, αναλύθηκαν 67 γεγονότα που πληρούν το κριτήριο αυτό. Από αυτά τα 46 γεγονότα έδωσαν προειδοποιητικά σήματα. Τα γεγονότα αυτά ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το ηλιογραφικό μήκος των πηγών:

**α) 1<sup>η</sup> κατηγορία**

**Δυτικές πηγές με ηλιογραφικό μήκος από 20<sup>ο</sup> έως 60<sup>ο</sup>**

Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει 11 γεγονότα (12 Ιουνίου 1982, 7 Μαΐου 1989, 30 Μαρτίου 1990, 9 Σεπτεμβρίου 1992, 28 Απριλίου 2001, 17 Αυγούστου 2001, 24 Νοεμβρίου 2001, 20 Μαρτίου 2002, 26 Ιουλίου 2004, 9 Ιουλίου 2006, 14 Δεκεμβρίου 2006).

Η πλειοψηφία αυτών των γεγονότων συνοδεύεται από σημαντικές γεωμαγνητικές καταιγίδες ( $D_{st_{min}} = -221\text{nT}$ ) και κάποια από αυτά παρουσιάζουν αρκετά μεγάλα πλάτη (13.5%) (βλ. Πίνακας 6.5).

**β) 2<sup>η</sup> κατηγορία**

**Ανατολικές πηγές με ηλιογραφικό μήκος από -60<sup>ο</sup> έως -20<sup>ο</sup>**

Η παρούσα ομάδα περιλαμβάνει 15 γεγονότα (13 Ιουλίου 1978, 6 Ιουνίου 1979, 1 Μαρτίου 1981, 24 Απριλίου 1982, 9 Ιουνίου 1982, 13 Ιουλίου 1982, 27 Δεκεμβρίου 1982, 11 Απριλίου 1989, 4 Σεπτεμβρίου 1989, 31 Μαΐου 1991, 26 Φεβρουαρίου 1992, 27 Αυγούστου 2001, 25 Σεπτεμβρίου 2001, 7 Σεπτεμβρίου 2002, 13 Σεπτεμβρίου 2004).

Στην κατηγορία αυτή εντοπίστηκε γεγονός με έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα ( $D_{st_{min}} = -325\text{nT}$ ) και πλάτος 19.8% (βλ. Πίνακας 6.6)

### γ) 3<sup>η</sup> κατηγορία

#### Κεντρικές πηγές με ηλιογραφικό μήκος από -21° έως 21°

Η συγκεκριμένη ομάδα περιλαμβάνει 20 γεγονότα (3 Ιανουαρίου 1978, 10 Απριλίου 1978, 25 Ιουνίου 1978, 25 Ιουλίου 1980, 6 Αυγούστου 1982, 4 Φεβρουαρίου 1983, 4 Ιανουαρίου 1988, 13 Ιανουαρίου 1988, 30 Ιουνίου 1991, 8 Ιουλίου 1991, 8 Ιουνίου 2000, 11 Οκτωβρίου 2001, 6 Νοεμβρίου 2001, 17 Απριλίου 2002, 18 Αυγούστου 2002, 29 Μαΐου 2003, 20 Νοεμβρίου 2003, 22 Ιανουαρίου 2004, 5 Δεκεμβρίου 2004, 15 Μαΐου 2005).

Και στην κατηγορία αυτή παρατηρήθηκαν γεγονότα με έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα ( $Dst_{\min} = -472\text{nT}$ ) και μέτρια πλάτη (βλ. Πίνακας 6.7).

Από την ανάλυση των συγκεκριμένων μειώσεων Forbush, οι οποίες επελέγησαν με βάση τα ανωτέρω κριτήρια, προκύπτει ότι μία μείωση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, συνήθως, συνοδεύεται από προειδοποιητικά σήματα, προμειώσεις ή προ-αυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, τα οποία εμφανίζονται κάποιες ώρες, έως και 24 ώρες, πριν την έναρξη της κυρίας φάσης του γεγονότος (Belon et al., 1995). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι ‘Ring of Stations’ και ‘Global Survey Method’, που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω ανάλυση, κάνουν δυνατή τη μελέτη αυτών των προειδοποιητικών σημάτων στην ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας δεδομένα από το Παγκόσμιο Δίκτυο Μετρητών Νετρονίων.

Είναι φανερό ότι η μελέτη των προειδοποιητικών σημάτων είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την ανάλυση και πρόγνωση των φαινομένων που χαρακτηρίζουν τον Διαστημικό Καιρό. Η έρευνα αυτή, η οποία έγινε για πρώτη φορά και έδωσε τόσο χαρακτηριστικά αποτελέσματα, θα πρέπει να συνεχιστεί σε ένα μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων με τελικό σκοπό τη δημιουργία ενός συστήματος προειδοποίησης μειώσεων Forbush σε πραγματικό χρόνο που θα προκύπτει από τα δεδομένα της ευρωπαϊκής Υψηλής Ανάλυσης Βάσης Μετρητών Νετρονίων σε πραγματικό χρόνο, (High Resolution Real Time Neutron Monitor Database – NMDB). Το σήμα αυτό θα είναι συμπληρωτικό του ήδη υπάρχοντος συστήματος προειδοποίησης άφιξης ενεργητικών σωματιδίων, που προκαλούν επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (GLE). Και τα δύο αυτά γεγονότα, μειώσεις Forbush και επίγεια επαύξηση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, αποτελούν τις κύριες

εκδηλώσεις του Διαστημικού Καιρού. Η εκτενής ανάλυση είναι, επίσης, απαραίτητη, γιατί αυτά τα φαινόμενα παρουσιάζονται με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά ανάλογα με τις επικρατούσες διαπλανητικές συνθήκες.

Από την άλλη πλευρά στα πλαίσια της παραπάνω μελέτης έγινε και μία προσπάθεια εντοπισμού της πιθανής επίδρασης της γεωμαγνητικής δραστηριότητας και των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους.

Πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν δεδομένα ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων (καρδιακός ρυθμός, διαστήματα RR, αρτηριακή συστολική και διαστολική πίεση) υγιών εθελοντών από τις πόλεις Košice (Σλοβακία) και Baku (Αζερμπαϊτζάν) και εξετάστηκαν ξεχωριστά σε σχέση με γεωμαγνητικές καταιγίδες και μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Τα δύο αυτά φαινόμενα συνδέονται αλλά και μπορούν να εξελιχθούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο (Kudela & Brenkus, 2004; Kane, 2010). Οι μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (μειώσεις Forbush) οφείλονται σε διαταραχές στην ηλιόσφαιρα, ενώ οι μεταβολές του δείκτη Dst σχετίζονται με τις τοπικές συνθήκες στη μαγνητοουρά κοντά στη Γη (Kane, 2010). Συνήθως η υψηλή δραστηριότητα κοσμικών ακτίνων, δηλαδή οι έντονες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, σχετίζεται με έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα, δηλαδή μειώσεις του δείκτη Dst και αντίστροφα, όπως φάνηκε και στην εκτεταμένη μελέτη που έγινε στο πρώτο μέρος της εργασίας αυτής, όμως αυτό δεν συμβαίνει πάντα (Kudela & Brenkus, 2004).

Από την ανάλυση των δεδομένων των δύο πειραμάτων που έγιναν στο Košice (Σλοβακία), για τη χρονική περίοδο 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1994 έως 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2002 και στο Baku (Αζερμπαϊτζάν), για τη χρονική περίοδο 15<sup>η</sup> Ιουλίου 2006 έως 31<sup>η</sup> Μαρτίου 2008 (Κεφ. VII), προέκυψαν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- ✓ Ο καρδιακός ρυθμός, από όλες τις υπό εξέταση φυσιολογικές παραμέτρους, παρουσίασε τα περισσότερα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα.

- ✓ Η ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με τη γεωμαγνητική δραστηριότητα φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο τις ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους.
- ✓ Οι έντονες γεωμαγνητικές καταιγίδες και οι μεγάλες μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σχετίζονται με ακραίες τιμές (ελάχιστες ή μέγιστες) των φυσιολογικών παραμέτρων.
- ✓ Σημαντικές μεταβολές των υπό εξέταση φυσιολογικών παραμέτρων σημειώνονται τις ημέρες πριν (-), κατά τη διάρκεια (0) και μετά (+) από έντονα γεγονότα (γεωμαγνητικές καταιγίδες ή μειώσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας).
- ✓ Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη φυσική σχέση μεταξύ καρδιακού ρυθμού και διαστημάτων RR.

Γενικά από τα δύο πειράματα που αναλύθηκαν αλλά και από τα αποτελέσματα που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορούν στο ζήτημα της πιθανής επίδρασης των παραμέτρων του Διαστημικού Καιρού στις μεταβολές των ανθρώπινων φυσιολογικών παραμέτρων αλλά και τη συχνότητα καρδιακών εμφραγμάτων, εγκεφαλικών επεισοδίων, τροχαίων ατυχημάτων, κτλ προκύπτει ότι η ανθρώπινη φυσιολογία παρουσιάζει ευαισθησία στις μεταβολές του γεωμαγνητικού πεδίου και της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας. Το συγκεκριμένο θέμα παραμένει ανοιχτό για την επιστημονική κοινότητα και απαιτούνται περαιτέρω έρευνα και εμπειριστατωμένες μελέτες ώστε να προκύψουν πιο σαφή και αξιόπιστα συμπεράσματα.

#### **8.4 Προοπτικές**

Είναι γνωστό ότι φαινόμενα του Ήλιου, όπως είναι οι ηλιακές εκλάμψεις και οι στεμματικές εκτινάξεις μάζας, οδηγούν σε ηλιακή σωματιδιακή εκπομπή. Αυτή είναι υπεύθυνη για τα φαινόμενα του Διαστημικού Καιρού, όπως είναι και οι μειώσεις Forbush της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας που μελετήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής αυτής και τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να επηρεάσουν

τη λειτουργία και την αξιοπιστία επίγειων ή διαστημικών τεχνολογικών συστημάτων αλλά και την ανθρώπινη υγεία.

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας δίνει τη δυνατότητα για συλλογή και επεξεργασία ενός πλήθους δεδομένων, που αφορούν στην ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα αλλά και τις μεταβολές της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας, από όργανα μέτρησης επίγεια ή τοποθετημένα σε διαστημόπλοια. Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας είναι και η απόκτηση δεδομένων σε ‘πραγματικό χρόνο’. Η τεχνολογία ‘πραγματικού χρόνου’ επιτρέπει την αξιολόγηση του διαστημικού περιβάλλοντος παρέχοντας άμεσες πληροφορίες και δίνει πολλές επιλογές για την ανάπτυξη ενός συστήματος πρόγνωσης των φαινομένων του Διαστημικού Καιρού.

Σχετικά με τα τεχνολογικά συστήματα η καλύτερη αντιμετώπιση των φαινομένων του Διαστημικού Καιρού είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός αυτών. Παρ’ όλα αυτά, όμως, πολύ συχνά τα τεχνολογικά συστήματα υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου και αρκετές φορές αναπτύσσονται και απροσδόκητες ευαισθησίες στα διάφορα εξαρτήματά τους. Είναι φανερό ότι, η πρόγνωση των συνθηκών του διαστημικού περιβάλλοντος θα έδινε τη δυνατότητα αλλαγής των λειτουργικών διαδικασιών ή τουλάχιστον θα επέτρεπε τη γρήγορη ανάκτηση αυτών. Επίσης, σε άλλες περιπτώσεις ίσως θα ήταν πιθανή και η απενεργοποίηση ευαίσθητων συστημάτων κατά τη διάρκεια περιόδων ισχυρών γεωμαγνητικών διαταραχών.

Τα φαινόμενα της ηλιακής και γεωμαγνητικής δραστηριότητας και των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας πιθανώς να επηρεάζουν και την ανθρώπινη καρδιαγγειακή κατάσταση. Η εξέλιξη της έρευνας αυτής περιλαμβάνει και ολοκληρώνεται σε δύο στάδια, αρχικά την πρόγνωση των φαινομένων του Διαστημικού Καιρού και στη συνέχεια τον καθορισμό του πιθανού μηχανισμού επίδρασης των γεωμαγνητικών διαταραχών στις ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους και κατ’ επέκταση στη συχνότητα καρδιακών εμφραγμάτων, εγκεφαλικών επεισοδίων, τροχαίων ατυχημάτων, κτλ. Γι’ αυτό και είναι σημαντικό η συγκεκριμένη μελέτη να συνεχιστεί με μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων τα οποία να καλύπτουν διαφορετικά γεωγραφικά μήκη και πλάτη αλλά και ποικίλα επίπεδα φυσικής δραστηριότητας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ακριβής και η αξιόπιστη πρόγνωση των φαινομένων του Διαστημικού Καιρού προσφέρει μεγάλα οφέλη στην επιστημονική κοινότητα και την κοινωνία γενικότερα. Γι' αυτό και μοιάζει επιτακτική η ανάγκη η συγκεκριμένη μελέτη, που αφορά στην αναγνώριση και στον εντοπισμό των προειδοποιητικών σημάτων που προηγούνται των γεωμαγνητικών διαταραχών, να συνεχιστεί και να εξελιχθεί, ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο αξιόπιστα για τη δημιουργία προειδοποιητικού συστήματος. Απώτερος σκοπός είναι η διαμόρφωση ενός συνόλου έγκυρων κριτηρίων που θα πρέπει να πληρούνται ώστε να δίνεται συναγεμμός γεωμαγνητικών διαταραχών (Alert System).

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε και ολοκληρώθηκε με την συνεργασία της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN) της Russian Academy of Sciences, του Space and Solar – Terrestrial Research Institute (SSRI) της Bulgarian Academy of Sciences, του Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi and Laboratory of Heliobiology της National Academy of Sciences of Azerbaijan και του Institute of Experimental Physics της Slovak Academy of Science.

Τέλος να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας έχουν ανακοινωθεί σε μία σειρά από διεθνή επιστημονικά συνέδρια και, επίσης, έχουν δημοσιευθεί σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά. Συγκεκριμένα μία σειρά τριών δημοσιεύσεων στο Solar Physics αφορά στη μελέτη των προειδοποιητικών σημάτων των μειώσεων Forbush, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης σχετικά με την πιθανή επίδραση των μεταβολών του Διαστημικού Καιρού σε ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους έχουν δημοσιευθεί στα περιοδικά Advances in Space Physics, Astrophysics and Space Sciences Transactions (ASTRA) και Natural Hazards.

## **Βιβλιογραφία**

Ahluwalia, H.S.: 'Eleven Year Variation of Cosmic Ray Intensity and Solar Polar Field Reversals', Proc. 19<sup>th</sup> ICRC, 5, 182 – 186, 1979

Alania, M.V., Gil, A., Wieliczuk, R.: 'Statistical analyses of influence of solar and geomagnetic activities on car accident events', Adv. Space Res., 28, 673 – 678, 2001

Alfven, H. & Faelthammar, C.G.: 'Cosmical Electrodynamics', Oxford Univ. Press, 1963

Ανδριοπούλου, Μ.: 'Μαγνητικό πεδίο της Γης: Προσδιορισμός ασυμπτωτικών διευθύνσεων ενεργητικών σωματιδίων και εφαρμογές', ΜΔΕ, ΕΚΠΑ, 2010

Asipenka, A., Belov, A.V., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Papaioannou, A., Oleneva, V., Yanke, V.G.: 'Asymptotic longitudinal distribution of cosmic ray variations in real time as the method of interplanetary space diagnostic', Proc. 31<sup>st</sup> ICRC, icrc1109 (<http://www.nmdb.eu/?q=node/109>), 2009a

Asipenka, A.S., Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Klepach, E.G., Oleneva, V.A., Yanke, V.G.: 'Interactive database of cosmic ray anisotropy (DB-A10)', Advances in Space Research, 43, 708 – 716, 2009b

Asipenka, A., Belov, A., Eroshenko, E., Ibragimov, A., Oleneva, V., Yanke, V., Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Papailiou, M., Mariatos, G. for the NMDB Team: 'Definition of cosmic ray density and anisotropy vector beyond the magnetosphere in real time mode', Proc. 31<sup>st</sup> ICRC, icrc1106, 2009c

Aschikaliev, Y.F., Drobjev, V.I., Somsikiv, V.M., Turkeeva, V.A., Yakovets, T.K.: 'Influence of heliogeophysical parameters on ecology', Biofizika (Biophysics), 40, 1031 – 1037, 1995

Babayev, E.S. & Allahverdiyeva, A.A.: 'Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies', *Advances in Space Research*, 40, 1941 – 1951, 2007

Babayev, E.S., Allahverdiyeva, A.A., Mustafa, F.R, Shustarev, P.N.: 'An influence of changes of heliogeophysical conditions on biological systems: some results of studies conducted in the Azerbaijan National Academy of Sciences', *Sun and Geosphere*, 2, 48 – 52, 2007

Babayev, E.S.: 'Solar and Geomagnetic activities and related effects on the human physiological and cardio-health state: some results of Azerbaijani and collaborative studies', *Proc. MEARIM*, 1, 235 – 241, 2008

Baevsky, R.M., Petrov, V.M., Cornelissen, G., Halberg, F., Orth-Gomer, K., Akerstedt, T., Otsuka, K., Breus, T., Siegelova, J., Dusek, J., Fiser, B.: 'Meta-analyzed heart rate. Variability exposure to geomagnetic storms, and the risk of ischemic heart disease', *Scripta Med.*, 70, 201 – 206, 1997

Baker, D.N.: 'What is Space Weather', *Advances in Space Research*, 22, 7 – 16, 1998

Barnden, L.R.: 'Forbush Decreases 1966–1972; Their Solar and Interplanetary Associations and Their Anisotropies', *Proc. 13<sup>th</sup> ICRC*, Denver, Colorado, 2, 1271 – 1276, 1973a

Barnden, L.R.: 'The large scale magnetic field configuration associated with Forbush decreases'. *Proc. 13<sup>th</sup> ICRC*, Denver, Colorado, 2, 1277, 1973b

Belov, A., Dorman, L., Shatashvili, L.: 'Peculiarities of the influence of the solar wind on cosmic ray intensity in 1969', *Kosm. Issled.*, 11, 418 – 430, 1973

Belov, A., Blokh, Ia.L., Dorman, L., Eroshenko, E., Inozemtseva, O., Kaminer, N.: 'Anisotropy and time dependent changes in the spectrum of cosmic ray intensity variations during August 1972', *Akademiia Nauk SSSR, Izvestiia, Serii Fizicheskaiia*, 38, 1867 – 1875, 1974



Belov, A.V., Dorman, L.I., Yanke, V.G.: 'The simplest versions of the global spectrographic method', 18<sup>th</sup> ICRC, 10, 144 – 147, 1983

Belov, A.V.: 'The first harmonic of cosmic ray anisotropy in the convection-diffusion model', Proc. 20<sup>th</sup> ICRC, 4, 137 – 139, 1987

Belov, A.V., Dorman, L.I., Eroshenko, E.A., Rudnev, Yu.F.: 'The amplitude-phase interrelation and other peculiarities of the first cosmic ray anisotropy harmonic', Proc. 22<sup>nd</sup> ICRC, Dublin, Ireland. Under the auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), 3, 457 – 460, 1991

Belov, A.V., Dorman, L.I., Eroshenko, E.A., Iucci, N., Villaresi, G. & Yanke, V.G.: 'Search for predictors of Forbush decreases', In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.), Proc. 24<sup>th</sup> ICRC, International Union of Pure and Applied Physics, Rome, Italy, 4, 888 – 891, 1995a

Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Yudakhin, K., Villaresi, G.: 'Isotropic and anisotropic cosmic ray variations in March-June 1991', Adv. Space Res., 16, 249 – 253, 1995b

Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Yanke, V.G.: 'Cosmic Ray Effects Caused by Great Disturbances of the Interplanetary Medium in 1990-1996', In: Kieda, D., Salamon, M. and Dingus, B. (eds.), Proc. 26<sup>th</sup> ICRC, International Union of Pure and Applied Physics, Salt Lake City, USA, 6, 431 – 434, 1999

Belov, A.V., Bieber, J.W., Eroshenko, E.A., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.G.: 'Pitch-angle features in cosmic rays in advance of severe magnetic storms: Neutron monitor observations', In: Droege, W., Kunow, H., Scholer, M. (eds.), Proc. 27<sup>th</sup> ICRC, International Union of Pure and Applied Physics, Hamburg, Germany, 9, 3507 – 3510, 2001

Belov, A.V., Bieber, J.W., Eroshenko, E.A., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.G.: 'Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances', Advances in Space Research, 31, 919 – 924, 2003

Belov, A.V., Dorman, L.I., Eroshenko, E.A., Iucci, N., Levitin, A.E., Parisi, M., Ptitsyna, N.G., Tyasto, M.I., Villorosi, G., Yanke, V.G.: 'Spacecraft operational anomalies and space weather impact hazards', 35<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, 4132, 2004

Belov, A., Gaidash, S., Kanonidi, K., Kanonidi, Kh., Kuznetsov, V., Eroshenko, E.: 'Operative center of the geophysical prognosis in IZMIRAN', *Ann. Geophys.*, 23, 3163 – 3170, 2005a

Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., Mariatos, G.: 'Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003', *J. Geophys. Res.* 110, A09S20, doi:10.1029/2005JA011067, 2005b

Belov, A.V.: 'Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena', In: Gopalswamy, N., Webb, D.F. (eds.), *Universal Heliophysical Processes, Proc. IAU Sympos*, 257, Cambridge Univ. Press, 439 – 450, doi: 10.1017/S1743921309029676, 2008

Belov, A., Eroshenko, E., Oleneva, V., Yanke, V.: 'Connection of Forbush effects to the X-ray flares', *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 342, 2008a

Belov, A.V., Dryn, E., Eroshenko, E.A., Kryakunova, O., Oleneva, V., Yanke, V.G., Papailiou, M.: 'Behavior of the cosmic ray vector anisotropy near interplanetary shocks', In: Kiraly, P., Kudela, K., Stehlik, M., Wolfendale, A.W. (eds.), *Proc. 21<sup>st</sup> ECRS*, Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Kosice, Slovakia, 347 – 350, 2008b

Belov, A.V.: 'The Sun, CMEs and Forbush decreases', Oral presentation, *ECRS2012*, 2012a

Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Papaioannou, A., Mavromichalaki, H., Abunin, A., Abunina, M., Yanke, V.G.: ‘Re-visiting the global survey method for neutron monitors’, in preparation, 2012b

Bieber, J.W. & Evenson, P.: ‘Spaceship Earth – an optimized network of neutron monitors’, Proc. 24<sup>th</sup> ICRC, 4, 1316 – 1319, 1995

Bieber, J.W., Clem, J., Duldog, M.L., Evenson, P., Humble, J.E., Pyle, R.: ‘New method of observing neutron monitor multiplicities’, Proc. 27<sup>th</sup> ICRC, 4091, 2001

Blokh, Ya.L, Dorman, L.I., Kammer, N.S.: Proc. 6<sup>th</sup> ICRC, 4, 77, 1959

Burlaga, L.F., Sittler, E., Mariani, F., Schwenn, R.: ‘Magnetic loop behind and interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP8 observations’, J. Geophys. Res., 86, 6673, 1981

Cane, H.V., Richardson, I.G., von Roseninge, T.T., Wibberenz, G.: ‘Cosmic Ray Decreases and Shock Structure: A Multispacecraft Study’, J. Geophys. Res., 99, 429 – 441, 1994

Cane, H.V., Richardson, I.G. and von Roseninge, T.T.: ‘Cosmic Ray Decreases: 1964–1994’, J. Geophys. Res., 101, 561 – 572, 1996

Cane, H.V.: ‘Coronal mass ejections and Forbush decreases’, Space Science Reviews, 93, 55 – 77, 2000

Cane, H.V. & Richardson, I.G.: ‘Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002’, J. Geophys. Res., 108, 1156, DOI: 10.1029/2002JA009817, 2003

Chirkov, N. P., Kuzmin, A. I., Krymsky, G. F., Shafer, G. V., Filippov, V. A.: ‘The Unusual Phenomena Related to the Cosmic-Ray Variations in December 1957’, Proc. of the All-Union Conference on the Space Physics Aspects of Cosmic-Ray Research, Published by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 197, 1967

Clem, J. & Dorman, L.: 'Neutron Monitor response functions', *Space Sci. Rev.*, 93, 335 – 359, 2000

Cliver, E.W., Boriakoff, V., Bounar, K.H.: 'The 22-yr cycle of geomagnetic and solar wind activity', *J. Geophys. Res.*, 101, 27091, 1996

Cornelissen, G., Halberg, F., Breus, T., Syytkina, E., Baeovsky, R., Weydahl, A., Watanabe, Y., Otsuka, K., Siegelova, J., Fiser, B., Bakken, E.: 'Non-photic solar associations of heart rate variability and myocardial infarction', *JASTP*, 64, 707 – 720, 2002

Cornelissen, G., Halberg, F., Kovac, M., Mikulecky, M., Otsuka, K., Bakken, E.: 'Geographic and extraterrestrial aspects of morbidity and/ or mortality patterns from myocardial infarction and stroke', *Biomed. Pharmacother.*, 59, 68 – 75, 2005

Daglis, I.A.: 'Space storms and space weather hazards', NATO ASI series, 2001

Diaz-Sandoval, R., Erdélyi, R., Maheswaran, R.: 'Could periodic patterns in human mortality be sensitive to solar activity?', *Annales Geophysicae*, 29, 1113 – 1120, 2011

Dimitrova, S., Stoilova, I., Cholakov, I.: 'Influence of local geomagnetic storms on arterial blood pressure', *Bioelectromagnetics*, 25, 408 – 414, 2004a

Dimitrova, S., Stoilova, I., Yanev, T., Cholakov, I.: 'Effect of local and global geomagnetic activity on human cardiovascular homeostasis', *Arch. Environ. Health: Int. J.*, 59, 84 – 90, 2004b

Dimitrova, S.: 'Relationship between human physiological parameters and geomagnetic variations of solar origin', *Advances in Space Research*, 37, 1251 – 1257 2006a

Dimitrova, S.: 'Geo-Effective Heliophysical Variations and Human Physiological State', *Sun and Geosphere*, 1, 47 – 50, 2006b

Dimitrova, S.: ‘Geomagnetic Indices Variations and Human Physiology’, *Sun and Geosphere*, 2, 84 – 87, 2007

Dimitrova, S.: ‘Different geomagnetic indices as an indicator for geo-effective solar storms and human physiological state’, *JASTP*, 70, 420 – 427, 2008a

Dimitrova, S.: ‘Possible heliogeophysical effects on human physiological state’, *Proc. IAU Symposium*, 257, 65 – 67, 2008b

Dimitrova, S.: ‘Cosmic Rays Variations and Human Physiological State’, *Sun and Geosphere*, 4, 79 – 83, 2009

Dimitrova, S., Mustafa, F.R., Stoilova, I., Babayev, E.S., Kazimov, E.A.: ‘Possible influence of solar extreme events and related geomagnetic disturbances on human cardio-vascular state: results of collaborative Bulgarian-Azerbaijani studies’, *Advances in Space Research*, 43, 641 – 648, 2009a

Dimitrova, S., Babayev, E.S., Georgieva, K., Obridko, V.N., Mustafa, F.R.: ‘Possible Effects of Solar and Geomagnetic Activity on Sudden Cardiac Death in Middle Latitudes’, *Sun and Geosphere*, 4, 84 – 88, 2009b

Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mustafa, F.R., Stoilova, I., Taseva, T., Georgieva, K.: ‘Geomagnetic Storms and Acute Myocardial Infarctions Morbidity in Middle Latitudes’, *Sun and Geosphere*, 4, 72 – 78, 2009c

Dorman, L.I.: ‘Cosmic ray variations and space research’, Nauka, Moscow, 1027, 1963

Dorman, L.I., Iucci, N., Villaresi, G.: ‘The nature of cosmic ray Forbush decrease and precursory effects.’, In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.), *Proc. 24<sup>th</sup> ICRC, International Union of Pure and Applied Physics, Rome, Italy*, 4, 892 – 895, 1995

Dorman, L.I., Iucci, N., Ptitsyna, N.G., Villorresi, G.: ‘Cosmic ray Forbush decreases as indicators of space dangerous phenomena and possible use of cosmic ray data for their prediction’, Proc. 26<sup>th</sup> ICRC, 6, 476 – 479, 1999

Dorman, L.I., Iucci, N., Ptitsyna, N.G., Villorresi, G.: ‘Cosmic ray as indicator of space weather influence on frequency of infract myocardial, brain strokes, car and train accidents’, Proc. 27<sup>th</sup> ICRC (Hamburg), 3511 – 3514, 2001

Dorman, L.I., Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Pustil’nik, L.A., Sternlieb, A., Yanke V.G., Zukerman, I.G.: ‘Possible cosmic ray using for forecasting of major geomagnetic storms accompanied by Forbush effects’, Proc. 28<sup>th</sup> ICRC, 6, 3553 – 3556, 2003a

Dorman, L.I., Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Iucci, N., Parisi, M., Pustil’nik, L.A., Sternlieb, A., Villorresi, G., Yanke, V.G., Zukerman, I.G.: ‘NM-MT network and space dangerous phenomena, 2. Examples of cosmic ray using for forecasting of major geomagnetic storms’, 2003b

Dorman, L.I.: ‘Cosmic Rays in the Earth’s atmosphere and underground’, Kluwer Academic Publishers, 2004

Dorman, L.I., Pustilnik, L., Sternlieb, A., Zukerman, I., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Mavromichalaki, H., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Tatsis, S., Iucci, N., Villorresi, G., Fedorov, Yu., Shakhov, B.: ‘Monitoring and forecasting of great solar proton events using the neutron monitor network in real-time’, IEEE, 32, 1478 – 1488, 2004

Dorman, L.I.: ‘Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data’, Annales Geophysicae, 23, 2997 – 3002, 2005

Dubrov, A.P.: ‘Geomagnitnoe Pole i Zhizn (“Geomagnetic Field and Life”)', Leningrad, “Gidrometeoizdat” Press, 175, 1974 (in Russian)

Dzvoník, O., Stetiarova, J., Kudela, K., Daxner, P.: 'A monitoring of space weather effects on some parameters of mental performance and health in aviation personnel', *Studia Psychologica*, 48, 273 – 292, 2006

Fenton, A.G., McCracken, R.G., Rose, D.C., Wilson, B.G.: *Can. J. Phys.*, 37, 970, 1959

Forbush, S.E.: 'On the Effects in the Cosmic-Ray Intensity Observed During the Recent Magnetic Storm', *Phys. Rev.*, 51, 1108 – 1109, 1937

Forbush, S.E.: 'On the World-Wide Changes in Cosmic-Ray Intensity', *Phys. Rev.*, 54, 975, 1938

Forbush, S.E.: 'Cosmic-Ray Intensity Variations during Two Solar Cycles', *J. Geophys. Res.*, 61, 93, 1958

Forbush, S.E., Pomerantz, M.A., Duggal, S.P., Tsao, C.H.: 'Statistical considerations in the analysis of solar oscillation data by the superposed epoch method', *Solar Physics*, 82, 113 – 122, 1983

Γιανναροπούλου, Ε.: 'Επίδραση της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας και των γεωμαγνητικών διαταραχών σε ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους', ΜΔΕ, ΕΚΠΑ, 2012

Gigolashvili, M., Ramishvili, G., Janashia, K., Tvildiani, L., Pitiurishvili, P.: 'Possible Dependence of the Sign Changing of the Polarity of Interplanetary Magnetic Field on Complications of Various Arrhythmias', National Astronomical Observatory, Internal. Report, <http://www.docstoc.com/docs/48038168>, 2010

Ghione, S., Mezzasalma, L., Del Seppia, C., Papi, F.: 'Do geomagnetic disturbances of solar origin affect arterial blood pressure?', *J. Hum. Hypertens.*, 12, 749 – 754, 1998

Hess, V.F. & Demmelair, A.: 'World-wide Effect in Cosmic Ray Intensity, as Observed during a Recent Geomagnetic Storm', *Nature*, 140, 316 – 317, 1937

Joselyn, J. A. & Tsurutani B. T.: 'Geomagnetic sudden impulses and storm sudden commencements', *Eos Trans., Amer. Geophys. Union*, 71, 1808, 1990

Hanslmeier, A.: 'The Sun and space weather', *Astrophysics and Space Science Library*, 347, 2007

Hatton, C.L. & Carmichael, H.: 'Experimental investigation of the NM-64 neutron monitor', *Canadian Journal of Physics*, 42, 2443 – 2472, 1964

Hatton, C.J.: 'The neutron monitor, Progress in elementary particle and cosmic ray physics, vol X, Ed J.G. Wilson and S.A. Wouthuysen, North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1971

Haurwitz, M.W., Yoshida, S., Akasofu, S.I.: 'Interplanetary Magnetic Field Asymmetries and Their Effects on Polar Cap Absorption Events and Forbush Decreases', *J. Geophys. Res.*, 70, 2977 – 2988, 1965

Hillas, A.: 'Cosmic Rays'. Pergamon Press Oxford, 1972

Hudson H.: 'The Unpredictability of the Most Energetic Solar Events', *Astrophys. J.*, 663, 45, 2007

Iucci, N., Parisi, M., Storini, M., Villaresi, G.: 'Forbush Decreases: Origin and Development in the Interplanetary Space', *Nuovo Cimento*, 2C, 1 – 52, 1979a

Iucci, N., Parisi, M., Storini, M., and Villaresi, G.: 'High Speed Solar Wind Streams and Galactic Cosmic Ray Modulation', *Nuovo Cimento*, 2C, 421 – 438, 1979b

Iucci, N., Pinter, S., Parisi, M., Storini, M., Villaresi, G.: 'The longitudinal asymmetry on the interplanetary perturbation producing Forbush decreases', *Nuovo Cimento* 9C, 39, 1986



Kahler, S.W.: 'Solar flares and coronal mass ejections', *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 113 – 141, 1992

Kallenrode, M.B.: 'Space Physcs: An introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres', Springer, 1998

Kamide, Y., Yokoyama, N., Gonzalez, W., Tsurutani, B.T., Daglis, I.A., Brekke, A., Masuda, S.: 'Two-step development of geomagnetic storms', *Journal of Geophysical Research*, 103, 6917 – 6921, 1998

Kane, R.P.: 'Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships re-examined', *Annales Geophysicae*, 28, 479 – 489, 2010

Καραγεώργος, Δ.Λ.: 'Στατιστική: Περιγραφική & Επαγωγική', Σαββάλας, 2010

Khabarova, O.V. & Dimitrova, S.: 'On the nature of people's reaction to space weather and meteorological weather changes', *Sun and Geosphere*, 4, 60 – 71, 2009

Kivelson, M.G. & Russell, C.T.: 'Introductions to space physics', Cambridge University Press, 1995

Kleimenova, N.G. & Troitskaia, V.A.: 'Geomagnetic pulsations as one of ecological environment factors', *Biofizika*, 37, 429 – 438, 1992

Klein, L.W. & Burlaga, L.F.: 'Interplanetary magnetic clouds at 1 AU', *J. Geophys. Res.*, 67, 613, 1982

Klein, K.L., Fuller, N., Steigies, C.T. and the NMDB consortium: 'WWW.NMDB.EU: The real-time neutron monitor database', *Proc. 31<sup>st</sup> ICRC*, icrc1333, 2009

Konig, H. & Anker-muller, F.: 'Ueber den einfluss besonders niederfrequenter electrischer vorgange in der atmosphaere auf den menschen', *Naturwissenschaften*, 47, 486 – 490, 1960

Kravchenko, K.L., Yazev, S.A., Grechanyj, G.V.: 'Traffic accidents dynamics relation to the level of geomagnetic activity in Irkutsk', *Solnechno-Zemnaya Fizika (Russian J. Solar-Terrestrial Physics)*, 8, 187 – 189, 2005 (in Russian)

Kruger, H.: 'A calibration Neutron Monitor for long term cosmic ray modulation studies', PhD Thesis, 2006

Krymsky, G.F., Kuzmin, A.I., Chirkov, N.P., Krivoschapkin, P.A., Skripin, G.V.: 'Cosmic ray distribution and reception vectors of detectors I', *Geomagn. And Aeronomy*, 6, 991 – 996, 1966

Krymsky, G.F., Kuzmin, A.I., Chirkov, N.P., Krivoschapkin, P.A., Skripin, G.V.: 'Cosmic ray distribution and reception vectors of detectors II', *Geomagn. And Aeronomy*, 7, 11 – 16, 1967

Kudela, K., Storini, M., Hofer, M., Belov, A.: 'Cosmic rays in relation to space weather', *Space Science Reviews*, 93, 153 – 174, 2000

Kudela, K. & Brenkus, R.: 'Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982–2002', *J. Atm. Solar Terrestrial Phys*, 66, 1121 – 1126, 2004

Kudela, K. & Storini, M.: 'Possible tools for space weather issues from cosmic ray continuous records', *Advances in Space Research*, 37, 1443 – 1449, 2006

Kudela, K.: 'Trajectories of energetic particles in the magnetosphere', <http://www.beo.inrne.bas.bg/BEOBAL/CRMSPH1070219.pdf>, 2007

Kudela, K.: 'Space Weather near Earth and energetic particles: selected results', *J. Phys. Conf. Ser.*, doi:101088/1742-6596/409/1/012017, 2013

Laster, H., Lenchek, A.M., Singer, S.F.: 'Forbush Decreases Produced by Diffusive Deceleration Mechanism in Interplanetary Space', *Journal of Geophysical Research*, 67, 2639 – 2643, 1962

Leerunnavarat, K., Ruffolo, D., Bieber, J.W.: ‘Loss cone precursors to Forbush decreases and advance warning of space weather effects’, *The Astrophysical Journal*, 593, 587 – 596, 2003

Linker, J.A., Mikic´, Z., Lionello, R., Riley, P., Amari, T., Odstrcil, D.: ‘Flux cancellation and coronal mass ejections’, *Physics of plasmas*, 10, 1971 – 1978, 2003

Λουκάς, Π.: ‘Μελέτη των γεωμαγνητικών διαταραχών και των μεταβολών της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με τις ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους’, Πτυχιακή εργασία, ΕΚΠΑ, 2009

Lockwood, J.A.: ‘Forbush decreases in the cosmic radiation’, *Space Science Reviews*, 12, 658 – 715, 1971

Lockwood, J.A., Webber, W.R., Jokipii, J.R.: ‘Characteristic Recovery Times of Forbush-Type Decreases in the Cosmic Radiation, I. Observations at Earth at Different Energies’, *J. Geophys. Res.*, 91, 2851 – 2857, 1986

Longair, M.S.: ‘High Energy Astrophysics - Particles, photons and their detection’, Volume 1, Cambridge University Press, 1981

Μαυρομιχαλάκη, Ε.: ‘Φυσική Κοσμικής Ακτινοβολίας’, Παν/κό Σύγγραμμα, 1989

Mavromichalaki, H., Belehaki, A., Rafios, X., Tsagouri, I.: ‘Hale – cycle effects in cosmic ray intensity during the last four cycles’, *Astrophysics and Space Science*, 246, 7 – 14, 1997

Mavromichalaki, H., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Tatsis, S., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Pchelkin, A.: ‘Athens Neutron Monitor and its aspects in the cosmic-ray variations’ *Proc. 27<sup>th</sup> ICRC 2001 (Hamburg)*, 10, 4099 – 4102, 2001

Mavromichalaki H., Yanke, V., Dorman, L., Iucci, N., Chilingarian, A., Kryakunova, O.: ‘Neutron monitor network in real time and space weather’, in: *Effects of Space Weather on Technology Infrastructures NATO Science Series*, 176, 301 – 317, 2004

Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Mariatos, G., Plainaki, C., Papaioannou, A., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Tsitomenas, S.: 'Space weather forecasting at the new Athens centre: the recent extreme event of January 2005', *IEEE*, 52, 2307 – 2312, 2005a

Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Petrides, A., Assimakopoulos, B., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G.: 'Cosmic-ray events related to solar activity recorded at the Athens neutron monitor station for the period 2000-2003', *International Modern Journal of Physics A*, 20, 6714 – 6716, 2005b

Μαυρομιχαλάκη, Ε.: 'Κοσμική Ακτινοβολία', Παν/κό Σύγγραμμα, 2005

Mavromichalaki, H., Paouris, E., Karalidi, T.: 'Cosmic-Ray Modulation: An Empirical Relation with Solar and Heliospheric Parameters', *Solar Physics*, 245, 369 – 390, 2007

Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mustafa, F.R.: 'Geomagnetic disturbances and cosmic ray variations in relation to human cardio-health state: A wide collaboration', *Proc. 21<sup>st</sup> ECRS (Kosice)*, 351 – 356, 2008

Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Mariatos, G., Papailiou, M., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G.: 'Athens Neutron Monitor Data Processing Center: ANMODAP Center', *Adv. Space Res.*, 44, 1237 – 1246, 2009a

Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: 'Physiological state of Slovak aviators in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray intensity variations', *Proc. 31<sup>st</sup> ICRC, icrc0673*, 2009b

Mavromichalaki, H., Souvatzoglou, G., Sarlanis, C., Mariatos, G., Papaioannou, A., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V. for the NMDB team: 'Implementation of the ground level enhancement alert software at NMDB database', *New Astronomy*, 15, 744 – 748, 2010

Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Papailiou, M., Eroshenko, E., Belov, A., Yanke, V. and the NMDB team: 'Applications and usage of the Real – time Neutron Monitor database', *Advances in Space Research*, 47, 2210 – 2222, 2011

Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Loucas, P.: 'Space weather hazards and their impact on human cardio-health state parameters on Earth', *Natural Hazards*, 64, 1447 – 1459, 2012

McCracken, K.G., Rao, U.R., Shea, M.A.: 'The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field', MIT Laboratory for Nuclear Science, Technical Report 77 (NYO-2670), 1962

McDonald, F.B.: 'Integration of neutron monitor data with spacecraft observations: a historical perspective', *Space Sci. Rev.*, 93, 239-258, 2000

Mendoza, B. & Sánchez de la Peña, S.: 'Solar activity and human health at middle and low geomagnetic latitudes in Central America' *Advances in Space Research*, 46, 449 – 459, 2010

Miroshnichenko, L.: 'Solar cosmic rays', Kluwer Academic Press, 2001

Moraal, H., Gleeson, L.J., Webb, G.M.: 'Effects of charged particle drifts on the modulation of the intensity of galactic cosmic rays' *Proc. 16<sup>th</sup> ICRC*, 3, 1 – 4, 1979

Moraal, H., Belov, A.V., Clem, J.M.: 'Design and co-ordination of multi-station international neutron monitor stations', *Space Sci. Rev.*, 93, 263 – 280, 2000

Morishita, I., Nagashima, K., Sakakibara, S., Munakata, K.: 'Long Term Changes of the Rigidity Spectrum of Forbush Decreases', *Proc. 21<sup>st</sup> ICRC (Adelaide)*, 6, 217 – 220, 1990

Μουσάς, Ξ.Δ. & Πρέκα – Παπαδήμα, Π.: 'Φυσική Διαστήματος', Παν/κό Σύγγραμμα, 2003

Munakata, K., Bieber, J.W., Yasue, S., Kato, C., Koyama, M., Akahane, S., Fujimoto, K., Fujii, Z., Humble, J.E., Duldig, M.L.: 'Precursors of geomagnetic storms observed by muon detector network', *J. Geophys. Res.*, 105, 27457 – 27468, 2000

Munakata, K., Kuwabara, T., Yasue, S., Kato, C., Akahane, S., Koyama, M., Ohashi, Y., Okada, A., Aoki, T., Mitsui, K., Kojima, H., Bieber, J.W.: 'A "Loss-Cone" Precursor of an Approaching Shock Observed by a Cosmic-Ray Muon Hodoscope on October 28, 2003', *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03S04, doi:10.1029/2004GL021469, 2005

Munakata, K., Yasue, S., Kato, C., Kota, J., Tokumaru, M., Kojima, M., Darwish, A.A., Kuwabara, T., Bieber, J.W.: 'On the cross-field diffusion of galactic cosmic rays into an ICME', *WSPC/SPI-B368 Advances in Geosciences, Vol. 2, ch09*, 115 – 124, 2006

Nagashima, K.: 'Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space. I. Formulation of cosmic ray daily variation produced by axis-symmetric anisotropy', *Rep. Ionosph. Space Res. Jpn.*, 25, 189 – 211, 1971

Nagashima, K., Sakakibara, S., Fujimoto, K., Fujii, Z., Ueno H.: 'Local-time-dependent precursory decrease of cosmic rays, in front of Forbush-decrease-associated IMF shock wave, observed on September 9, 1992', *Proc. 23<sup>rd</sup> ICRC*, 3, 711 – 714, 1993

Oinuma, S., Kubo, Y., Otsuka, K., Yamanakata, T., Murakami, S., Matsuoka, O., Ohkawa, S., Cornelissen, G., Weydahl, A., Holmeslet, B., Hall, C., Halberg, F.: 'Graded response of heart rate variability, associated with an alteration of geomagnetic activity in a subarctic area', *Biomedicine & pharmacotherapy*, 56, 284 – 288, 2002

Oraevskii, V.N., Breus, T.K., Baevskii, R.M., Rapoport, S.I., Petrov, V.M., Barsukova, Z.V., Gurfinkel, I., Rogoza, A.T.: 'Effect of geomagnetic activity on the functional status of the body', *Biofizika*, 43, 819 – 826, 1998

Otaola, J.R., Perez-Enriquez, R., Valdes-Galicia, J.F.: ‘Difference between even and odd 11-year cycles in cosmic ray intensity’, Proc. 19<sup>th</sup> ICRC, 4, 493 – 496, 1985

Otsuka, K., Cornelissen, G., Weydahl, A., Holmeslet, B., Hansen, T.L., Shinagawa, M., Kubo, Y., Nishimura, Y., Omori, K., Yano, S., Halberg, F.: ‘Geomagnetic disturbance associated with decrease in heart rate variability in a Subarctic Area’, Biomed. Pharmacother., 55, 51 – 56, 2001

Palmer, S.J., Rycroft, M.J., Cermack, M.: ‘Solar and Geomagnetic Activity, Extremely Low Frequency Magnetic and Electric Fields and Human Health at the Earth’s Surface’, Surv. Geophys., 27, 557 – 595, 2006

Paouris, E., Mavromichalaki, H., Belov, A., Guischina, R., Yanke V.: ‘Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum’, Solar Physics, DOI: 10.1007/s11207-012-0051-4, 2012

Παπαηλιού, Μ.: ‘Επίδραση των γεωμαγνητικών διαταραχών ηλιακής προέλευσης σε ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους’, ΜΔΕ, ΕΚΠΑ, 2008

Παπαηλιού, Μ., Λουκάς, Π., Μαυρομιχαλάκη, Ε., Dimitrova, S., Babayev, E.S.: ‘Επίδραση γεωμαγνητικών μεταβολών και μεταβολών της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας στην φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού: Πειραματικά αποτελέσματα από το Μπακού’, 13<sup>ο</sup> Συνέδριο ΕΕΦ, ISBN 978-960-9457-00-2, Αρ. Εργασίας: 170, Αρ. Σελίδων: 9, 2010

Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Vassilaki, A., Kelesidis, K.M., Mertzanos, G.A., Petropoulos, B.: ‘Cosmic ray variations of solar origin in relation to human physiological state during December 2006 solar extreme events’, Advances in Space Research, 43, 523 – 529, 2009

Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mavromichalaki, H.: ‘Analysis of changes of cardiological parameters at middle latitude region in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray variations’, (AIP) Conference Proceedings, 1203, DOI: 10.1063/1.3322548, 748 – 753, 2010

Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: ‘The effect of cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators’, *ASTRA*, 7, 373 – 377, 2011a

Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: ‘Effect of geomagnetic disturbances on physiological parameters: An investigation on aviators’, *Advances in Space Research*, 48, 1545 – 1550, 2011b

Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: ‘Cosmic radiation influence on the physiological state of aviators’, *Natural Hazards*, 61, 719 – 727, 2012a

Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: ‘Precursor effects in different cases of Forbush decreases’, *Solar Physics*, 276, 337 – 350, 2012b

Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: ‘The asymptotic longitudinal cosmic ray intensity distribution as precursor for Forbush decreases’, *Solar Physics*, 280, 641 – 650, 2012c

Papailiou, M., Abunina, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Kryakunova, O.: ‘Forbush decreases associated with western solar sources and geomagnetic storms: A study on precursors’, *Solar Physics*, 283, 557 – 563, 2013

Παπαϊωάννου, Α.: ‘Μελέτη μεταβολών βαθμίδας πυκνότητας και ανισοτροπίας της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια έντονων γεγονότων στην καθοδική φάση του ηλιακού κύκλου’, ΜΔΕ, ΕΚΠΑ, 2007

Papaiouannou, A., Mavromichalaki, H., Eroshenko, E., Belov, A., Oleneva, V.: ‘The burst of solar and geomagnetic activity in August – September 2005’, *Annales Geophysicae*, 27, 1019 – 1026, 2009

Παπαϊωάννου, Α.: ‘Ταυτοποίηση και ανάλυση έντονων γεγονότων της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας’, ΔΔΦΕ, ΕΚΠΑ, 2012



Parker, E.N.: 'The passage of energetic charged particles through interplanetary space', *Planet. Space Sci.*, 13, 9 – 49, 1965

Parks, G.K.: 'Physics of space plasmas', Addison – Wesley Publishing Company, 1991

Πλαϊνάκη, Χ.: 'Φυσική ηλιακών κοσμικών σωματίων με δεδομένα από μετρητές νετρονίων και δορυφόρους', ΔΔΦΕ, ΕΚΠΑ, 2007

Potemra, T.A.: 'Magnetospheric Currents', *Geophysical Monograph Series*, 28, 357, 1984

Πρέκα – Παπαδήμα, Π., Δανέζης, Μ., Θεοδοσίου, Σ., Καργιολάκη, Δ.: 'Στα μονοπάτια του Ήλιου: Εισαγωγή στην Ηλιακή Φυσική', Δίαυλος, 2009

Ptitsyna, N.G., Villaresi, G., Kopytenko, Y.A., Kudrin, V.A., Tyasto, M.I., Kopytenko, E.A., Iucci, N., Voronov, P.M., Zaitsev, D.B.: 'Coronary heart diseases: an assessment of risk associated with work exposure to ultra low frequency magnetic fields', *Bioelectromagnetics*, 17, 436 – 444, 1996

Ramesh, K.B.: 'Solar cycle variation of the occurrence of geomagnetic storms', *Solar drivers of interplanetary and terrestrial disturbances*, *ASP Conference Series*, 95, 462 – 469, 1996

Rao, U.R., McCracken, K.G., Allum, F.R., Palmeira, R.A.R., Bartley, W.C., Palmer, I.: 'Anisotropy characteristics of low energy cosmic ray population of solar origin', *Proc. 12<sup>th</sup> ICRC*, 2, 525 – 528, 1971

Reames, D.V.: 'Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere', *Space Science Reviews*, 90, 413 – 491, 1999

Reiter, R.: 'Bio-meteorologie auf physikalischer', *Basis. Phys. Blatter*, 11, 453 – 464, 1955

Ruffolo, D., Bieber, J.W., Evenson, P., Pyle, R.: 'Precursors to Forbush decreases and space weather prediction', In: Kieda, D., Salamon, M., Dingus, B. (eds.), Proc. 26<sup>th</sup> ICRC, International Union of Pure and Applied Physics, Salt Lake City, USA, 6, 440 – 443, 1999

Russell, C.T.: 'The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: A tutorial', IEEE TNS, 28, 1818 – 1830, 2000

Schwenn, R.: 'Space weather: The solar perspective', Living Rev. Solar Phys., 3, 2, 2006

Selye, H.: 'The Stress of Life', McGraw-Hill, New York, 1956

Simpson, J. A.: 'Neutrons Produced in the Atmosphere by the Cosmic Radiations', Phys. Rev., 83, 1175 – 1188, 1951

Simpson, J.A., Fonger, W., Treiman, S.: 'Cosmic Radiation Intensity-Time Variations and Their Origin. I. Neutron Intensity Variation Method and Meteorological Factors', Phys. Rev., 90, 934 – 950, 1953

Simpson, J.A.: 'Cosmic-Radiation Intensity-Time Variations and Their Origin. III The Origin of 27-Day Variations', Phys. Rev., 94, 426 – 440, 1954

Singer, S.F.: 'Storm decrease of the cosmic radiation at the pole', Phys. Rev., 95, 647, 1954

Singer, S.F.: 'Observations of Cosmic Ray Decreases at the Pole', Nuovo Cimento Suppl. VIII, 326 – 333, 1958

Singh, A.K., Singh, D., Singh, R.P.: 'Impact of galactic cosmic rays on Earth's atmosphere and human health', Atmospheric Environment, 45, 3806 – 3818, 2011

Smart, D.F., Shea, M.A., Flueckiger, E.O.: 'Magnetospheric models and trajectory computations', Space Sci. Rev., 93, 305, 2000

Souvatzoglou, G., Mavromichalaki, H., Sarlanis, C., Mariatos, G., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: 'Real-time GLE alert in the ANMODAP Center for December 13, 2006', *Adv. Space Res.*, 43, 728 – 734, 2009

Steigies, C. and the NMDB team: 'NMDB: Real-time database for high-resolution neutron monitor measurements', *Geophys. Res. Abstr.* 10, EGU2008-A-00000, 2008a

Steigies, C.T., Thomann, M., Rother, O., Wimmer-Schweingruber, R., Heber, B.: 'Real-time database for high resolution neutron monitor measurements', *Proc. 30<sup>th</sup> ICRC*, 1, 303 – 306, 2008b

Stoilova, I. & Dimitrova, S.: 'Geophysical variables and human health and behaviour', *JASTP*, 70, 428 – 435, 2008

Stoker, P.H., Dorman, L.I., Clem, J.M.: 'Neutron Monitor design improvements', *Space Science Reviews*, 93, 361 – 380, 2000

Storini, M., Signoretti, F., Diego, P., Re, F., Laurenza, M.: 'A 3NM-64 <sup>3</sup>He added to LARC for solar extreme event studies during solar cycle 24', *Adv. Space Res.*, 43, 721 – 727, 2009

Stoupel, E., Wittenberg, C., Zabłudowski, J., Boner, G.: 'Ambulatory blood pressure monitoring in patients with hypertension on days of high and low geomagnetic activity', *J. Hum. Hypertens.*, 9, 293 – 294, 1995

Stoupel, E.: 'Effect of geomagnetic activity on cardiovascular parameters', *J. Clin. Basic Cardiol.*, 2, 34 – 40, 1999

Stoupel, E.: 'The effect of geomagnetic activity on cardiovascular parameters', *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 56, 247 – 256, 2002

Stoupel, E., Petrauskiene, J., Abramson, E., Kalediene, R., Sulkes, J.: 'Distribution of monthly deaths, solar (SA) and geomagnetic (GMA) activity: their relationship in the

last decade of the second millennium: the Lithuanian study 1990 – 1999’, *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 56, 301 – 308, 2002a

Stoupel, E., Zhemaityte, D., Drungiliene, D., Martinkenas, A., Abramson, E., Sulkes, J.: ‘Klaipeda cardiovascular emergency aid services correlate with 10 cosmo-physical parameters by time of occurrence’, *J. Clin. Basic Cardiol.*, 5, 225 – 227, 2002b

Stoupel, E., Kalediene, R., Petrauskiene, J., Domarkiene, S., Radishauskas, R., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J.: ‘Three Kinds of Cosmophysical Activity: Links to Temporal Distribution of Deaths and Occurrence of Acute Myocardial Infarction’, *Med. Sci. Monit.*, 10, 80 – 84, 2004

Stoupel, E., Domarkiene, S., Radishauskas, R., Israelevich, P., Abramson, E., Sulkes, J.: ‘In women myocardial infarction occurrence is much stronger related to environmental physical activity than in men-a gender or an advanced age effect?’, *J. Clin. Basic Cardiol.*, 8, 59 – 60, 2005

Stoupel, E.: ‘Cardiac Arrhythmia and geomagnetic activity’, *Indian Pacing and Electrophysiology Journal*, 6, 49 – 53, 2006

Stoupel, E., Babayev, E.S., Mustafa, F.R., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J.: ‘Clinical Cosmobiology – Sudden Cardiac death and Daily / Monthly Geomagnetic, Cosmic ray and solar activity – the Baku study (2003 – 2005)’, *Sun and Geosphere*, 1, 13 – 16, 2006

Stoupel, E., Babayev, E.S., Mustafa, F.R., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J.: ‘Acute Myocardial Infarction Occurrence: Environmental Links – Baku 2003–2005 Data’, *Med. Sci. Monit.*, 13, 175 – 179, 2007a

Stoupel, E., Kalediene, R., Petrauskiene, J., Starkuviene, S., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J.: ‘Monthly Deaths Number and Concomitant Environmental Physical Activity: 192 Months Observation (1990-2005)’, *Sun and Geosphere*, 2, 78 – 83, 2007b

Stoupel, E., Kalediene, R., Petrauskiene, J., Starkuviene, S., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J.: 'Clinical cosmobiology: distribution of deaths during 180 months and cosmophysical activity. The Lithuanian study, 1990 – 2004, the role of cosmic rays', *Medicina*, 43, 824 – 831, 2007c

Stoupel, E., Babayev, E.S., Shustarev, P.N., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J.: 'Traffic accidents and environmental physical activity', *Int. J. Biometeorol.*, 53, 523 – 534, 2009

Τσίγκανος, Κ.Χ.: 'Φυσική Πλάσματος', Παν/κό Σύγγραμμα, 2010

Tsurutani, B.T.: 'The interplanetary causes of magnetic storms, substorms and geomagnetic quiet', 2001

Toptygin, I.N.: 'Cosmic rays in interplanetary magnetic fields', D. Reidel Publishing Company, 1985

U.S. National Space Weather Programme, The Strategic Plan, FCM-P-30-1995, Washington DC, August 1995

Usenko, G.A., Deriapa, N.R., Kopanev, S.I., Panin, L.E.: 'Influence of the heliogeophysical factors on some professional and physiological functions of the Sibir's pilots', In: *Biophysical and clinical aspects of heliobiology*. Ed. House Nauka, Leningrad, 52 – 65, 1989

Usoskin I. & Mursula K.: 'Heliospheric Physics and Cosmic Rays', Lecture notes, University of Oulu, 2001

Villoresi, G., Breus, T.K., Iucci, N., Dorman, L.I., Rapoport, S.I.: 'The influence of geophysical and social effects on the incidences of clinically important pathologies (Moscow 1979-1981)', *Physica Medica*, 10, 79 – 91, 1994a

Villoresi, G., Kopytenko, Y.A., Ptitsyana, N.G., Tyasto, M.I., Kopytenko, E.A., Iucci, N., Voronov, P.M.: 'The influence of geomagnetic storms and man-made magnetic

field disturbances on the incidence of myocardial infarction in St. Petersburg (Russia)', *Physica Medica*, 10, 107 – 117, 1994b

Villoresi, G., Dorman, L.I., Ptitsyna, N.G., Iucci, N., Tyasto, M.I.: 'Forbush Decreases as Indicators of Health-Hazardous Geomagnetic Storms', *Proc. 24<sup>th</sup> ICRC (Rome)*, 4, 1106 – 1109, 1995

Villoresi, G., Ptitsyna, N. G., Tiasto, M. I., Iucci, N.: 'Myocardial Infarct and Geomagnetic Disturbances: Analysis of Data on Morbidity and Mortality', *Biofizika*, 43, 623 – 631, 1998

Winer, B.J., Brown, D.R., Michels, K.M.: 'Statistical principals in experimental design (3<sup>rd</sup> ed.)', New York: McGraw-Hill, 1991

Zhadin, M.N.: 'Review of Russian literature on biological action of DC and low frequency AC magnetic fields', *Bioelectromagnetics*, 22, 27 – 45, 2001

## Ιστοσελίδες

<http://www.nmdb.eu>

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

<http://www.spaceweather.com/>

[http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old\\_indices.html](http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html)

<http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>

<http://www.swpc.noaa.gov/info/Satellites.html>

<http://neutronmonitor.ta3.sk/realtime.php3>

<http://neutronmonitor.ta3.sk/>

<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>

<http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/storms.html>

[http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/description.html](http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/description.html)

[http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/ring\\_current.html](http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/ring_current.html)

[http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2\\_ECG.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/askhsh2_ECG.pdf)

[http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/CHAPTER\\_3\\_FYS IOLOGIA\\_KARDIAS.pdf](http://www.biomed.ntua.gr/Portals/1/presentations/undergraduate/CHAPTER_3_FYS IOLOGIA_KARDIAS.pdf)

<http://www.incardiology.gr>

<http://www.statsoft.com/textbook/>

<http://www.stat.ufl.edu/~aa/sta6127/ch12.pdf>

<http://www.ae.metu.edu.tr/~tyapici/thesis/chapter3.pdf>

[http://www.iiap.res.in/ihy/school/prasad\\_lecture.pdf](http://www.iiap.res.in/ihy/school/prasad_lecture.pdf)

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**



Οι πίνακες παρακάτω δίνουν τις διαπλανητικές παραμέτρους για όλα τα γεγονότα που εξετάτηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής.

**Πίνακας 1.** Το σύνολο των 93 μειώσεων Forbush που πληρούν το κριτήριο της ανισοτροπίας ( $A_{xy} > 1.2\%$ ).

$\alpha/\alpha$	Ημερομηνία (YYYY.MM.DD)	Ωρα (UT)		Πλάτος FD (%)	$Kp_{max}$	$Dst_{min}$ (nT)	$IMF_{max}$ (nT)	Ταχύτητα HA max ( $km\ s^{-1}$ )	$A_{xymax}$ (%)
1	1967.01.17	15:00	--	0.9	3.3	-42	8.3	398	1.74
2	1967.04.10	03:00	--	1.1	3.0	-17	8.1	367	2.34
3	1967.07.04	09:00	--	0.5	4.3	-38	8.3	370	1.34
4	1967.08.15	07:00	--	0.6	2.3	-14	10.5	533	1.33
5	1967.11.27	08:00	--	1.0	4.0	-49	10.7	443	1.72
6	1968.01.26	14:41	sc	4.2	4.3	-36	16.1	492	3.75
7	1968.02.07	17:13	sc	1.0	4.3	-48	14.4	548	2.61
8	1968.02.26	17:00	--	2.3	4.7	-51	17.9	489	1.70
9	1968.04.21	03:00	--	1.3	3.7	-32	8.8	431	2.14
10	1968.04.25	11:00	--	2.3	5.7	-47	13.3	587	2.68
11	1969.02.10	20:24	sc	3.0	6.3	-136	15.1	566	1.53
12	1970.02.12	16:00	--	1.9	4.0	-21	11.7	455	1.70
13	1970.06.01	03:05	sc	1.9	5.3	-32	14.0	552	2.13
14	1970.06.07	10:00	--	1.2	4.3	-27	11.7	429	1.66
15	1972.11.14	18:00	--	0.9	5.3	-48	13.9	518	1.52
16	1973.01.19	15:00	--	4.6	6.0	-72	17.9	518	2.04
17	1974.05.28	22:00	--	1.7	3.7	-20	12.4	453	2.30
18	1974.12.06	11:00	--	0.4	2.7	-9	9.9	435	1.39
19	1977.09.26	07:00	--	1.4	5.7	-84	13.9	427	2.29
20	1978.01.03	20:42	sc	4.2	7.3	-121	17.9	756	2.97
21	1978.01.16	08:00	sc	1.9	4.7	-55	13.1	358	1.67
22	1978.07.13	00:15	sc	5.0	4.3	-11	13.4	442	2.62
23	1978.08.16	01:00	--	1.2	3.3	-12	9.6	354	2.24
24	1978.08.27	02:46	sc	2.1	8.3	-226	23.6	478	2.36
25	1978.09.24	12:00	--	1.4	3.7	-21	11.3	413	2.21
26	1978.10.07	08:00	--	0.4	2.3	-21	6.7	375	1.60
27	1978.11.15	21:00	--	0.5	2.7	-50	7.6	506	2.19
28	1979.04.08	05:00	--	0.9	4.0	-33	11.1	494	1.91
29	1979.07.26	18:32	sc	1.4	5.7	-89	15.3	365	1.78
30	1979.08.17	16:00	--	2.6	3.3	-11	7.9	440	3.15
31	1979.09.03	12:00	--	0.8	3.7	-28	8.0	444	1.69
32	1979.11.01	05:00	--	1.6	3.7	-33	12.3	515	2.08
33	1979.12.03	12:00	--	1.3	4.0	-45	9.5	397	1.60
34	1980.01.11	07:57	sc	2.2	3.0	-20	11.1	442	1.51
35	1980.03.30	23:54	sc	1.4	4.0	-39	11.9	397	2.25
36	1980.06.24	2:48	sc	3.7	3.7	-18	14.0	453	2.62
37	1980.07.03	01:00	--	1.3	3.0	-3	7.5	311	2.47
38	1980.07.25	11:11	sc	4.9	7.0	-88	16.0	503	1.97
39	1980.08.02	10:00	--	1.3	4.3	-43	12.1	416	2.03

40	1980.12.11	10:09	sc	3.7	4.7	-27	18.0	640	3.30
41	1981.09.08	21:46	sc	2.8	4.3	-12	14.7	444	3.06
42	1981.10.02	20:22	sc	3.7	6.3	-50	19.4	710	2.65
43	1981.12.12	01:44	sc	1.4	4.7	-57	12.5	537	1.52
44	1982.04.16	17:02	sc	2.6	5.0	-60	17.1	518	1.97
45	1984.07.24	01:00	--	3.3	3.7	-20	13.5	477	2.84
46	1985.03.22	18:00	--	1.1	3.0	-8	-	-	1.66
47	1988.01.01	05:00	--	3.3	5.3	-88	19.0	476	2.20
48	1988.10.10	02:32	sc	3.2	7.7	-156	27.4	-	2.17
49	1988.10.15	13:00	--	2.4	4.7	-56	16.8	608	2.71
50	1989.02.24	03:00	--	2.5	3.3	-17	-	-	2.19
51	1989.11.24	03:00	--	1.6	2.3	-20	10.1	430	2.78
52	1991.04.10	15:00	--	0.8	3.3	-26	10.8	426	1.77
53	1991.06.17	10:19	sc	2.9	6.3	-31	-	-	2.89
54	1992.03.03	15:00	--	1.8	4.0	-38	9.4	496	2.30
55	1992.08.26	05:00	--	1.3	4.0	-41	9.4	468	1.23
56	1992.09.09	01:39	sc	6.6	7.3	-135	25.0	589	4.10
57	1995.03.04	01:15	sc	1.1	2.7	-27	-	-	1.33
58	1995.10.22	20:00	--	0.8	5.0	-57	7.9	447	1.77
59	1998.04.11	20:00	--	1.1	4.0	-56	10.2	407	1.53
60	1998.08.10	00:46	sc	1.7	3.7	-37	10.7	498	1.91
61	1998.08.26	07:00	--	7.2	8.0	-188	18.9	847	4.85
62	1998.09.03	16:00	--	0.6	3.0	-42	6.9	417	1.39
63	1998.10.18	19:52	sc	1.6	6.7	-139	26.2	430	1.24
64	1999.05.16	09:00	--	1.9	1.7	-21	5.7	407	2.87
65	1999.05.22	19:00	--	2.8	3.3	-17	8.5	488	2.37
66	1999.10.26	22:00	--	0.6	4.7	-67	7.5	480	1.57
67	1999.11.27	22:00	--	0.6	2.7	-16	9.6	430	1.33
68	2000.01.22	00:23	--	1.7	6.3	-91	18.1	431	1.66
69	2000.02.20	21:39	sc	2.1	4.7	-26	16.9	455	2.45
70	2000.07.19	15:27	sc	3.3	6.0	-93	14.4	609	2.20
71	2000.08.20	08:00	--	0.9	3.7	-33	8.4	356	1.65
72	2000.09.15	04:50	sc	3.4	2.7	-18	9.6	401	3.30
73	2000.10.28	09:54	sc	7.7	6.0	-127	18.8	415	3.49
74	2000.12.03	04:09	sc	1.1	3.3	-36	12.3	484	1.78
75	2001.01.08	13:00	--	0.9	4.0	-26	8.2	436	1.61
76	2001.05.03	10:00	--	1.2	3.0	-7	9.6	393	1.94
77	2001.08.03	07:16	sc	1.1	4.3	-18	11.0	437	3.00
78	2001.08.17	11:03	sc	6.3	7.0	-105	32.1	599	4.41
79	2001.09.06	13:00	--	1.2	3.0	-26	7.0	424	1.20
80	2001.09.25	20:25	sc	8.3	7.3	-102	26.1	677	1.84
81	2001.11.27	07:00	--	1.2	1.3	-55	6.2	518	1.88
82	2001.11.30	19:00	--	1.7	2.7	-17	10.4	387	1.49
83	2002.03.29	21:00	sc	1.0	4.3	-35	20.7	765	1.24
84	2002.04.23	04:48	sc	2.2	6.0	-56	15.1	592	1.49
85	2002.05.10	11:23	sc	2.2	4.0	-11	10.8	420	1.96
86	2002.08.25	22:00	--	0.8	3.3	-7	-	-	2.35
87	2002.09.07	16:36	sc	4.6	7.3	-170	22.9	550	1.64

88	2002.10.10	23:00	--	2.1	4.0	-60	8.4	407	1.98
89	2002.12.17	18:00	--	2.0	1.3	5	15.2	451	1.95
90	2004.06.08	19:00	--	1.8	3.3	-20	7.7	468	1.58
91	2005.06.21	20:00	--	0.8	3.7	-11	9.2	353	2.08
92	2006.07.04	00:00	--	1.3	5.0	-34	18.5	623	1.61
93	2006.07.09	21:36	sc	4.5	3.3	-23	9.7	433	1.95

**Πίνακας 2.** Το σύνολο των 25 μειώσεων Forbush που πληρούν το κριτήριο των δυτικών πηγών και των γεωμαγνητικών καταιγίδων.

<b>a/a</b>	<b>Ημερομηνία (YYYY.MM.DD)</b>	<b>Ωρα (UT)</b>		<b>Πλάτος FD (%)</b>	<b>Kp<sub>max</sub></b>	<b>Dst<sub>min</sub> (nT)</b>	<b>IMF<sub>max</sub> (nT)</b>	<b>Ταχύτητα ΗΑ max (km s<sup>-1</sup>)</b>	<b>A<sub>xy</sub>max (%)</b>
1	1977.09.21	20:44	sc	5.4	7.3	-92	12.2	777	5.06
2	1978.05.10	20:05	sc	0.7	6.0	-78	10.2	641	0.89
3	1980.01.28	15:43	sc	2.5	5.3	-69	23.8	515	1.22
4	1980.10.30	15:20	sc	3.6	5.3	-58	16.4	548	2.18
5	1981.04.18	15:03	sc	0.8	6.0	-81	13.3	521	1.37
6	1981.07.23	06:46	sc	3.9	5.7	-89	16.8	487	1.27
7	1981.10.13	22:40	sc	7.3	8.0	-133	24.5	623	2.05
8	1983.10.04	05:41	sc	1.1	6.7	-71	23.6	533	1.91
9	1985.08.12	14:51	sc	1.1	6.3	-51	20.9	640	1.19
10	1987.09.24	01:57	sc	2.8	5.3	-61	20.6	427	1.18
11	1989.03.19	04:23	sc	2.2	6.7	-106	22.7	880	2.81
12	1989.08.17	15:41	--	5.7	5.7	-67	13.7	671	5.77
13	1990.05.26	20:37	sc	0.8	7.3	-87	-	-	2.61
14	1991.06.17	10:19	sc	2.9	6.3	-31	-	-	2.89
15	1991.07.13	02:34	sc	3.7	8.7	-183	-	-	2.34
16	1992.06.27	20:35	sc	0.6	6.7	-98	13.3	597	1.36
17	1993.03.15	05:26	sc	0.5	5.7	-90	-	-	1.12
18	1998.05.29	15:36	sc	1.8	6.7	-58	17.3	716	1.35
19	2000.04.06	16:32	sc	2.8	8.7	-288	31.4	625	2.79
20	2000.10.28	09:54	sc	7.7	6.0	-127	18.8	415	3.49
21	2003.11.04	06:25	sc	2.6	7.0	-89	19.7	754	2.66
22	2004.07.16	21:55	--	1.0	6.0	-80	16.4	556	1.05
23	2005.01.21	17:11	sc	9.0	8.0	-105	29.5	950	5.26
24	2005.05.07	19:16	sc	0.9	6.0	-91	16.6	566	0.63
25	2005.08.24	06:13	sc	6.4	8.7	-216	52.2	720	2.66

**Πίνακας 3.** Το σύνολο των 14 μειώσεων Forbush που πληρούν το κριτήριο των μεγάλων μειώσεων και των δυτικών πηγών.

<b>a/a</b>	<b>Ημερομηνία (YYYY.MM.DD)</b>	<b>Ωρα (UT)</b>		<b>Πλάτος FD (%)</b>	<b>Kp<sub>max</sub></b>	<b>Dst<sub>min</sub> (nT)</b>	<b>IMF<sub>max</sub> (nT)</b>	<b>Ταχύτητα HA max (km s<sup>-1</sup>)</b>	<b>A<sub>xy</sub>max (%)</b>
1	1981.10.13	22:40	sc	7.3	8.0	-133	24.5	623	2.05
2	1982.06.12	14:43	sc	4.5	6.7	-56	17.1	681	2.62
3	1989.05.07	05:12	sc	4.0	6.0	-90	14.7	514	2.30
4	1989.09.30	17:16	sc	4.7	4.0	-39	-	-	2.98
5	1989.10.26	14:27	sc	4.0	5.0	-53	11.6	576	3.51
6	1990.03.30	07:20	sc	5.5	8.0	-187	18.4	616	3.68
7	1992.09.09	01:39	sc	6.6	7.3	-135	25.0	589	4.10
8	2001.04.28	05:00	sc	7.9	6.0	-47	19.9	724	2.59
9	2001.08.17	11:03	sc	6.3	7.0	-105	32.1	599	4.41
10	2001.11.24	05:56	sc	9.2	8.3	-221	56.9	1040	3.19
11	2002.03.20	13:28	sc	4.4	4.3	-14	20.1	576	2.55
12	2004.07.26	22:49	sc	13.5	8.7	-197	26.1	1027	2.60
13	2006.07.09	21:36	sc	4.5	3.3	-23	9.7	433	1.95
14	2006.12.14	14:14	sc	8.6	8.3	-146	17.9	896	4.35

**Πίνακας 4.** Το σύνολο των 22 μειώσεων Forbush που πληρούν το κριτήριο των μεγάλων μειώσεων και των ανατολικών πηγών.

<b>α/α</b>	<b>Ημερομηνία (YYYY.MM.DD)</b>	<b>Ωρα (UT)</b>		<b>Πλάτος FD (%)</b>	<b>Kp<sub>max</sub></b>	<b>Dst<sub>min</sub> (nT)</b>	<b>IMF<sub>max</sub> (nT)</b>	<b>Ταχύτητα HA max (km s<sup>-1</sup>)</b>	<b>A<sub>xy</sub>max (%)</b>
1	1978.04.30	09:51	sc	4.7	8.0	-77	23.5	-	1.51
2	1978.07.13	00:15	sc	5.0	4.3	-11	13.4	442	2.62
3	1979.06.06	19:27	sc	7.0	7.0	-40	54.4	655	2.06
4	1981.03.01	07:37	sc	4.8	5.0	-58	15.4	531	1.63
5	1981.11.11	12:38	sc	6.3	6.7	-124	25.4	661	2.01
6	1982.03.01	11:38	sc	5.1	8.0	-211	33.4	768	2.44
7	1982.04.24	20:16	sc	5.2	6.7	-78	23.0	675	2.57
8	1982.06.09	00:40	sc	5.4	6.3	-66	30.7	521	2.36
9	1982.07.13	16:17	sc	19.8	9.0	-325	44.3	986	4.71
10	1982.12.27	07:15	sc	4.2	4.7	-26	-	-	1.79
11	1989.04.11	14:35	sc	4.4	4.3	-56	21.5	440	2.24
12	1989.09.04	00:27	sc	7.2	6.0	-71	-	-	2.90
13	1990.03.20	22:43	sc	5.3	7.3	-136	-	-	1.29
14	1991.05.31	10:39	sc	6.6	7.3	-84	20.0	665	2.45
15	1991.07.19	19:04	sc	7.0	6.3	-73	10.7	663	1.80
16	1992.02.26	16:57	sc	9.7	8.0	-193	-	-	2.31
17	1992.03.17	09:51	sc	4.1	4.7	-53	24.6	576	2.70
18	2001.08.27	19:52	sc	6.5	4.7	-24	19.5	576	4.29
19	2001.09.25	20:25	sc	8.3	7.3	-102	26.1	677	1.84
20	2002.09.07	16:36	sc	4.6	7.3	-170	22.9	550	1.64
21	2004.07.22	10:36	sc	4.3	7.0	-101	18.9	672	2.08
22	2004.09.13	20:03	sc	5.0	5.3	-50	25.1	603	2.60

**Πίνακας 5.** Το σύνολο των 31 μειώσεων Forbush που πληρούν το κριτήριο των μεγάλων μειώσεων και των κεντρικών πηγών.

$\alpha/\alpha$	Ημερομηνία (YYYY.MM.DD)	Ωρα (UT)		Πλάτος FD (%)	$Kp_{max}$	$Dst_{min}$ (nT)	$IMF_{max}$ (nT)	Ταχύτητα ΗΑ max (km s <sup>-1</sup> )	$A_{xymax}$ (%)
1	1978.01.03	20:42	sc	4.2	7.3	-121	17.9	756	2.97
2	1978.03.08	14:39	sc	7.8	5.3	-99	16.7	-	2.92
3	1978.04.10	13:06	sc	5.4	7.7	-114	-	662	2.70
4	1978.06.25	08:25	sc	6.9	5.7	-77	26.1	573	2.99
5	1978.11.12	01:00	sc	4.6	6.0	-93	29.0	675	2.45
6	1980.07.25	11:11	sc	4.9	7.0	-88	16.0	503	1.97
7	1982.08.06	18:36	sc	4.8	7.7	-155	21.7	639	1.71
8	1982.09.21	03:39	sc	8.3	8.3	-210	22.9	-	4.51
9	1983.01.09	15:45	sc	7.7	8.3	-213	-	-	2.39
10	1983.02.04	16:15	sc	7.5	8.0	-183	-	-	3.06
11	1988.01.04	20:12	sc	4.7	5.3	-41	-	-	4.25
12	1988.01.13	23:30	sc	4.9	7.3	-147	31.1	760	1.69
13	1989.10.20	09:16	sc	20.4	8.3	-268	33.5	918	5.01
14	1989.11.27	21:39	sc	15.4	5.0	-46	29.8	739	4.44
15	1989.12.29	06:55	sc	4.3	6.7	-103	18.4	740	2.69
16	1991.06.30	01:16	sc	4.7	4.3	-55	-	-	2.86
17	1991.07.08	16:36	sc	10.5	8.0	-194	32.5	747	4.42
18	1991.11.08	06:47	sc	9.4	8.7	-354	-	-	3.71
19	1992.02.20	1:09	sc	5.7	7.3	-191	36.4	507	1.78
20	2000.06.08	09:10	sc	7.6	7.0	-90	24.9	774	3.00
21	2000.11.06	09:47	sc	7.8	7.0	-159	24.5	609	2.32
22	2001.10.11	17:01	sc	7.0	6.0	-71	26.5	571	3.81
23	2001.11.06	01:52	sc	12.4	8.7	-292	65.6	729	4.00
24	2002.03.18	13:22	sc	5.1	5.3	-41	22.5	469	1.25
25	2002.04.17	11:07	sc	6.2	7.3	-126	30.4	611	3.01
26	2002.08.18	18:46	sc	4.7	5.3	-58	14.3	573	2.50
27	2003.05.29	12:24	sc	7.7	8.3	-131	28.4	764	1.57
28	2003.11.20	08:03	sc	4.7	8.7	-472	55.8	703	2.65
29	2004.01.22	01:37	sc	8.6	7.0	-149	25.4	666	4.32
30	2004.12.05	07:46	sc	4.6	4.3	-67	34.6	457	1.68
31	2005.05.15	02:38	sc	9.5	8.3	-263	54.2	959	2.53

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**



**Πίνακας 1.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας (1<sup>η</sup> ομάδα)

α/α	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	24.06.1980	02:48							14.0	453	3.7	-18	3.7	2.62
2	28.10.2000	09:54	25.10.2000	08:26	770	17.4	360	halo	18.8	415	6.0	-127	7.7	3.49
3	17.08.2001	11:03	14.08.2001	-	-	-	-	-	32.1	599	7.0	-105	6.3	4.41
4	23.04.2002	04:48	21.04.2002	01:27	2393	-1.4	360	halo	15.1	592	6.0	-56	2.2	1.49
5	10.05.2002	11:23	07.05.2002	04:05	720	158.2	360	halo	10.8	420	4.0	-11	2.2	1.96

**Πίνακας 2.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας (2<sup>η</sup> ομάδα)

α/α	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ωρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ωρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>chy</sub> max (%)
1	03.01.1978	20:42							17.9	756	7.3	-121	4.2	2.97
2	13.07.1978	00:15							13.4	442	4.3	-11	5.0	2.62
3	11.01.1980	07:57							11.1	442	3.0	-20	2.2	1.51
4	30.03.1980	23:54							11.9	397	4.0	-39	1.4	2.25
5	25.07.1980	11:11							16.0	503	7.0	-88	4.9	1.97
6	11.12.1980	10:09							18.0	640	4.7	-27	3.7	3.30
7	02.10.1981	20:22							19.4	710	6.3	-50	3.7	2.65
8	10.10.1988	02:32							27.4	-	7.7	-156	3.2	2.17
9	09.09.1992	01:39							25.0	589	7.3	-135	6.6	4.10
10	26.08.1998	07:00	24.08.1998	data gap	data gap	data gap	data gap	data gap	18.9	847	8.0	-188	7.2	4.85
11	20.02.2000	21:39	17.02.2000	21:30:08	728	-22.9	360	halo	16.9	455	4.7	-26	2.1	2.45
12	25.09.2001	20:25	24.09.2001	10:30:59	2402	54.1	360	halo	26.1	677	7.3	-102	8.3	1.84
13	07.09.2002	16:36	05.09.2002	16:54:06	1748	43.0	360	halo	22.9	550	7.3	-170	4.6	1.64
14	09.07.2006	21:36	06.07.2006	08:54:04	911	8.2	360	halo	9.7	433	3.3	-23	4.5	1.95

**Πίνακας 3.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα του κριτηρίου ανισοτροπίας (3<sup>η</sup> ομάδα)

a/a	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	08.09.1981	21:46							14.7	444	4.3	-12	2.8	3.06
2	16.04.1982	17:02							17.1	518	5.0	-60	2.6	1.97
3	04.03.1995	01:15							-	-	2.7	-27	1.1	1.33
4	10.08.1998	00:46	07.08.1998	data gap	data gap	data gap	data gap	data gap	10.7	498	3.7	-37	1.7	1.91
5	18.10.1998	19:52	13.10.1998	data gap	data gap	data gap	data gap	data gap	26.2	430	6.7	-139	1.6	1.24
6	15.09.2000	04:50	09.09.2000	08:56:59	554	-13.4	180	271	9.6	401	2.7	-18	3.4	3.30
7	03.08.2001	07:16	03.08.2001	-	-	-	-	-	11.0	437	4.3	-18	1.1	3.00
8	25.08.2002	22:00	22.08.2002	02:06:06	998	-32.8	360	halo	-	-	3.3	-7	0.8	2.35

**Πίνακας 4.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα της ομάδας δυτικών πηγών και γεωμαγνητικών καταιγίδων

a/a	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>χγμ</sub> max (%)
1	10.05.1978	20:05							10.2	641	6.0	-78	0.7	0.89
2	28.01.1980	15:43							23.8	515	5.3	-69	2.5	1.22
3	30.10.1980	15:20							16.4	548	5.3	-58	3.6	2.18
4	23.07.1981	06:46							16.8	487	5.7	-89	3.9	1.27
5	04.10.1983	05:41							23.6	533	6.7	-71	1.1	1.91
6	12.08.1985	14:51							20.9	640	6.3	-51	1.1	1.19
7	19.03.1989	04:23							22.7	880	6.7	-106	2.2	2.81
8	26.05.1990	20:37							-	-	7.3	-87	0.8	2.61
9	27.06.1992	20:35							13.3	597	6.7	-98	0.6	1.36
10	29.05.1998	15:36	27.05.1998	13:45:42	878	-3.7	268	175	17.3	716	6.7	-58	1.8	1.35
11	06.04.2000	16:32	04.04.2000	16:32:37	1188	12.8	360	halo	31.4	625	8.7	-288	2.8	2.79
12	28.10.2000	09:54	25.10.2000	08:26:05	770	17.4	360	halo	18.8	415	6.0	-127	7.7	3.49
13	04.11.2003	06:25	02.11.2003	17:30:05	2598	-32.4	360	halo	19.7	754	7.0	-89	2.6	2.66
14	21.01.2005	17:11	20.01.2005	06:54:05	882	16.0	360	halo	29.5	950	8.0	-105	9.0	5.26
15	24.08.2005	06:13	22.08.2005	01:31:48	1194	-17.8	360	halo	52.2	720	8.7	-216	6.4	2.66

**Πίνακας 5.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush και δυτικών πηγών

a/a	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>xy</sub> max (%)
1	12.06.1982	14:43							17.1	681	6.7	-56	4.5	2.62
2	07.05.1989	05:12							14.7	514	6.0	-90	4.0	2.30
3	30.03.1990	07:20							18.4	616	8.0	-187	5.5	3.68
4	09.09.1992	01:39							25.0	589	7.3	-135	6.6	4.10
5	28.04.2001	05:00	26.04.2001	12:30:05	1006	21.1	360	halo	19.9	724	6.0	-47	7.9	2.59
6	17.08.2001	11:03	14.08.2001	-	-	-	-	-	32.1	599	7.0	-105	6.3	4.41
7	24.11.2001	05:56	22.11.2001	23:30:05	1437	-12.9	360	halo	56.9	1040	8.3	-221	9.2	3.19
8	20.03.2002	13:28	18.03.2002	02:54:06	989	-2.9	360	halo	20.1	576	4.3	-14	4.4	2.55
9	26.07.2004	22:49	25.07.2004	14:54:05	1333	7.0	360	halo	26.1	1027	8.7	-197	13.5	2.60
10	09.07.2006	21:36	06.07.2006	08:54:04	911	8.2	360	halo	9.7	433	3.3	-23	4.5	1.95
11	14.12.2006	14:14	13.12.2006	02:54:04	1774	-61.4	360	halo	17.9	896	8.3	-146	8.6	4.35

**Πίνακας 6.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush και ανατολικών πηγών

a/a	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>chy</sub> max (%)
1	13.07.1978	00:15							13.4	442	4.3	-11	5.0	1.79
2	06.06.1979	19:27							54.4	655	7.0	-40	7.0	1.79
3	01.03.1981	07:37							15.4	531	5.0	-58	4.8	1.63
4	24.04.1982	20:16							23.0	675	6.7	-78	5.2	2.57
5	09.06.1982	00:40							30.7	521	6.3	-66	5.4	2.36
6	13.07.1982	16:17							44.3	986	9.0	-325	19.8	4.71
7	27.12.1982	07:15							-	-	4.7	-26	4.2	1.79
8	11.04.1989	14:35							21.5	440	4.3	-56	4.4	2.24
9	04.09.1989	00:27							-	-	6.0	-71	7.2	2.91
10	31.05.1991	10:39							20.0	665	7.3	-84	6.6	2.39
11	26.02.1992	16:57							-	-	8.0	-193	9.7	2.31
12	27.08.2001	19:52	25.08.2001	16:50:05	1443	-46.8	360	halo	19.5	576	4.7	-24	6.5	4.29
13	25.09.2001	20:25	24.09.2001	10:30:59	2402	54.1	360	halo	26.1	677	7.3	-102	8.3	1.84
14	07.09.2002	16:36	05.09.2002	16:54:06	1748	43.0	360	halo	22.9	550	7.3	-170	4.6	1.64
15	13.09.2004	20:03	12.09.2004	00:36:06	1328	22.5	360	halo	25.1	603	5.3	-50	5.0	2.60

**Πίνακας 7.** Κύριες παράμετροι για τα γεγονότα μεγάλων μειώσεων Forbush και κεντρικών πηγών

a/a	SSC		CME						Διαπλανητικές παράμετροι		Γεωμαγνητικές παράμετροι		Ένταση κοσμικής ακτινοβολίας	
	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ημερομηνία (DD.MM.YYYY)	Ώρα (UT)	Ταχύτητα (km s <sup>-1</sup> )	Επιτάχυνση (m s <sup>-2</sup> )	Εύρος (deg)	Central PA (deg)	IMF <sub>max</sub> (nT)	Ταχύτητα HA max (km s <sup>-1</sup> )	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> (nT)	Πλάτος FD (%)	A <sub>chy</sub> max (%)
1	03.01.1978	20:42							17.9	756	7.3	-121	4.2	3.04
2	10.04.1978	13:06							-	662	7.7	-114	5.4	3.13
3	25.06.1978	08:25							26.1	573	5.7	-77	6.9	2.83
4	25.07.1980	11:11							16.0	503	7.0	-88	4.9	1.97
5	06.08.1982	18:36							21.7	639	7.7	-155	4.8	1.71
6	04.02.1983	16:15							-	-	8.0	-183	7.5	3.06
7	04.01.1988	20:12							-	-	5.3	-41	4.7	4.25
8	13.01.1988	23:30							31.1	760	7.3	-147	4.9	1.69
9	30.06.1991	01:16							-	-	4.3	-55	4.7	2.97
10	08.07.1991	16:36							32.5	747	8.0	-194	10.5	4.45
11	08.06.2000	09:10	06.06.2000	15:54:05	1119	1.5	360	halo	24.9	774	7.0	-90	7.6	3.00
12	11.10.2001	17:01	09.10.2001	11:30:05	973	-41.5	360	halo	26.5	571	6.0	-71	7.0	3.81
13	06.11.2001	01:52	04.11.2001	16:35:06	1810	-63.4	360	halo	65.6	729	8.7	-292	12.4	4.00
14	17.04.2002	11:07	15.04.2002	03:50:05	720	2.1	360	halo	30.4	611	7.3	-126	6.2	3.01
15	18.08.2002	18:46	16.08.2002	12:30:05	1585	-67.1	360	halo	14.3	573	5.3	-58	4.7	2.5
16	29.05.2003	12:24	27.05.2003	23:50:05	964	-9.6	360	halo	28.4	764	8.3	-131	7.7	1.57
17	20.11.2003	08:03	18.11.2003	08:06:05	1223	37.8	104	144	55.8	703	8.7	-472	4.7	2.65
18	22.01.2004	01:37	19.01.2004	-	-	-	-	-	25.4	666	7.0	-149	8.6	4.32
19	05.12.2004	07:46	02.12.2004	00:26:05	1216	-19.8	360	halo	34.6	457	4.3	-67	4.6	1.68
20	15.05.2005	02:38	13.05.2005	17:12:05	1689	-	360	halo	54.2	959	8.3	-263	9.5	2.53

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

### ❖ Σε Διεθνή Περιοδικά με Κριτές

1. Πετρόπουλος, Β., Μαυρομιχαλάκη, Ε., Παπαηλιού, Μ., Κελεσιδής, Κ.Μ., Μερτζάνος, Γ.Α.: ‘Μελέτη των ρυθμών της καρδιάς σε σχέση με την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας’, Πρακτικά Ακαδημίας Αθηνών, Μάρτιος 2006
2. Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Mariatos, G., Papailiou, M., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Stassinopoulos, E.G.: ‘Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity’, IEEE TNS, 1089 – 1096, 2007
3. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Vassilaki, A., Kelesidis, K.M., Mertzanos, G.A., Petropoulos, B.: ‘Cosmic ray variations of solar origin in relation to human physiological state during the December 2006 solar extreme events’, Advances in Space Research, 43, 523 – 529, 2009
4. Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Mariatos, G., Papailiou, M., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, C.: ‘Athens Neutron Monitor Data Processing Centre – ANMODAP Centre, Advances in Space Research, 44, 1237 – 1246, 2009
5. Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Papailiou, M., Eroshenko, E., Belov, A., Yanke, V. and the NMDB team: ‘Applications and usage of the real – time Neutron Monitor database’, Advances in Space Research, 47, 2210 – 2222, 2011
6. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: ‘Effect of geomagnetic disturbances on physiological parameters: An investigation on aviators’, Advances in Space Research, 48, 1545 – 1550, 2011
7. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.,

Giannaropoulou, E.: ‘The effect of cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators’, *Astrophysics and Space Sciences Transactions (ASTRA)*, 7, 373 – 377, 2011

8. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: ‘Precursor effects in different cases of Forbush decreases’, *Solar Physics*, 276, 337 – 350, 2012

9. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: ‘Cosmic radiation influence on the physiological state of aviators’, *Natural Hazards*, 61, 719 – 727, 2012

10. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: ‘The asymptotic longitudinal cosmic ray intensity distribution as precursor for Forbush decreases’, *Solar Physics*, 280, 641 – 650, 2012

11. Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Loucas, P.: ‘Space weather hazards and their impact on human cardio-health state parameters on Earth’, *Natural Hazards*, 64, 1447 – 1459, 2012

12. Papailiou, M., Abunina, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Kryakunova, O.: ‘Forbush decreases associated with western solar sources and geomagnetic storms: A study on precursors’, *Solar Physics*, 283, 557 – 563, 2013

#### ❖ Σε Πρακτικά Συνεδρίων με Κριτές

1. Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mustafa, F.R.: ‘Geomagnetic disturbances and cosmic rays variations in relation to human cardio-health state: a wide collaboration’, *ECRS 2008*, 351 – 356, 2008

2. Belov, A., Dryn, E., Eroshenko, E., Kryakunova, O., Oleneva, V., Yanke, V., Papailiou, M.: ‘Behaviour of the cosmic ray vector anisotropy near interplanetary shocks’, *ECRS 2008*, 347 – 350, 2008

3. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiartova, J., Dimitrova, S.: ‘Physiological state of Slovak aviators in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray intensity variations’, 31<sup>st</sup> ICRC, icrc0673, 2009
4. Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mavromichalaki, H.: ‘Analysis of changes of cardiological parameters at middle latitude region in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray variations’, AIP Conf. Proc., 1203, 748 – 753, 2010
5. Papailiou, M., Abunina, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: ‘Precursors of Forbush decreases connected to western solar sources and geomagnetic storms’, Journal of Physics, 2013

#### ❖ Σε Πρακτικά Συνεδρίων

1. Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Mariatos, G., Papailiou, M., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V., Stassinopoulos, E.G.: ‘Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity’, RADECS Workshop, 267 – 270, 2006
2. Πετρόπουλος, Β., Μαυρομιχαλάκη, Ε., Παπαηλιού, Μ., Κελεσιδης, Κ.Μ., Μερτζάνος, Γ.Α.: ‘Πρόσφατες γεωμαγνητικές μεταβολές ηλιακής φύσης σε σχέση με ανθρώπινες φυσιολογικές παραμέτρους’, 10<sup>ο</sup> Κοινό Συνέδριο Ελλήνων και Κυπρίων Φυσικών, 2007
3. Παπαϊωάννου, Α., Πλαϊνιάκη, Χ., Παπαηλιού, Μ., Γεροντίδου, Μ., Μαυρομιχαλάκη, Ε.: ‘Επίδραση Κοσμικών Ακτινοβολιών στο Διαστημικό Περιβάλλον’, 10<sup>ο</sup> Κοινό Συνέδριο Ελλήνων και Κυπρίων Φυσικών, 2007
4. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kelesidis, K.M., Mertzanos, G.A., Petropoulos, B.: ‘Spatial anisotropy of the cosmic ray intensity in relation to the heart rate variability’, 8<sup>th</sup> Hellenic Astronomical Conference, 2007

5. Mavromichalaki, H., Gerontidou, M., Plainaki, C., Papaioannou, A., Mariatos, G., Papailiou, M., Sarlanis, C., Souvatzoglou, C.: 'Real-time cosmic ray monitoring and analysis of GLE70 from the Athens Neutron Monitor Data Processing Center', 8<sup>th</sup> Hellenic Astronomical Conference, 2007
6. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Vassilaki, A., Kelesidis, K.M., Mertzanos, G.A., Petropoulos, B.: 'Geomagnetic variations of solar origin in relation to human physiological parameters during December 2006', Solar Extreme Events 2007 International Symposium, 97 – 103, 2007
7. Παπαηλιού, Μ., Λουκάς, Π., Μαυρομιχαλάκη, Ε., Dimitrova, S., Babayev, E.S.: 'Επίδραση γεωμαγνητικών μεταβολών και μεταβολών της έντασης κοσμικής ακτινοβολίας στην φυσιολογική λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού: Πειραματικά αποτελέσματα από το Μπακού', 13<sup>ο</sup> Συνέδριο Ένωσης Ελλήνων Φυσικών, ISBN 978-960-9457-00-2, Αρ. Εργασίας: 170, Αρ. Σελίδων: 9, 2010
8. Giannaropoulou, E., Papailiou, M., Tshipis, A., Mavromichalaki, H.: 'Analysis of geomagnetic disturbances and cosmic ray intensity variations in relation to medical data from Rome', Proc. 9<sup>th</sup> Hellenic Astronomical Conference, 88 – 89, 2010
9. Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Plainaki, C., Papailiou, M., Mariatos, G. and the NMDB team: 'Establishing and using the real-time Neutron Monitor Datadase (NMDB)', Bibliographic Code: 2010ASPC..424...75M
10. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Giannaropoulou, E., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: 'Cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators', 22<sup>nd</sup> ECRS, 160, 2010
11. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: 'The asymptotic longitudinal cosmic ray intensity distribution as precursor for Forbush decreases', 13<sup>th</sup> European Solar Physics Meeting, 2011

12. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S.: ‘Space weather and human health: An investigation on aviators’, 39<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, PSW.3-STW-C-114, 2012

13. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Abunina, M., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: ‘Precursors of Forbush decreases connected to western solar sources and geomagnetic storms’, 23<sup>rd</sup> ECRS, ecrs\_sh\_529, 2012

14. Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S., Katsavrias, C.: ‘The potential effect of cosmic ray intensity variations on human cardiovascular functionality’, Book of abstracts of the international conference ‘Space Weather Effects on Humans: in Space and on Earth’, P.35, page 152, 2012

# Precursor Effects in Different Cases of Forbush Decreases

M. Papailiou · H. Mavromichalaki · A. Belov ·  
E. Eroshenko · V. Yanke

Received: 19 September 2011 / Accepted: 20 October 2011 / Published online: 30 November 2011  
© Springer Science+Business Media B.V. 2011

**Abstract** Over the last few years, the pre-decreases or pre-increases of the cosmic-ray intensity observed before a Forbush decrease, called the precursor effect and registered by the worldwide neutron monitor network, have been investigated for different cases of intense events. The Forbush decreases presented in this particular study were chosen from a list of events that occurred in the time period 1967–2006 and were characterized by an enhanced first harmonic of cosmic-ray anisotropy prior to the interplanetary disturbance arrival. The asymptotic longitudinal cosmic-ray distribution diagrams for the events under consideration were studied using the “Ring of Stations” method, and data on solar flares, solar-wind speed, geomagnetic indices, and interplanetary magnetic field were analyzed in detail. The results revealed that the use of this method allowed the selection of a large number of events with well-defined precursors, which could be separated into at least three categories, according to duration and longitudinal zone. Finally, this analysis showed that the first harmonic of cosmic-ray anisotropy could serve as an adequate tool in the search for precursors and could also be evidence for them.

**Keywords** Cosmic rays · Forbush decreases · Neutron monitors · Precursors

## 1. Introduction

Galactic cosmic rays (CRs) interact with transient disturbances moving from the Sun, and in this way they transfer information about the oncoming disturbance before it reaches the Earth. These disturbances, especially those associated with sporadic sources (solar flares or filament disappearance), create perturbations in the magnetosphere which can cause a storm

---

M. Papailiou · H. Mavromichalaki (✉)  
Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, National and Kapodistrian University  
of Athens, Zografos, 15771 Athens, Greece  
e-mail: [emavromi@phys.uoa.gr](mailto:emavromi@phys.uoa.gr)

A. Belov · E. Eroshenko · V. Yanke  
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN),  
Troitsk, Moscow region, Russia

in the geomagnetic field. Geomagnetic storms are often followed by CR-intensity decreases, known as Forbush effects (FEs), which are created by this disturbance in the heliosphere (Forbush, 1958; Lockwood, 1971; Cane, 2000).

Unlike in quiet periods, before the Forbush decrease (FD) anomalies in the CR intensity distribution, such as pre-increases or pre-decreases, along with changes in the anisotropy are noticed. These anomalies in the CR variations were recognized a long time ago (Fenton *et al.*, 1959; Blokh, Dorman, and Kaminer, 1959), but over the last few years this particular subject has been intensively investigated (Nagashima *et al.*, 1993; Belov *et al.*, 1995; Belov *et al.*, 2001; Leerunnavarat, Ruffolo, and Bieber, 2003; Munakata *et al.*, 2005; Asipenka *et al.*, 2009). The above-mentioned changes in the behavior of the galactic CRs are observed from one hour up to 20 hours before the shock arrival (Belov *et al.* 1995, 2001) and can be used to forecast the oncoming disturbance and the geomagnetic storm.

Although precursors have been investigated for a long time and intensively, their discrimination remains a complex issue. As a result, clear and convincing examples of such phenomena are not often published, and the most characteristic of them appear repeatedly in many articles. One of the goals of this work is to determine a method for analyzing the data of neutron monitors in order to study new events with obvious CR precursors and thus increase the number of the aforementioned examples.

The pre-increases and pre-decreases can be explained as kinetic interactions of the CR particles with the approaching shock and ejecta or the region behind the shock (Ruffolo *et al.*, 1999; Leerunnavarat, Ruffolo, and Bieber, 2003; Asipenka *et al.*, 2009). Moreover, precursor decreases apparently result from a “loss cone” effect, in which the neutron monitor station is magnetically connected to the CR-depleted region downstream of the shock (Belov *et al.*, 1995; Leerunnavarat, Ruffolo, and Bieber, 2003). On the other hand, precursor increases are caused by galactic-CR acceleration at the front of the advancing disturbance, as the particles are being reflected from the approaching shock (Belov *et al.*, 1995; Dorman, Iucci, and Villonesi, 1995).

Most of the predictors have a peculiar longitude (or pitch angle) dependence of CR intensity with the abrupt transfer from minimum to maximum of CR variations which cannot be fitted by the sum of only the first two harmonics. These sharp changes probably occur within the  $140^{\circ}$ – $180^{\circ}$  and  $270^{\circ}$ – $310^{\circ}$  longitude regions, near the usual direction of the interplanetary magnetic field (IMF) line (sunward and anti-sunward). These anomalies are usually observed in the last hours before the shock arrival, typically within four hours; however, they sometimes cover a longer period. The neutron-monitor network is a good tool for detecting such anomalies in the pitch angle or longitudinal distribution of CR variations. In recent years, searching for predictors by muon-telescope data has also been developed rather successfully (Munakata *et al.* 2000, 2005, 2006; Kudela and Storini, 2006).

One approach to display the possible precursor effects is the “Ring of Stations” method based on the asymptotic angle distribution of the CR variations which has been used in many studies. In particular, it has been used to describe the bright example of the precursor for the event in September 1992, which is mentioned in many research papers (Belov *et al.*, 1995; Munakata *et al.*, 2000; Belov *et al.*, 2003; Asipenka *et al.*, 2009). It is also used as an application in the high-resolution Real-Time Neutron Monitor Database (NMDB) for real-time construction of the CR angle distribution (see <http://www.nmdb.eu/?q=node/19> or <http://cr0.izmiran.ru/PrecursorMonitoring/index.htm>).

At the Bartol Research Institute, the system of real-time monitoring of the precursors is created on the basis of pitch-angle CR distribution (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/>). A limited number of stations are used and are homogeneously distributed according to longitude (Spaceship Earth). The efficiency of the system is satisfactory, but

it depends on the operational reliability of the station (a break at one station creates a gap in the scanning of  $\approx 50^\circ$  of the celestial sphere) and on the constant flow of the IMF data which are used for the pitch angle calculations.

As was shown by Belov *et al.* (2003), the observed longitudinal distribution of the CR variations before the shock cannot be described by the changes of low-order harmonics. Nevertheless, it is clear that changes of these harmonics during this time period should also exist. In a recent work, Belov *et al.* (2008) calculated the average value of the first harmonic of the CR anisotropy using 1529 FEs and clearly showed that it increases before the shock arrival. For this reason, the cases which were analyzed in this work were chosen from a large list of events where the essential increase of the equatorial component of the first harmonic of CR anisotropy [ $A_{xy}$ ] was observed for at least one hour before the shock arrival.

In this study, different FDs that occurred in the time period 1967–2006 and presented similar precursor effects have been analyzed. The article consists of a description of the data and the applied method (Section 2) and a discussion on the results obtained for three groups of FE precursors: clear pre-decrease for almost 24 hours before the shock arrival; pre-increase of about 12 hours; and pre-decrease lasting sometimes less than 12 hours until the shock arrival is observed (Section 3). The conclusions are presented in Section 4.

## 2. Data and Method

Hourly values of the CR density and anisotropy, obtained from the neutron-monitor network, were combined with solar, interplanetary, and geomagnetic parameters in the database of the interplanetary disturbances and FEs created at the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN; Belov, 2008). This database of FEs currently includes about 6000 events over the period 1957–2010 and allows the selection of events with regard to different parameters and various statistical estimations.

Using the global survey method (GSM), the density and first harmonic of anisotropy for the CR of rigidity 10 GV have been calculated (Belov *et al.*, 2005; Asipenka *et al.*, 2009) and entered into this database. Solar-wind parameters and geomagnetic indices were obtained from the OMNI database (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

For studying the precursor effects in different Forbush events, the “Ring of Stations” (RS) method has been applied (Belov *et al.*, 1995, 2003; Asipenka *et al.*, 2009) to the hourly data of CR intensity recorded by the neutron-monitor stations of the worldwide network with cutoff rigidity  $R_c < 4$  GV and latitudes  $< 70^\circ$ . A list of the stations used in the RS method is presented in Table 1.

This method calculates the hourly values of CR-intensity variations at each station relative to a fixed period and then plots it according to the asymptotic longitude of the station at that moment. The precursor effect is very anisotropic; thus, the sky coverage in the asymptotic directions of the stations used should be as full as possible. Using as many neutron monitors as possible, temporal variations of CR intensity distributed in space by asymptotic directions are depicted.

The pitch-angle distribution method is more tightly connected to the model of pre-decreases caused by the “loss cone,” but the asymptotic longitudinal dependence method has its own advantages: *i*) it provides the real longitudinal distribution of CR intensity, *ii*) it depends less on the uncertainties of the model of the isotropic and anisotropic variations, and *iii*) it does not depend on the IMF measurements (Belov *et al.*, 1995; Asipenka *et al.*, 2009). In addition, the IMF measurements have a local character, whereas CRs reflect an influence of space.



**Table 1** List of the neutron monitor stations used in the “Ring of Stations” method.

	NM Station	Abbrev.	Latitude [deg.]	Longitude [deg.]	$R_c$ [GV]	Altitude [m]
1	Apatity	APTY	67.55	33.33	0.65	177
2	Calgary	CALG	51.08	-114.13	1.08	1128
3	Cape Schmidt	CAPS	68.92	-179.47	0.45	0
4	Climax	CLMX	39.37	-106.18	2.93	3400
5	Deep River	DPRV	46.10	-77.50	1.25	145
6	Durham	DRHM	43.10	-70.83	1.76	0
7	Fort Smith	FRSM	60.02	-112.00	0.30	0
8	Goose Bay	GSBY	53.27	-60.40	0.74	46
9	Inuvik	INVK	68.35	-133.72	0.14	21
10	Irkutsk	IRKT	52.47	104.02	3.66	433
11	Kerguelen	KERG	-49.35	70.25	1.14	33
12	Kiel	KIEL	54.33	10.11	2.29	54
13	Kiev	KIEV	50.72	30.30	3.39	120
14	Kingston	KGSN	-42.99	147.29	1.82	65
15	Larc	LARC	-62.20	-58.96	3.01	40
16	Lomnický Stit	LMKS	49.20	20.22	4.00	2634
17	Magadan	MGDN	60.12	151.02	2.10	0
18	Mawson	MWSN	-67.60	62.88	0.15	0
19	Moscow	MOSC	55.47	37.32	2.46	200
20	Mt. Washington	MTWS	44.30	288.70	1.58	1909
21	Mt. Wellington	MTWL	-42.92	147.24	1.83	725
22	Nain	NAIN	56.55	-61.68	0.40	0
23	Newark	NWRK	39.68	-75.75	1.97	50
24	Norilsk	NRLK	69.26	88.05	0.63	0
25	Novosibirsk	NVBK	54.80	83.00	2.91	163
26	Oulu	OULU	65.02	25.50	0.81	15
27	Peawanuck	PWNK	54.98	-85.44	0.50	0
28	Sanae	SNAE	-71.67	-2.85	0.86	856
29	Terre Adelie	TERA	-66.65	140.00	0.00	32
30	Tixie Bay	TXBY	71.60	128.90	0.53	0
31	Yakutsk	YTKK	62.02	129.73	1.70	105

For this particular work, Forbush decreases (FDs) through the time period 1967–2006 with anisotropy  $A_{xy} > 1.2\%$  were selected (93 events in total). Usually this anisotropy has a value  $< 0.6\%$ . The chosen anisotropy can be considered as anomalous, since it exceeds the mean statistical value significantly. As was shown by Belov *et al.* (2008), the events with  $A_{xy}$  before the shock greater than 1.1% are distinguished by deeper FDs and higher values of anisotropy. In this study, 27 different FDs, from the group of 93 events, were chosen to be analyzed and are presented on the basis of their common behavior in the asymptotic longitudinal CR distribution diagrams.

**Table 2** Main interplanetary parameters for the events of the first group.

Events	Solar flares	Heliographic Latitude/longitude	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> [nT]	IMF <sub>max</sub> [nT]	Solar wind speed max [km s <sup>-1</sup> ]	FD amplitude [%]	A <sub>xy</sub> min [%]
24 June 1980	M2.3	S12E17	3.7	-18	14.0	453	> 3	2.62
28 October 2000	C4.0	N10W66	6.0	-113	18.8	415	8	3.49
17 August 2001	C2.3	N26W10	7.0	-105	32.1	599	6	4.41
23 April 2002	X1.5	S14W84	6.0	-56	15.1	593	2	1.49
10 May 2002	M1.4	S08E28	4.0	-11	10.8	421	2	1.96

### 3. Results

After the analysis and a careful study of the asymptotic longitudinal diagrams were performed, the aforementioned events were distributed into three categories: The first group, for which a pre-decrease in the longitudinal zone 90°–180° was noticed almost 24 hours before the shock arrival, includes five events (24 June 1980, 28 October 2000, 17 August 2001, 23 April 2002, and 10 May 2002). The second group, for which the precursor effect is a pre-increase in the longitudinal zone around and above 180° and lasts almost 12 hours until the FD, includes 14 events (3 January 1978, 13 July 1978, 11 January 1980, 30 March 1980, 25 July 1980, 11 December 1980, 2 October 1981, 10 October 1988, 9 September 1992, 26 August 1998, 20 February 2000, 25 September 2001, 7 September 2002, 9 July 2006), and the third group, for which a pre-decrease in different longitudes and of different duration in every case is observed, includes eight events (8 September 1981, 16 April 1982, 4 March 1995, 10 August 1998, 18 October 1998, 15 September 2000, 3 August 2001, 25 August 2002).

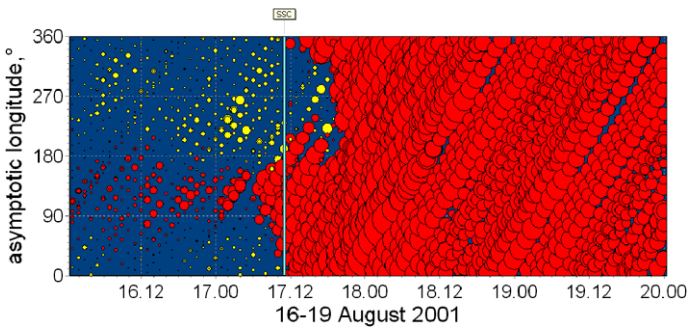
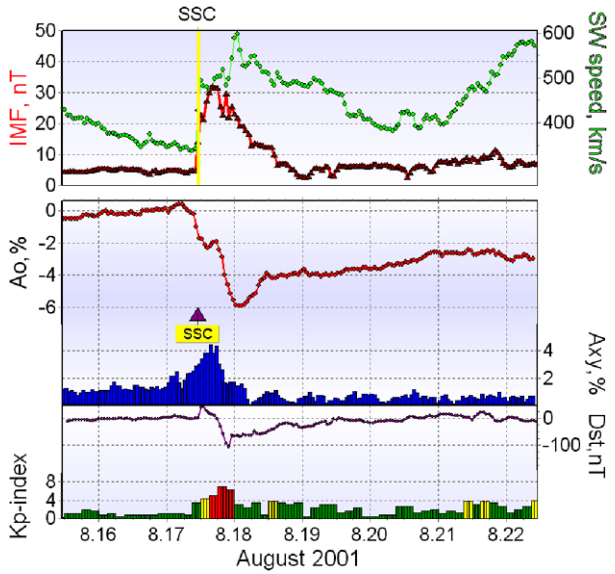
A short description of the relevant interplanetary disturbances and the longitude–time distribution of CR variations for some of the aforementioned events are presented below.

#### 3.1. Forbush Decreases with a Long Pre-decrease in a Narrow Longitudinal Zone

The values of the geomagnetic indices Kp and Dst connected to the FDs of this group, along with other interplanetary parameters, are presented in Table 2. A firm conclusion about the sources cannot yet be drawn because of the limited number of events analyzed (two events are connected to western sources, two with eastern, and only one with a solar flare that belongs to the central heliolongitudinal sector). However, it is safe to say that, for the majority of the events, an increase of the IMF intensity and the solar-wind speed is observed. Moreover, moderate or strong geomagnetic storms seem to precede the aforementioned FDs.

In particular, for the event on 17 August 2001, a strong increase of the IMF intensity (23.6 nT) and of the solar-wind speed ( $\approx 600$  km s<sup>-1</sup>) resulted in the strong sudden storm commencement (SSC) that was recorded on 17 August 2001 at 11:03 UT (Figure 1, upper panel). The two-step FD recorded on 17–18 August 2001 (Figure 1, middle panel) was almost 6% and was followed by a significant increase of CR solar diurnal anisotropy. The associated C2.3 flare (N26W10) was recorded on 14 August 2001 at 11:30 UT and belongs to the central heliolongitudinal sector. Geomagnetic indices Kp and Dst during this event were 7 and -107 nT respectively (strong magnetic storm) as can be seen in Figure 1 (bottom panel).

**Figure 1** Variations of the interplanetary magnetic field and solar-wind speed (upper panel), cosmic ray intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 17 August 2001. The horizontal axis refers to MM.DD.



**Figure 2** The longitude–time distribution of the event on 17 August 2001. The horizontal axis refers to DD.HH.

The CR event described above was also depicted using the asymptotic longitudinal CR distribution in order to examine and determine the existence of precursors for the event (Figure 2).

The asymptotic longitudinal CR distribution diagrams were obtained using 31 neutron-monitor stations. This number of stations covers essentially all of the asymptotic longitudes and guarantees that data from as many longitudes of arrival as possible are obtained at every moment. Each station rotates with the Earth and thus scans a complete circle of longitudes during a day. Clearly, a more complete picture of the whole celestial sphere is obtained when at any moment a sufficient number of stations looking toward different asymptotic directions is used.

An example of a longitude–time distribution of CR variations as measured by different neutron monitors for a specific event is shown in Figure 2. In this figure the red circles stand for decreases of CR intensity, while yellow circles depict increases of CR intensity, relative to a quiet fixed period, as measured for all neutron-monitor stations used in the RS method. The size of the circle is proportional to the size of the variation. The vertical line denotes the

**Table 3** Main interplanetary parameters for the events of the second group.

Events	Solar flares	Heliographic Latitude/longitude	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> [nT]	IMF <sub>max</sub> [nT]	Solar wind speed max [km s <sup>-1</sup> ]	FD amplitude [%]	A <sub>xy</sub> min [%]
03 January 1978	M3.0	S18E05	7.3	-121	17.9	756	4	2.97
13 July 1978	X3.0	N18E58	4.3	-11	13.4	442	> 4	2.62
11 January 1980	X1.0	S11E29	3.0	-20	11.1	442	2	1.51
30 March 1980	C6.0	N14E52	4.0	-39	11.9	397	< 2	2.25
25 July 1980	M8.9	S17E13	7.0	-88	16.0	503	> 4	1.97
11 December 1980	C3.0	N50W08	4.7	-27	18.0	640	4	3.30
02 October 1981	C7.6	S16E47	6.3	-50	19.4	710	> 3	2.65
10 October 1988	M3.3	S23W36	7.7	-156	27.4	-	> 2	2.17
09 September 1992	M1.3	S13W32	7.3	-135	25.0	589	> 4	4.10
26 August 1998	X1.0	N35E09	8.0	-188	18.9	847	8	4.85
20 February 2000	M1.3	S29E07	4.7	-20	16.9	455	2	2.45
25 September 2001	X2.6	S16E23	7.3	-102	26.1	677	8	1.84
07 September 2002	C5.2	N09E28	7.3	-170	22.9	550	5	1.64
09 July 2006	M2.5	S09W34	3.3	0	9.7	433	4	1.95

time at which the shock was registered, which is usually the onset of the FDs, when the CR intensity is reduced at all neutron-monitor stations, as is shown in Figure 2.

Interestingly, for the first group of events, a long and narrow pre-decrease is noticed for all stations with asymptotic longitudes from 90° until 180° (Figure 2). In reality, the pre-decrease of these events seems to be about 20°–30° narrower in space. This happens because neutron monitors record particles within a wide enough range of longitudes so that the observed effect appears wider than it really is. As can be seen in Figure 2, the pre-decrease appears up to 24 hours before the events (Papailiou *et al.*, 2011). However, a pre-increase is also noticed for eastern directions, from 180° until 360° (Figure 2).

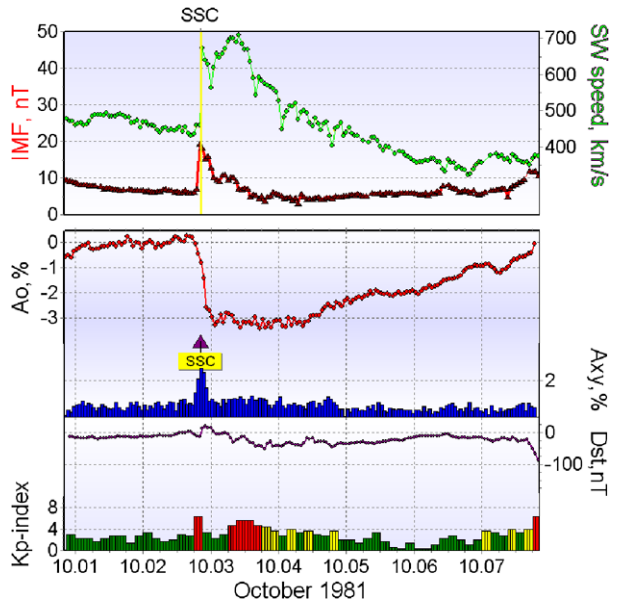
### 3.2. Forbush Decreases with a Pre-increase Above 180°

The heliographic coordinates of the solar flares connected to these FDs along with other interplanetary parameters are presented in Table 3. Clearly, the events under examination are mostly connected to central or eastern sources and in most cases are associated with geomagnetic storms (moderate, strong, or severe). Moreover, for some events of this group an increase of the IMF intensity was measured.

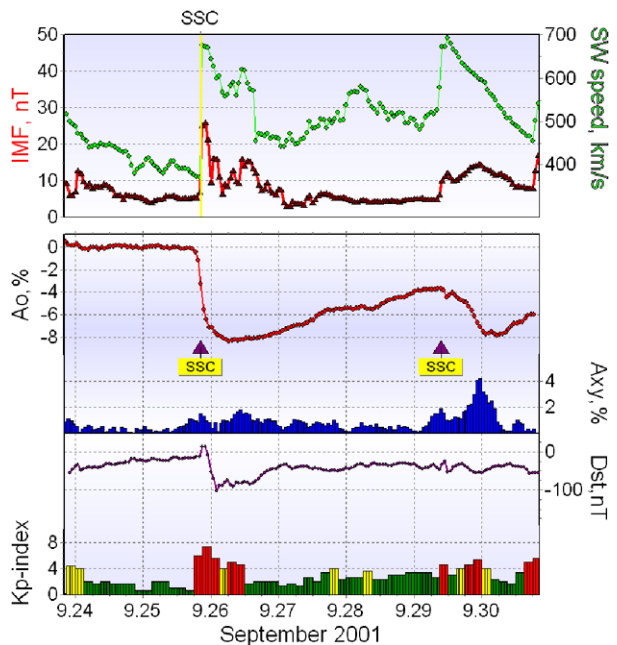
A strong increase in the solar-wind speed of up to 710 km s<sup>-1</sup> and in the IMF intensity of up to 19.4 nT was observed, and a strong shock was recorded on 2 October 1981 at 20:22 UT (Figure 3, upper panel). The steep CR intensity decrease was almost 3% (Figure 3, middle panel) and was associated with an eastern C7.6 flare recorded on 30 September 1981 at 05:11 UT. During this event a moderate geomagnetic storm was recorded (Kp<sub>max</sub> = 6.3 and Dst<sub>min</sub> = -50 nT), as can be seen from Figure 3 (bottom panel).

Another example is the FD on 25 September 2001. A strong increase of the IMF intensity and of the solar-wind speed (26.1 nT and 677 km s<sup>-1</sup> respectively) caused the strong SSC which was recorded on 25 September 2001 at 20:25 UT (Figure 4, upper panel). The FD recorded on 25–26 September 2001 (Figure 4, middle panel) was almost 8%. The associated X2.6 flare (S16E23) was recorded on 24 September 2001 at 09:32 UT. Geomagnetic indices

**Figure 3** Variations of the interplanetary magnetic field and solar-wind speed (upper panel), cosmic ray intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 2 October 1981. The horizontal axis refers to MM.DD.



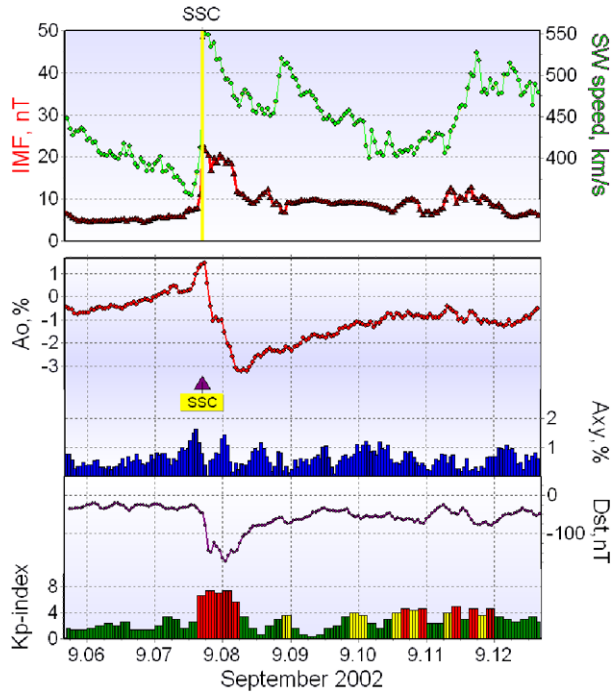
**Figure 4** Variations of the interplanetary magnetic field and solar-wind speed (upper panel), cosmic ray intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 25 September 2001. The horizontal axis refers to MM.DD.



Kp and Dst during this event were 7.3 and  $-102$  nT respectively (strong magnetic storm), as can be seen in Figure 4 (bottom panel).

Finally, for the event on 7 September 2002, a jump in the IMF intensity ( $22.9$  nT) and the solar-wind speed ( $550$  km s $^{-1}$ ) resulted in a strong SSC registered on 7 September 2002 at 16:36 UT (Figure 5, upper panel). As is shown in Figure 5 (middle panel), CR intensity

**Figure 5** Variations of the interplanetary magnetic field and solar-wind speed (upper panel), cosmic-ray intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 7 September 2002. The horizontal axis refers to MM.DD.



decreased  $\approx 5\%$ , and a strong magnetic storm (geomagnetic indices Dst and Kp reached the values of  $-170$  nT and 7.3 respectively) occurred (Figure 5, bottom panel). The flare connected with this event was eastern (N09E28) of class C5.2 and occurred on 5 September 2002 at 16:18 UT.

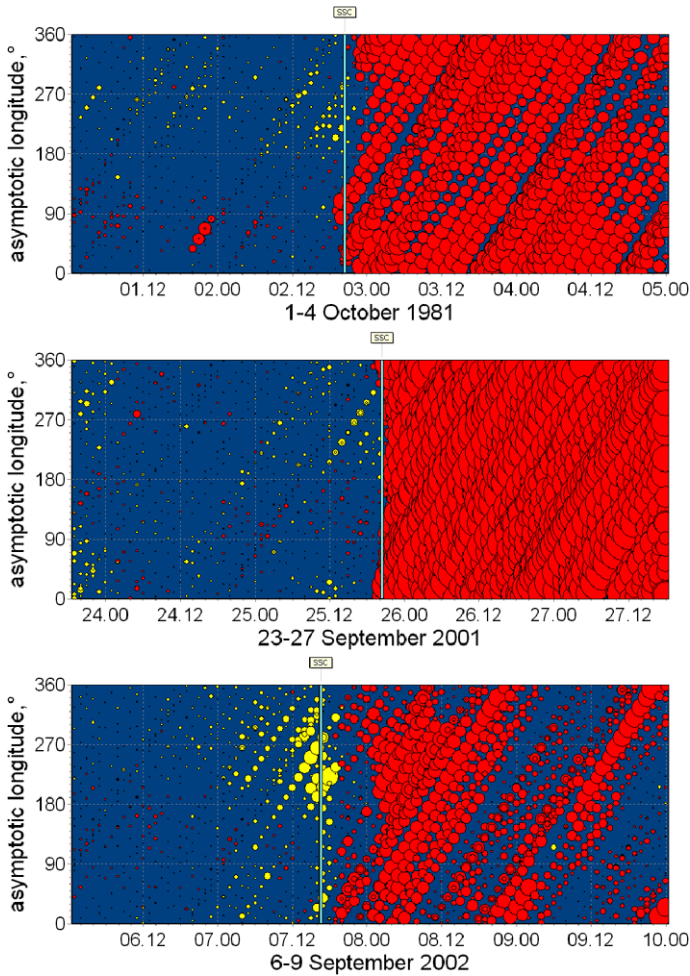
For this second group of events, a pre-increase was registered at the stations with asymptotic longitudes above  $180^\circ$  until  $360^\circ$ . As is seen in Figure 6, the pre-increase is recorded a few hours and up to almost 12 hours before the shock arrival. However, for the event on 25 July 1980 the pre-increase lasts for almost 24 hours. In most cases the pre-increase is accompanied by a pre-decrease in lower longitudes (below  $180^\circ$ ), lasting only a few hours before the event.

### 3.3. Forbush Decreases with a Pre-decrease of Varying Duration

The most important parameters describing the interplanetary conditions for the events of this category are presented in Table 4. As is shown, these decreases are not connected to strong geomagnetic activity.

Specifically for the event on 8 September 1981, the SSC was registered on 8 September 1981 at 21:46 UT after a small increase of the IMF intensity ( $\approx 14.7$  nT) and of the solar wind speed ( $\approx 450$  km s $^{-1}$ ), as is shown in Figure 7 (upper panel). The CR intensity decreased  $\approx 2\%$  (Figure 7, middle panel), and the geomagnetic activity was not that high, since the geomagnetic indices Kp and Dst were 4.3 and  $-12$  nT respectively (Figure 7, bottom panel). The solar flare associated with this event was central (S13E16) and of class M7.4, which occurred on 3 September 1981 at 10:57 UT.

During the event on 25 August 2002, the CR intensity decrease did not exceed 2% (Figure 8, upper panel). The shock registered on 25 August 2002 at 22:00 UT was weak, and



**Figure 6** The longitude–time distribution of the events on 2 October 1981, 25 September 2001, and 7 September 2002. The horizontal axis refers to DD.HH.

the values of the solar-wind speed and the IMF intensity were low ( $336 \text{ km s}^{-1}$  and  $9.4 \text{ nT}$  respectively). Moreover, the geomagnetic activity was also low (maximum  $K_p$  index was 3.3 and minimum Dst index was  $-7 \text{ nT}$ ), as is shown in Figure 8 (bottom panel).

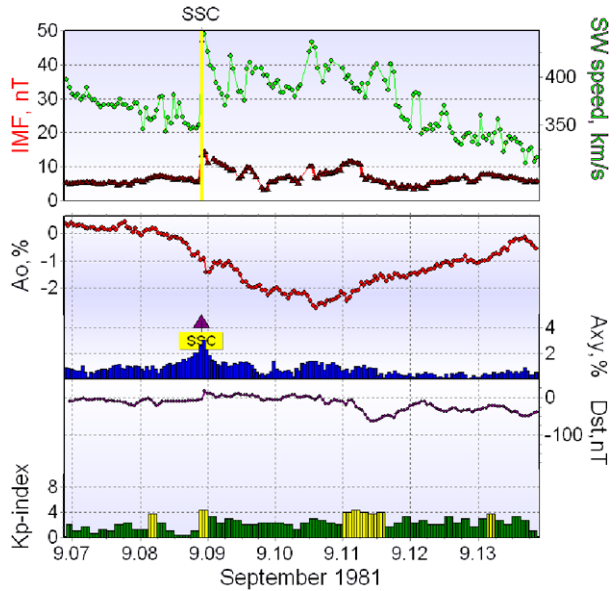
Figure 9 is an example of the asymptotic longitudinal distribution for the FDs mentioned above. As already mentioned, in this category the precursor effect is a pre-decrease in different longitudes, sometimes above  $180^\circ$  and with different duration. For example, the pre-decrease for the FDs on 8 September 1981 (Figure 9, upper panel), 18 October 1998, and 3 August 2001 lasts almost 24 hours until the shock arrival, whereas the pre-decrease for the decrease on 25 August 2002 (Figure 9, bottom panel) lasts 12 hours until the SSC, and that for the event on 15 September 2000 even less.

As was shown by Belov *et al.* (2008), the magnitude of the CR anisotropy is statistically connected to the magnitude of the evolving FEs and the anisotropy inside these FEs, as is seen in Tables 2, 3, and 4 for the events under consideration.

**Table 4** Main interplanetary parameters for the events of the third group.

Events	Solar flares	Heliographic Latitude/longitude	Kp <sub>max</sub>	Dst <sub>min</sub> [nT]	IMF <sub>max</sub> [nT]	Solar wind speed max [km s <sup>-1</sup> ]	FD amplitude [%]	A <sub>xy</sub> min [%]
08 September 1981	M7.4	S13E16	4.3	-12	14.7	444	2	3.06
16 April 1982	M1.8	S27W03	5.0	-60	17.1	518	> 2	1.97
04 March 1995	-	-	2.7	-27	-	-	1	1.33
10 August 1998	C2.9	N18E52	3.7	-37	10.7	498	< 2	1.91
18 October 1998	C1.0	N16E03	6.7	-139	26.2	430	< 2	1.24
15 September 2000	M1.6	N07W67	2.7	-10	-	-	4	3.30
03 August 2001	-	-	4.3	-18	13.7	477	> 1	3.00
25 August 2002	-	-	3.3	-7	9.4	336	2	2.35

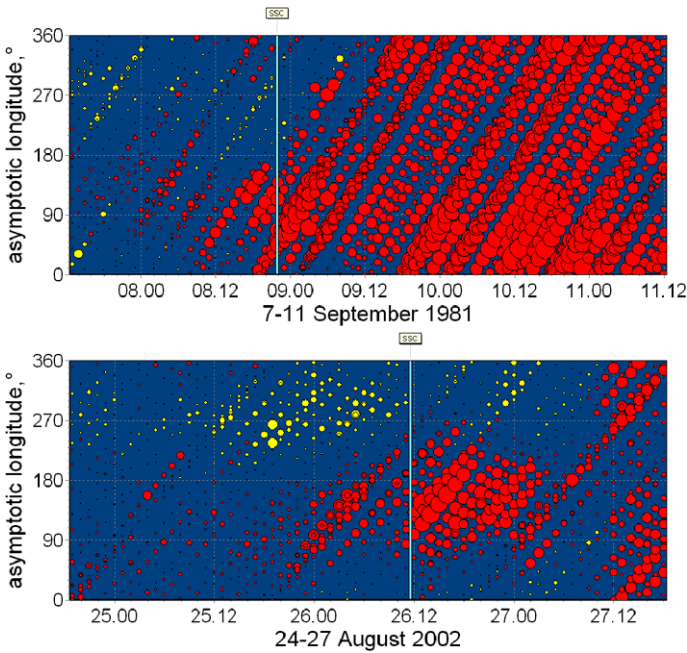
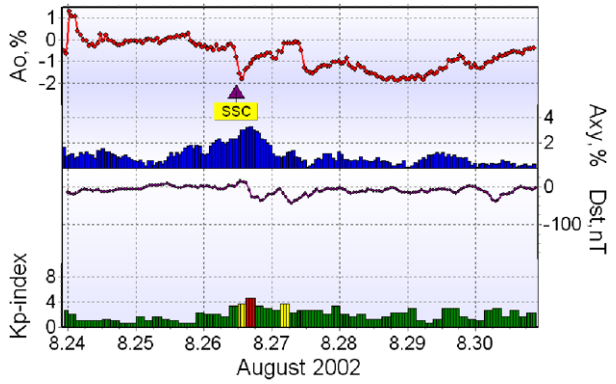
**Figure 7** Variations of the interplanetary magnetic field and solar-wind speed (upper panel), cosmic ray intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 8 September 1981. The horizontal axis refers to MM.DD.



To summarize, in this study all of the FDs with anisotropy  $A_{xy} > 1.2\%$  before the shock (93 events) for the time period 1967–2006 were analyzed with regard to the presence of predictors before the FD onset. It turned out that 27 events revealed clearly pronounced precursors. These events can be separated into three categories according to the precursor effect presented in their longitude–time distribution. For the first group, the precursor is a pre-decrease in the longitudinal zone  $90^{\circ}$ – $180^{\circ}$  lasting for 20–24 hours until the shock arrival. An increase of the IMF and the solar-wind speed is measured for the majority of these events. Moreover, the specific decreases were connected to high or strong geomagnetic activity. A pre-increase which appears at longitudes above  $180^{\circ}$  and lasts almost 12 hours is the precursor effect for the second group of events. These FDs usually follow geomagnetic storms (moderate, strong, or severe) and are connected mainly to central or eastern sources. Finally, the precursor for the third group is a pre-decrease that appears in different longitudes



**Figure 8** Variations of the cosmic-ray intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (upper panel) and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 25 August 2002. The horizontal axis refers to MM.DD.



**Figure 9** The longitude–time distribution of the events on 8 September 1981 and 25 August 2002. The horizontal axis refers to DD.HH.

each time and has a duration of several hours up to 24 hours. The geomagnetic activity preceding these events is low.

#### 4. Conclusions

From our analysis we conclude the following: In order to study the precursor effect of FDs, a specific group of events was selected from the FE database of IZMIRAN, namely the events for which the increase of the CR vector anisotropy was already observed before the SSC arrival. Among these events, many FEs were found with obvious predictors.

The analysis shows that the increase in the first harmonic of CR anisotropy before the shock arrival is a good tool in searching for predictors of FDs and magnetic storms and can also serve as one of the indices that characterize the occurrence of precursors. Certainly, it is advisable to look for precursors at smaller increases of anisotropy as well.

This research indicates that the precursors of a magnetic storm are determined by frequent phenomena in CR variations. From this analysis the conception about precursors that was developed earlier is confirmed. That is, precursors constitute a complicated combination of pre-increases and pre-decreases in CR variations which have a different physical nature that assumes specific angular distribution of CR intensity.

The complexity of mechanisms of the precursor formation, the variety of the interplanetary coronal mass ejecta, and the different conditions in interplanetary space result in a variety of CR behaviors before the shock arrival.

In general, we can say that every case of FD is unique and that each evolves under specific interplanetary conditions. The result is that the precursors are revealed in different ways every time. Thus it is of great importance to analyze more events in detail before reaching a safe conclusion useful for monitoring space weather effects.

**Acknowledgements** This work is partly supported by Russian FBR grants 11-02-01478, Program No 6 BR of the Presidium RAS “Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics,” State contract MN No 14.740.11.0609. We are grateful to the teams of the CR stations for providing the neutron-monitor data available for this study (see <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>). The authors of the University of Athens thank the Special Research Account for supporting the Cosmic Ray Research. The authors would also like to thank the anonymous referee for useful comments.

## References

- Asipenka, A., Belov, A.V., Eroshenko, E., Mavromihalaki, H., Papailiou, M., Papaioannou, A., Oleneva, V., Yanke, V.G.: 2009, In: *Proc. 31st ICRC, Lodz, Poland*, icrc1109 (<http://www.nmdb.eu/?q=node/109>).
- Belov, A.V.: 2008, In: Gopalswamy, N., Webb, D.F. (eds.) *Universal Heliophysical Processes, Proc. IAU Symp.*, **257**, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 439. doi:10.1017/S1743921309029676.
- Belov, A.V., Dorman, L.I., Eroshenko, E.A., Iucci, N., Villaresi, G., Yanke, V.G.: 1995, In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.) *Proc. 24th ICRC, Rome, Italy*, Internat. Union Pure Appl. Phys. **4**, 888.
- Belov, A.V., Bieber, J.W., Eroshenko, E.A., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.G.: 2001, In: Droege, W., Kunow, H., Scholer, M. (eds.) *Proc. 27th ICRC, Hamburg, Germany*, Internat. Union Pure Appl. Phys. **9**, 3507.
- Belov, A.V., Bieber, J.W., Eroshenko, E.A., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.G.: 2003, *Adv. Space Res.* **31**, 919.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromihalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., Mariatos, G.: 2005, *J. Geophys. Res.* **110**, A09S20. doi:10.1029/2005JA011067.
- Belov, A.V., Dryn, E., Eroshenko, E.A., Kryakunova, O., Oleneva, V., Yanke, V.G., Papailiou, M.: 2008, In: Kiraly, P., Kudela, K., Stehlik, M., Wolfendale, A.W. (eds.) *Proc. 21st ECRS, Kosice, Slovakia*, Inst. Exp. Phys., Slovak Academy of Sciences, 347.
- Blokh, Ya.L., Dorman, L.I., Kaminer, N.S.: 1959, In: *Proc. 6th ICRC, Moscow, Russia*, **4**, 77.
- Cane, H.V.: 2000, *Space Sci. Rev.* **93**, 55.
- Dorman, L.I., Iucci, N., Villaresi, G.: 1995, In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.) *Proc. 24th ICRC, Rome, Italy*, Internat. Union Pure Appl. Phys. **4**, 892.
- Fenton, A.G., McCracken, R.G., Rose, D.C., Wilson, B.G.: 1959, *Can. J. Phys.* **37**, 970.
- Forbush, S.E.: 1958, *J. Geophys. Res.* **61**, 93.
- Kudela, K., Storini, M.: 2006, *Adv. Space Res.* **37**, 1443.
- Leerunnavarat, K., Ruffolo, D., Bieber, J.W.: 2003, *Astrophys. J.* **593**, 587.
- Lockwood, J.A.: 1971, *Space Sci. Rev.* **12**, 658.
- Munakata, K., Bieber, J.W., Yasue, S., Kato, C., Koyama, M., Akahane, S., Fujimoto, K., Fujii, Z., Humble, J.E., Duldig, M.L.: 2000, *J. Geophys. Res.* **105**, 27457.
- Munakata, K., Kuwabara, T., Yasue, S., Kato, C., Akahane, S., Koyama, M., Ohashi, Y., Okada, A., Aoki, T., Mitsui, K., Kojima, H., Bieber, J.W.: 2005, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L03S04. doi:10.1029/2004GL021469.

- Munakata, K., Yasue, S., Kato, C., Kota, J., Tokumaru, M., Kojima, M., Darwish, A.A., Kuwabara, T., Bieber, J.W.: 2006, WSPC/SPI-B368 *Adv. Geosci.* **2**, Chapter 09.
- Nagashima, K., Sakakibara, S., Fujimoto, K., Fujii, Z., Ueno, H.: 1993, In: Leahy, D.A., Hickws, R.B., Venkatesan, D. (eds.) *Proc. 23rd ICRC, Invited, Rapporteur, and Highlight Papers, Calgary, Canada* **3**, World Scientific, Singapore, 711.
- Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: 2011, In: *13th ESPM, Rhodes, Greece* **P9.7**, 163. [http://astro.academyofathens.gr/espm13/documents/ESPM13\\_abstract\\_programme\\_book.pdf](http://astro.academyofathens.gr/espm13/documents/ESPM13_abstract_programme_book.pdf).
- Ruffolo, D., Bieber, J.W., Evenson, P., Pyle, R.: 1999, In: Kieda, D., Salamon, M., Dingus, B. (eds.) *Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, USA* **6**, Internat. Union Pure Appl. Phys., 440.

# The Asymptotic Longitudinal Cosmic Ray Intensity Distribution as a Precursor of Forbush Decreases

M. Papailiou · H. Mavromichalaki · A. Belov ·  
E. Eroshenko · V. Yanke

Received: 31 October 2011 / Accepted: 4 February 2012 / Published online: 6 March 2012  
© Springer Science+Business Media B.V. 2012

**Abstract** Identifying the precursors (pre-increases or pre-decreases) of a geomagnetic storm or a Forbush decrease is of great importance since they can forecast and warn of oncoming space weather effects. A wide investigation using 93 events which occurred in the period from 1967 to 2006 with an anisotropy  $A_{xy} > 1.2\%$  has been conducted. Twenty-seven of the events revealed clear signs of precursors and were classified into three categories. Here we present one of the aforementioned groups, including five Forbush decreases (24 June 1980, 28 October 2000, 17 August 2001, 23 April 2002, and 10 May 2002). Apart from hourly cosmic ray intensity data, provided by the worldwide network of neutron monitor stations, data on solar flares, solar wind speed, geomagnetic indices (Kp and Dst), and interplanetary magnetic field were used for the analysis of the examined cosmic ray intensity decreases. The asymptotic longitudinal cosmic ray distribution diagrams were plotted using the “ring of stations” method. Results reveal a long pre-decrease up to 24 hours before the shock arrival in a narrow longitudinal zone from  $90^\circ$  to  $180^\circ$ .

**Keywords** Forbush decreases · Geomagnetic activity · Loss cone effect · Pre-decreases

## 1. Introduction

The influence of coronal and consequent interplanetary coronal mass ejections (CMEs and ICMEs) and/or high-speed streams of the solar wind from coronal holes on background

---

Advances in European Solar Physics

Guest Editors: Valery M. Nakariakov, Manolis K. Georgoulis, and Stefaan Poedts

M. Papailiou · H. Mavromichalaki (✉)

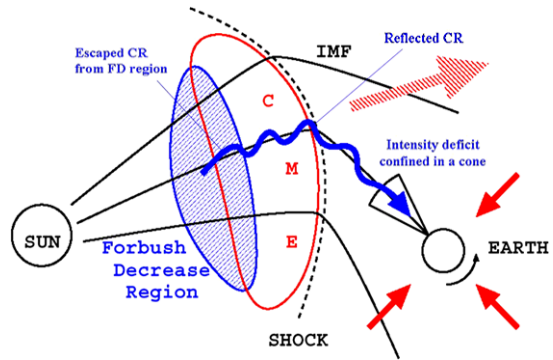
Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, National and Kapodistrian University of Athens, 15771 Athens, Greece

e-mail: [emavromi@phys.uoa.gr](mailto:emavromi@phys.uoa.gr)

A. Belov · E. Eroshenko · V. Yanke

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Troitsk, Moscow region, Russia

**Figure 1** The “loss cone” effect (Asipenka *et al.*, 2009a).



cosmic rays (CRs) can result in CR intensity decreases, known as Forbush decreases (FDs). These events are characterized by a relatively fast depression of CR intensity followed by a slower recovery on a time scale of several days (Forbush, 1958; Lockwood, 1971; Cane, 2000; Belov, 2008). Interplanetary shock waves, high-speed solar wind streams, and magnetic clouds all can be responsible for the registered variations of the CR intensity (Papailiou *et al.*, 2010).

The changes in CR intensity behavior begin well before the arrival of the interplanetary shock or solar wind disturbance at Earth. The effect of an approaching shock (precursor) is a complicated combination of pre-increases and pre-decreases in CR variations and assumes a specific angular distribution of CR intensity (Belov, 2008). As mentioned in Kudela and Storini (2006), particles with large pitch angles approaching the shock from the upstream region and reflecting from it are usually seen as pre-increases. Pre-decreases correspond to relatively small pitch angles and apparently result from a “loss cone” effect. As shown in Figure 1, the neutron monitor station is magnetically connected to the CR-depleted region downstream of the shock (Asipenka *et al.*, 2009a).

Over the last few years an increasing number of studies concerning precursor effects in CR intensity have been carried out (Nagashima *et al.*, 1993; Belov *et al.*, 1995; Dorman, Iucci, and Villaresi, 1995; Ruffolo *et al.*, 1999; Leerunghavarat, Ruffolo, and Bieber, 2003; Dorman, 2005 and references therein; Kudela and Storini, 2006; Mavromichalaki *et al.*, 2011). A series of strong FDs have been studied separately in order to reach some well-established conclusions on the types of precursor effects.

According to Asipenka *et al.* (2009a), a pre-decrease within the narrow longitudinal sector along the average direction of the interplanetary magnetic field (IMF) is observed 11 hours before the shock for the FD on 29 August 1979. Another example presented by Asipenka *et al.* (2009a) is the event on 15 September 2005, where low CR intensity in the narrow region of longitudes 90–180° stands out against the background of increases in CR variations.

Moreover, a clear pre-decrease for longitudes 75–180° lasting for almost 20 hours until the FD onset is noticed for the FD on 25–26 January 1968 (Belov *et al.*, 1995; Kudela *et al.*, 2000). A similar behavior is observed for the FDs on 11–12 July 1991 and 24–25 June 1978. All these events are associated with western and central solar flares. However, for the event on 4 April 1991, which is connected to an eastern flare, a pre-increase is noticed within the sector 165–270° (Belov *et al.*, 1995).

In a recent work (Papailiou *et al.*, 2012) 93 events with an equatorial component of the first harmonic of CR anisotropy  $A_{xy}$  greater than 1.2% for the time period 1967–2006 were analyzed, and 27 of them (~29%) revealed clear signs of a precursor. According to the

nature of the precursors these events were separated into three categories: i) pre-decrease in the longitudinal zone  $90-180^\circ$  almost 24 hours before the shock arrival (five events), ii) pre-increase in the longitudinal zone around and above  $180^\circ$  almost 12 hours before the FD (14 events), and iii) pre-decrease at different longitudes and of different durations (eight events). Examples from all three groups have been presented in detail.

In this study five different FDs, corresponding to the first of the aforementioned categories, have been analyzed and presented on the basis of their common behavior in asymptotic longitudinal CR distribution diagrams. The chosen value of anisotropy can be considered as anomalous, since it significantly exceeds the mean statistical value, which is usually less than 0.6%.

## 2. Data and Methods of Analysis

The “ring of stations” (RS) method makes it possible to study these anomalies in CR intensity by using data from the worldwide network of neutron monitor stations (Belov *et al.*, 1995; Belov *et al.*, 2003; Asipenka *et al.*, 2009a). Specifically, hourly CR intensity data recorded by the neutron monitor stations with cut-off rigidity  $R_c < 4$  GV and latitudes  $< 70^\circ$  are used. A detailed list of the neutron monitor stations used by the RS method is included in Papailiou *et al.* (2012).

This method calculates the hourly values of CR intensity variations at each station relative to a fixed period and then plots it according to the asymptotic longitude of the station at that moment. The precursor effect is very anisotropic; thus the sky coverage in the asymptotic directions of the stations used should be as complete as possible. Using as many neutron monitors as possible, we have depicted temporal variations of CR intensity distributed in space by asymptotic directions.

The asymptotic longitudinal CR distribution diagrams were obtained using 31 neutron monitor stations. This number of stations basically covers all of the asymptotic longitudes and guarantees that data from as many longitudes of arrival as possible are obtained at every moment. Each station rotates with the Earth, thus scanning a complete circle of longitudes during a day. Clearly, a more complete picture of the whole celestial sphere is obtained when at any moment a sufficient number of stations looking at different asymptotic directions is used (<http://www.nmdb.eu/?q=node/19>).

Apart from the asymptotic angle distribution of the CR variations, the CR pitch angle distribution (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/>) can also be used to display the potential precursor effects. Even though this method is more tightly connected to the model of pre-decreases caused by the loss cone, the asymptotic longitude dependence method has its own advantages (Papailiou *et al.*, 2012).

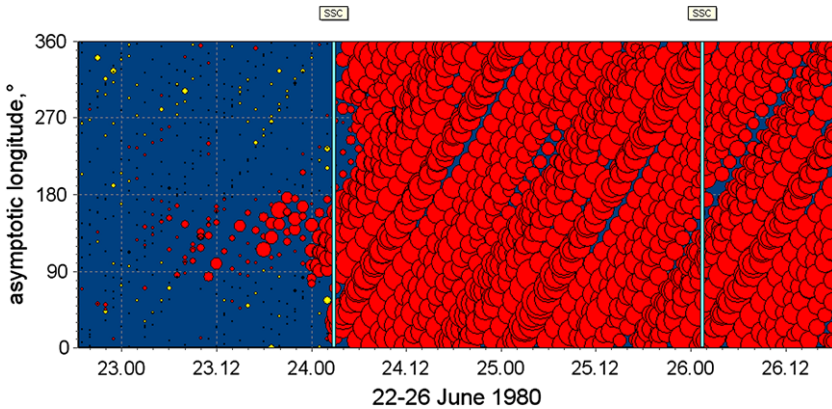
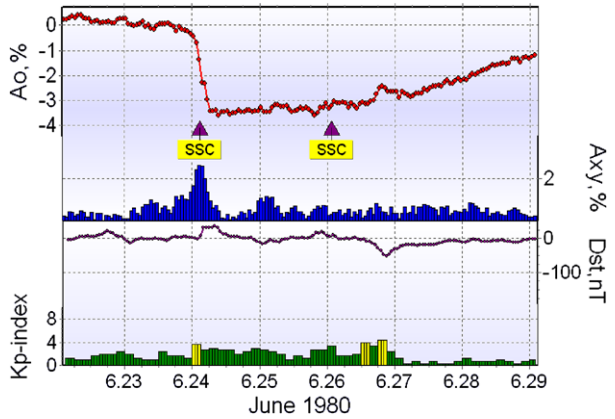
The database of the interplanetary disturbances and Forbush effects created at IZMIRAN (Belov, 2008) combines hourly values of the CR density and anisotropy, obtained from the neutron monitor network, with solar, interplanetary, and geomagnetic parameters. The database, which currently includes about 6000 events over the period 1957–2010, allows the selection of events with regard to different parameters and various statistical estimations. Moreover, using the global survey method (GSM), the density and first harmonic of anisotropy for CRs of rigidity 10 GV have been calculated (Belov *et al.*, 2005; Asipenka *et al.*, 2009b) and entered into the database. Solar wind parameters and geomagnetic indices were obtained from the OMNI database (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

### 3. Results

In this work the events on 24 June 1980, 28 October 2000, 17 August 2001, 23 April 2002, and 10 May 2002 are presented. What follows is a detailed description of the relevant interplanetary disturbances during the aforementioned decreases along with the longitude–time distribution of CR variation diagrams of these events.

*Forbush Effect on 24 June 1980* This event was related to a disturbance registered on 24 June 1980 after an M2.3 flare (S12E17) on 21 June 1980 at 00:03 UT. The associated shock arrival (Figure 2, upper panel) was registered on 24 June 1980 at 2:48 UT. No strong changes in the interplanetary space parameters (maximum values for IMF intensity and solar wind speed were 14 nT and 453 km s<sup>-1</sup>, respectively) or in the geomagnetic activity (maximum Kp index was 3.67 and minimum Dst index was -18 nT) were noticed, as is seen in Figure 2 (bottom panel). However, a significant CR intensity decrease (≈ 4%) was registered (Figure 2, upper panel). Forbush decreases usually can be related to high geomagnetic activity (Dorman, 2005). However, it is possible that a CR intensity decrease is not accompanied by a Dst depression; vice versa a large Dst depres-

**Figure 2** Variations of CR intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (upper panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 24 June 1980 (the horizontal axis refers to MM.DD).



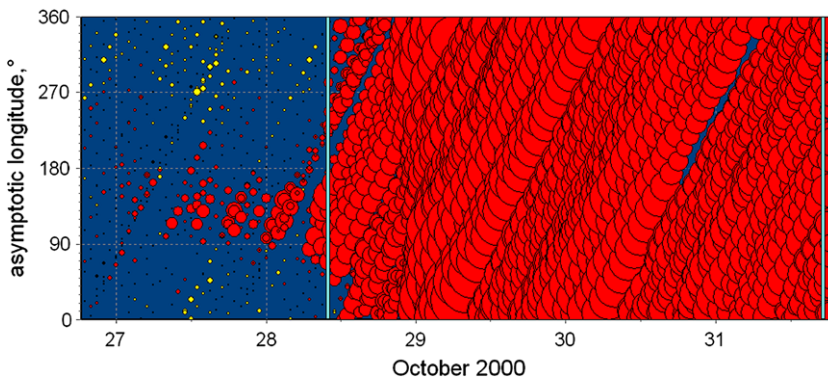
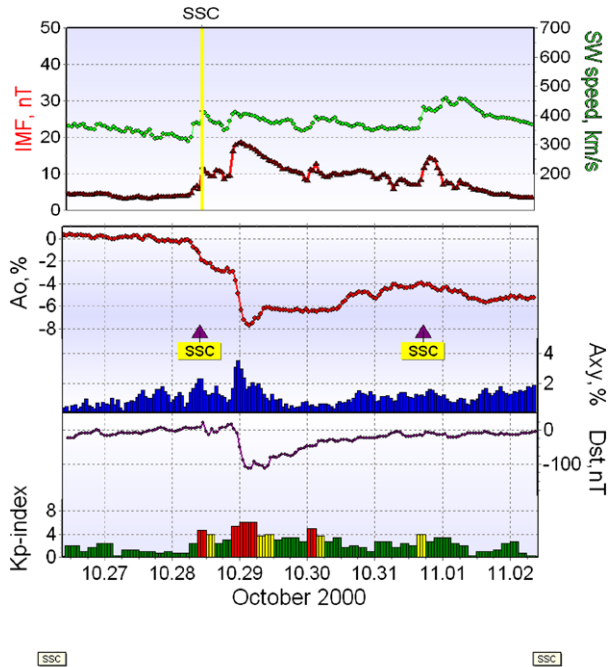
**Figure 3** The event on 24 June 1980 presented as a longitude–time distribution (the horizontal axis refers to DD.HH).

sion does not always mark a strong CR intensity decrease (Kudela and Brenkus, 2004; Kane, 2010), as shown in Figure 2.

The asymptotic longitudinal CR distribution diagram for this event is presented in Figure 3. Here the CR intensity decreases, as measured by all neutron monitor stations used by the RS method, are depicted with red circles, while yellow circles refer to CR intensity increases relative to a quiet fixed period. The size of the circles is proportional to the size of the variation. The vertical line denotes the time when the sudden storm commencement (SSC) was registered (for this case the first line describes the SSC associated to the particular event).

Figure 3 shows a long and narrow pre-decrease for all stations with asymptotic longitudes from 90° to 180°. In fact, the pre-decrease of these events seems to be about 20–30°

**Figure 4** Variations of the interplanetary field and solar wind speed (upper panel), CR intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 28 October 2000 (the horizontal axis refers to MM.DD).



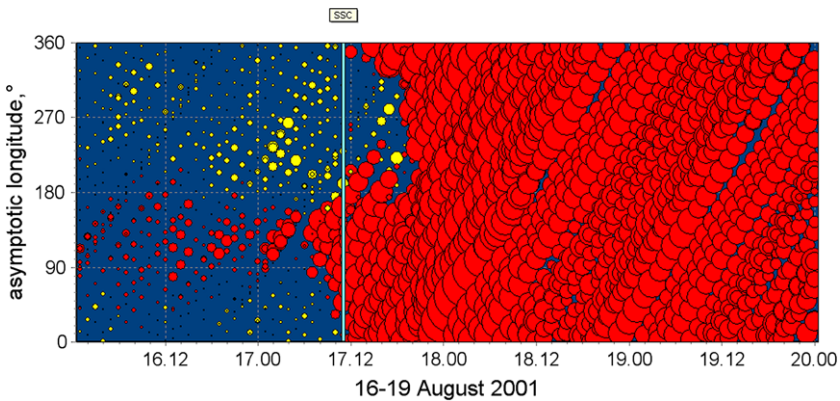
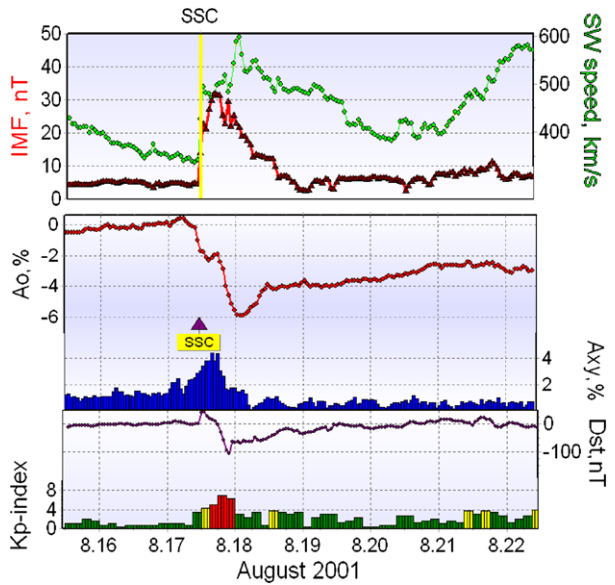
**Figure 5** The event on 28 October 2000 presented as a longitude–time distribution (the horizontal axis refers to days).



narrower in space. The observed effect appears wider than it really is because neutron monitors record particles within a wide range of longitudes. The pre-decrease is registered some hours after 00:00 UT on 23 June until 02:00 UT on 24 June.

**Forbush Effect on 28 October 2000** The shock registered on 28 October 2000 at 9:54 UT was the result of a slight increase of the IMF intensity (red line) and the solar wind speed (green line), which however remained rather low ( $< 450 \text{ km s}^{-1}$ ), as shown in Figure 4 (upper panel). After several hours a second increase of the IMF intensity (up to 20 nT) occurred above the background of the same low solar wind velocity. These changes were followed by a strong two-step FD ( $\approx 8\%$ ) registered on 29 October 2000 (Figure 4, middle panel). As shown in Figure 4 (bottom panel), a geomagnetic storm ( $Kp_{\text{max}} = 6$  and  $Dst_{\text{min}} =$

**Figure 6** Variations of the interplanetary field and solar wind speed (upper panel), CR intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 17 August 2001 (the horizontal axis refers to MM.DD).



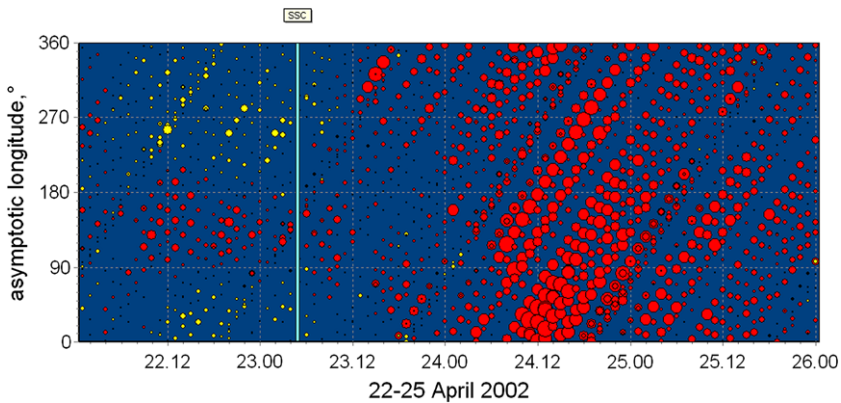
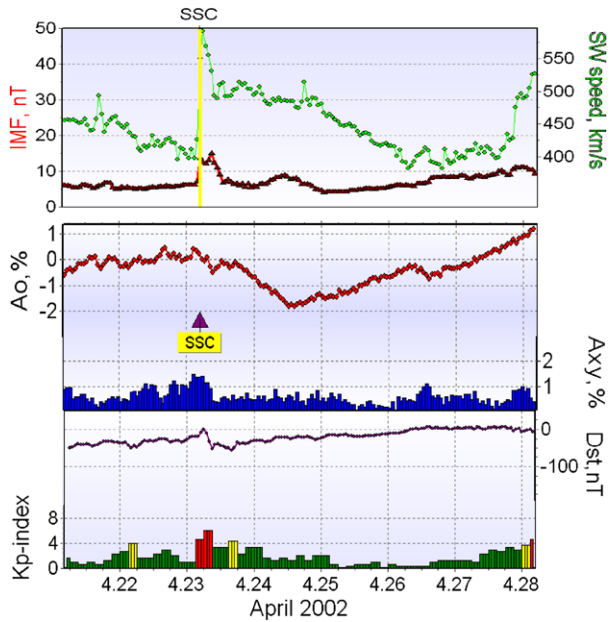
**Figure 7** The event on 17 August 2001 presented as a longitude–time distribution (the horizontal axis refers to DD.HH).

–113 nT) occurred after the second jump of the IMF. The flare on 25 October 2000 at 8:45 UT associated to this event was located far to the west (N10W66) and was of class C4.0.

Figure 5 is the asymptotic longitudinal CR distribution diagram for this FD. The pre-decrease, which appears some hours after 00:00 UT on 27 October, lasts for almost 24 hours until the main FD and is also limited to the range of longitudes 90–180°.

*Forbush Effect on 17 August 2001* A strong increase in the IMF intensity and the solar wind speed ( $\approx 600 \text{ km s}^{-1}$ ) resulted in the strong SSC that was recorded on 17 August 2001 at 11:03 UT (Figure 6, upper panel). The two-step FD recorded on 17–18 August 2001 (Figure 6, middle panel) was of almost 6% and was followed by a significant increase of so-

**Figure 8** Variations of the interplanetary field and solar wind speed (upper panel), CR intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (middle panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 23 April 2002 (the horizontal axis refers to MM.DD).



**Figure 9** The event on 23 April 2002 presented as a longitude–time distribution (the horizontal axis refers to DD.HH).

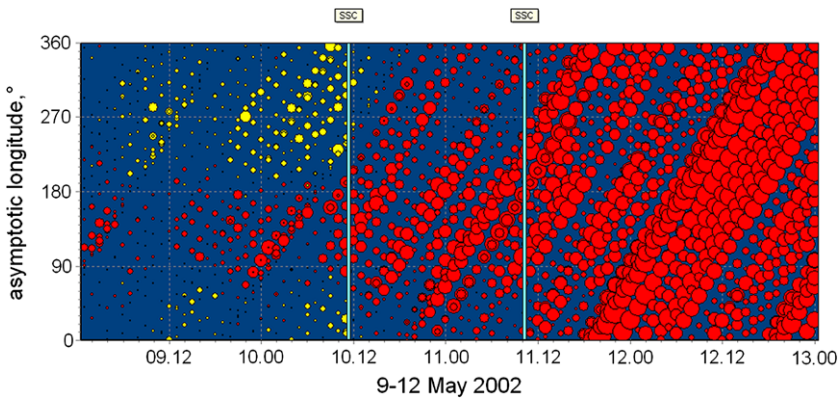
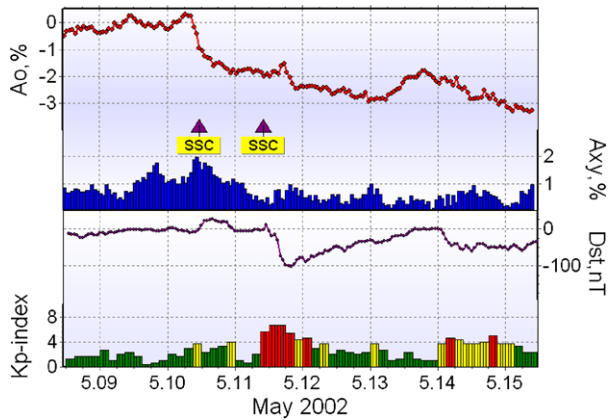
lar diurnal CR anisotropy. The associated C2.3 flare (N26W10) was recorded on 14 August 2001 at 11:30 UT and belongs to the central heliolongitudinal sector. The geomagnetic indices Kp and Dst during this event were 7 and  $-107$  nT, respectively (geomagnetic storm), as shown in Figure 6 (bottom panel).

The asymptotic longitudinal CR distribution diagram for this event is seen in Figure 7. The pre-decrease lasts almost 24 hours and is accompanied by a pre-increase at longitudes above  $180^\circ$ .

*Forbush Effect on 23 April 2002* The slight increase of the IMF intensity (15.1 nT) resulted in a weak SSC, which was registered on 23 April 2002 at 4:48 UT. However a jump in the solar wind speed was recorded, which reached  $593 \text{ km s}^{-1}$  (Figure 8, upper panel). The effect on CR intensity (Figure 8, middle panel) was weak (a 2% decrease in the CR intensity), and the geomagnetic activity was moderate (geomagnetic indices Kp and Dst had values 6.0 and  $-56$  nT, respectively), as shown in Figure 8 (bottom panel). The associated western (S14W84) flare of class X1.5 was recorded on 21 April 2002 at 00:43 UT.

In this event, besides the pre-decrease, which is noticed almost 16 hours before the FD, a pre-increase is also registered at longitudes above  $180^\circ$  (Figure 9).

**Figure 10** Variations of CR intensity  $A_0$  and  $A_{xy}$  anisotropy (upper panel), and Dst- and Kp-indices (bottom panel) for the event on 10 May 2002 (the horizontal axis refers to MM.DD).



**Figure 11** The event on 10 May 2002 presented as a longitude–time distribution (the horizontal axis refers to DD.HH).

*Forbush Effect on 10 May 2002* A CR intensity decrease started after the shock registered on 10 May 2002 at 11:23 UT. As shown in Figure 10 (upper panel), the CR intensity decreased  $\approx 2\%$ , while the geomagnetic activity (Figure 10, bottom panel) was rather low (geomagnetic indices Dst and Kp reached values of  $-11$  nT and 4, respectively). A geomagnetic storm (Dst  $\sim -100$  nT, Kp up to 7) and an additional CR decrease ( $-1\%$ ) occurred after the second SSC on 11 May. This disturbance was associated to a solar filament disappearance (SFD) in the north-north-east quadrant of the solar disk, which produced a halo CME with velocity  $\approx 611$  km s $^{-1}$  near the Sun. At the same time an M1.4 flare with coordinates S08E28 (on the southern part of the SFD) was registered on 7 May 2002 at 3:37 UT. The SFD and flare seemed not to be associated based on their locations; thus the real source of the event seems to be the SFD, the coordinates of which are not well defined.

The pre-decrease for this event is localized again in the longitudinal zone  $90-180^\circ$  and lasts almost 24 hours starting from 12:00 UT on 9 May, as shown in Figure 11. In this event there is also a clear pre-increase above  $180^\circ$ .

#### 4. Summary and Conclusions

An analysis of 93 FDs with anisotropy  $A_{xy} > 1.2\%$  before the shock for the time period 1967–2006 was conducted to determine the presence of precursors. Clear precursors were registered for a group of 27 events ( $\sim 29\%$ ), which in turn were separated into three categories according to the precursor effect presented in their longitude–time distribution. In this study the first group of events has been presented. The precursor is a pre-decrease in the longitudinal zone  $90-180^\circ$  lasting for almost 24 hours until the shock arrival. An increase in IMF and solar wind speed has been measured for the majority of these events; moreover, the specific decreases were connected to strong geomagnetic activity.

The analysis of these FDs has shown that a strong decrease in CR intensity is usually accompanied by precursors, pre-decreases or pre-increases, appearing some hours, in some cases up to 24 hours, before the FD onset. The RS and GSM methods make it possible to study these anomalies in CR intensity by using data from the worldwide network of neutron monitor stations.

The study of precursors is a useful tool for the analysis and forecast of space weather effects; therefore, it is of great importance to investigate a large amount of these phenomena. An extensive analysis is also needed because these phenomena demonstrate themselves differently each time, according to varying interplanetary conditions.

**Acknowledgements** This work is partly supported by Russian FBR grants 11-02-01478, Program No. 6 BR of the Presidium RAS “Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics,” state contract MN No. 14.740.11.0609. The authors from the University of Athens thank the Special Research Account for supporting the Cosmic Ray research. We are grateful to the teams of the CR stations for providing the neutron monitor data for this study: <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>. Thanks are also due to the reviewers for their useful comments.

#### References

- Asipenka, A., Belov, A.V., Eroshenko, E., Mavromihalaki, H., Papailiou, M., Papaioannou, A., Oleneva, V., Yanke, V.G.: 2009a, *Proc. 31st ICRC, Lodz, Poland*, icrc1109 (<http://www.nmdb.eu/?q=node/109>).
- Asipenka, A.S., Belov, A.V., Eroshenko, E.A., Klepach, E.G., Oleneva, V.A., Yanke, V.G.: 2009b, *Adv. Space Res.* **43**, 708.
- Belov, A.V.: 2008, In: Gopalswamy, N., Webb, D.F. (eds.) *Universal Heliophysical Processes. Proc. IAU Symp.* **257**, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 439. doi:[10.1017/S1743921309029676](https://doi.org/10.1017/S1743921309029676).

- Belov, A.V., Dorman, L.I., Eroshenko, E.A., Iucci, N., Villoresi, G., Yanke, V.G.: 1995, In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.) *Proc. 24th ICRC, Rome, Italy. Int. Union Pure App. Phys.* **4**, 888.
- Belov, A.V., Bieber, J.W., Eroshenko, E.A., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.G.: 2003, *Adv. Space Res.* **31**, 919.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., Mariatos, G.: 2005, *J. Geophys. Res.* **110**, A09S20. doi:[10.1029/2005JA011067](https://doi.org/10.1029/2005JA011067).
- Cane, H.V.: 2000, *Space Sci. Rev.* **93**, 55.
- Dorman, L.I., Iucci, N., Villoresi, G.: 1995, In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.) *Proc. 24th ICRC, Rome, Italy, Int. Union Pure App. Phys.* **4**, 892.
- Dorman, L.I.: 2005, *Ann. Geophys.* **23**, 2997.
- Forbush, S.E.: 1958, *J. Geophys. Res.* **61**, 93.
- Kane, R.P.: 2010, *Ann. Geophys.* **28**, 479.
- Kudela, K., Brenkus, J.: 2004, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **66**, 1121.
- Kudela, K., Storini, M.: 2006, *Adv. Space Res.* **37**, 1443.
- Kudela, K., Storini, M., Hofer, M., Belov, A.: 2000, *Space Sci. Rev.* **93**, 153.
- Leerungnavarat, K., Ruffolo, D., Bieber, J.W.: 2003, *Astrophys. J.* **593**, 587.
- Lockwood, J.A.: 1971, *Space Sci. Rev.* **12**, 658.
- Mavromichalaki, H., Papaioannou, A., Plainaki, C., Sarlanis, C., Souvatzoglou, G., Gerontidou, M., Papailiou, M., Eroshenko, E., Belov, A., Yanke, V. (The NMDB team): 2011, *Adv. Space Res.* **47**, 2210.
- Nagashima, K., Sakakibara, S., Fujimoto, K., Fujii, Z., Ueno, H.: 1993, In: Leahy, D.A., Hickws, R.B., Venkatesan, D. (eds.) *Proc. 23rd ICRC, Invited, Rapporteur, and Highlight Papers 3, Calgary, Canada, World Scientific, Singapore*, 711.
- Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: 2012, *Solar Phys.* **276**, 337.
- Papaioannou, A., Malandraki, O., Belov, A., Skoug, R., Mavromichalaki, H., Eroshenko, E., Abunin, A., Lepri, S.: 2010, *Solar Phys.* **266**, 181.
- Ruffolo, D., Bieber, J.W., Evenson, P., Pyle, R.: 1999, In: Kieda, D., Salamon, M., Dingus, B. (eds.) *Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, USA, Int. Union Pure App. Phys.* **6**, 440.

# Forbush Decreases Associated with Western Solar Sources and Geomagnetic Storms: A Study on Precursors

M. Papailiou · H. Mavromichalaki · M. Abunina ·  
A. Belov · E. Eroshenko · V. Yanke · O. Kryakunova

Received: 14 November 2012 / Accepted: 15 January 2013 / Published online: 5 February 2013  
© Springer Science+Business Media Dordrecht 2013

**Abstract** As suggested in many studies the pre-increases or pre-decreases of the cosmic ray intensity (known as precursors), which usually precede a Forbush decrease, could serve as a useful tool for studying space weather effects. The events in this study were chosen based on two criteria. Firstly, the heliolongitude of the solar flare associated with each cosmic ray intensity decrease was in the  $50^{\circ}$ – $70^{\circ}$ W sector and, secondly, the values of the geomagnetic activity index,  $Kp_{\max}$ , were  $\geq 5$ . Twenty five events were selected from 1967 to 2006. We have used data on solar flares, solar wind speed, geomagnetic indices ( $Kp$  and  $Dst$ ), and interplanetary magnetic field in our detailed analysis. The asymptotic longitudinal cosmic ray distribution diagrams were plotted using the “Ring of Stations” method for all the events. The results reveal clear signs of precursors in 60 % of selected events.

**Keywords** Forbush decreases · Geomagnetic storms · Pre-decreases · Pre-increases · Neutron monitors

## 1. Introduction

The study of precursors (pre-decreases or pre-increases) in the cosmic ray intensity (CRI) usually preceding Forbush decreases (FDs) has been the main subject in many investigations (Belov *et al.*, 1995; Leerunnavarat, Ruffolo, and Bieber, 2003; Dorman, 2005; Kudela and Storini, 2006). Pre-decreases apparently result from a “loss cone” effect in which the

---

M. Papailiou · H. Mavromichalaki (✉)  
Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, National and Kapodistrian University of Athens, Zografos, 15784 Athens, Greece  
e-mail: [emavromi@phys.uoa.gr](mailto:emavromi@phys.uoa.gr)

M. Abunina · A. Belov · E. Eroshenko · V. Yanke  
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Troitsk, Moscow region, Russia

O. Kryakunova  
Institute of Ionosphere, Kamenskoe Plato, Almaty, 050020, Kazakhstan

neutron monitor station is magnetically connected to the cosmic ray depleted region downstream of the shock (Belov *et al.*, 1995; Leerunnavarat, Ruffolo, and Bieber, 2003), while pre-increases are caused by galactic cosmic ray acceleration at the front of the advancing disturbance, as the particles are being reflected from the approaching shock (Belov *et al.*, 1995; Kudela and Storini, 2006).

Recent investigations (Papailiou *et al.* 2012a, 2012b) indicate that the enhanced equatorial component of the first harmonic of the cosmic ray anisotropy,  $A_{xy}$ , observed for at least one hour before the shock arrival, can be considered as a satisfactory criterion for precursors.

In this study the events under examination were chosen based on the heliolongitude of the solar flare associated with each CRI decrease ( $50^\circ - 70^\circ \text{W}$ ) and the values of the geomagnetic index  $Kp$  ( $\geq 5$ ). Thus, 25 events were selected; some are described in more detail below. Although events related to western solar sources are not so big and do not show as well-marked cosmic ray variations near Earth as those related to eastern or central sources, they were chosen because they are characterized by a larger anisotropy before the shock arrival.

## 2. Data and Method

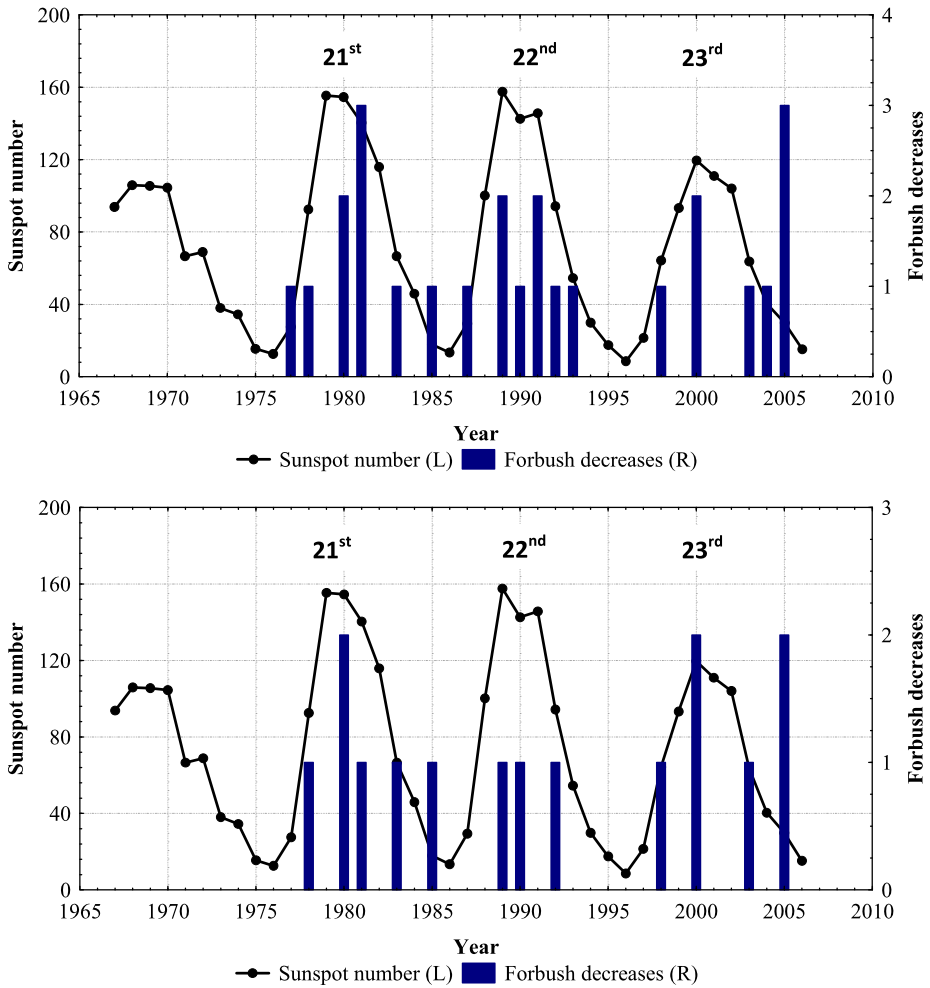
Asymptotic longitudinal cosmic ray distribution diagrams were plotted using the “Ring of Stations” (RS) method. This method uses hourly data of CRI variations recorded by the neutron monitor stations. In this study stations with cut-off rigidity  $R_c < 4$  GV and latitudes  $< 70^\circ$  were used (Belov *et al.*, 1995; Asipenka *et al.*, 2009). The asymptotic longitudinal cosmic ray distribution diagrams were obtained using data from 31 neutron monitors. A detailed list of the neutron monitor stations used by the RS method was included in Papailiou *et al.* (2012a). The density and first harmonic of the anisotropy for cosmic rays of rigidity 10 GV, as calculated by the global survey method (Belov *et al.*, 2005), and solar wind parameters and geomagnetic indices, as obtained from the OMNI database (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), have been used for the analysis of each event.

## 3. Results

The events under study correspond to the time period 1967–2006, which covers the 21st (1976–1986), 22nd (1986–1996) and 23rd (1996–2008) Solar Cycles (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>). The yearly distribution of the 25 FDs, connected to western solar sources and geomagnetic storms, along with the yearly distribution of 15 of them, which revealed signs of precursors, are shown in Figure 1 (upper and bottom panels, respectively). In these figures solar activity (through sunspot number) is also depicted for the same time period. As is seen, the frequency of observed FDs is highest around the maximum of the solar cycles.

A certain correlation exists between the size of the Forbush effect and a precursor, though for the western sources this rule is often broken; it is possible to see a big precursor with a small Forbush effect since the main part of solar wind disturbances goes to the West and is not visible at Earth.

All the events under study, along with the main interplanetary parameters, are shown in Table 1. In this work the events on 21 January 2005, 24 August 2005, 26 May 1990, and 4 October 1983, are analyzed for the first time. Below follows a detailed description of the relevant interplanetary disturbances during the aforementioned decreases along with the longitude-time distribution of cosmic ray variation diagrams.



**Figure 1** Yearly distribution of the sunspot number and the number of Forbush decreases associated with western solar sources and geomagnetic storms (upper panel) and of those with precursors (bottom panel).

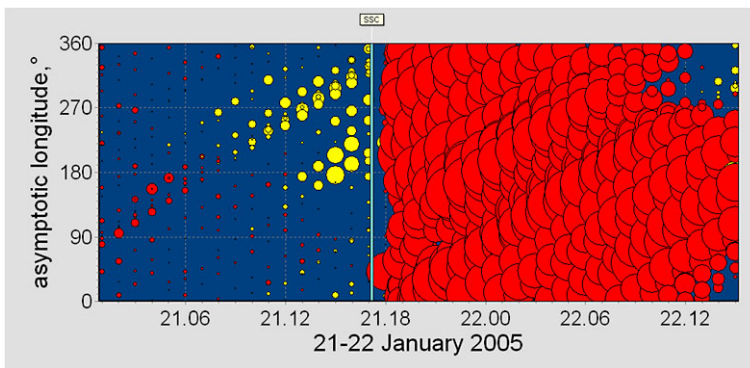
The asymptotic longitude distribution of cosmic ray variations observed by different stations is presented in Figures 2, 3, 4, and 6. In these figures the vertical axis corresponds to the asymptotic longitude of the stations and the horizontal axis refers to the time as DD.HH in UT. The CRI decreases, as measured by all neutron monitor stations used by the RS method, are depicted with red circles, while yellow circles refer to CRI increases, relative to a quiet fixed period. The size of the circles is proportional to the size of the variation. The vertical line denotes the time when the sudden storm commencement (SSC) was registered.

A SSC was registered on 21 January 2005, at 17:11 UT. The source of the event was an X7.1 flare on 20 January 2005, at 18:36 UT in active region (AR) 10720 with coordinates N14W61. Even though a ground level enhancement (GLE) on January 20 preceded this event, it is a good example of precursor. The geomagnetic conditions were also quiet before the FD. During this event the maximum interplanetary magnetic field (IMF) intensity was 29.5 nT and the maximum solar speed velocity was 950 km s<sup>-1</sup>. The CRI decrease was about



**Table 1** Main interplanetary parameters for the events under study.

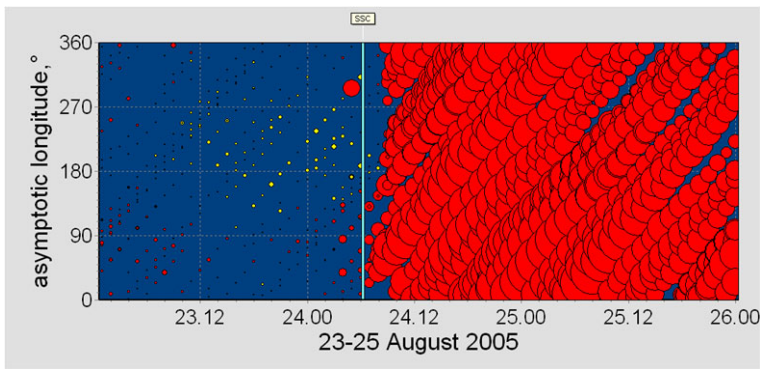
Event	Flare	Heliographic latitude/longitude	$Kp_{\max}$	$Dst_{\min}$ (nT)	FD amplitude (%)
10 May 1978	X2.0	N22W68	6.0	-78	0.7
28 Jan. 1980	M7.0	S19W51	5.3	-69	2.5
30 Oct. 1980	C4.0	S19W60	5.3	-58	3.6
23 Jul. 1981	X2.7	S37W56	5.7	-89	3.9
4 Oct. 1983	M1.1	S18W53	6.7	-71	1.1
12 Aug. 1985	C5.4	S11W69	6.3	-51	1.1
19 Mar. 1989	X6.5	N33W60	6.7	-106	2.2
26 May 1990	M8.7	N33W55	7.3	-87	0.8
27 Jun. 1992	X3.9	N09W67	6.7	-98	0.6
29 May 1998	C7.5	N18W58	6.7	-58	1.8
6 Apr. 2000	C2.1	N16W66	8.7	-288	2.8
28 Oct. 2000	C4.0	N10W66	6.0	-127	7.7
4 Nov. 2003	X8.3	S14W56	7.0	-89	2.6
21 Jan. 2005	X7.1	N14W61	8.0	-105	9.0
24 Aug. 2005	M2.6	S11W54	8.7	-216	6.4

**Figure 2** The event on 21 January 2005, presented as a longitude-time distribution. For explanation see text.

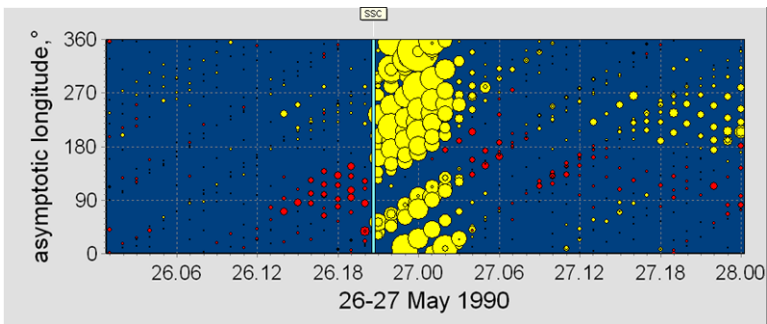
9 % and the maximum anisotropy was 5.26 %. The registered geomagnetic storm was severe ( $Kp$  and  $Dst$  indices were 8 and  $-105$  nT, respectively). As seen in Figure 2 a pre-increase above  $180^\circ$  was visible before the shock.

Concerning the event on 24 August 2005, the SSC was registered on 24 August 2005, at 6:13 UT. This event was the result of a combination of an M2.6 flare registered on 22 August at 00:44 UT in AR10798 with coordinates S11W54 and the coronal hole 183. During this event the maximum IMF intensity was 52.2 nT and the maximum solar wind speed was  $720 \text{ km s}^{-1}$ . The CRI decrease was about 6.4 % and the maximum anisotropy was 2.66 %. In addition to this, a severe storm with  $Kp$  index 8.7 and  $Dst$  index  $-216$  nT was registered. As seen in Figure 3 a pre-decrease at around  $90^\circ$ , was visible before the shock.

The event on 26 May 1990, is an example of a very peculiar precursor. The SSC was registered on 26 May 1990, at 20:37 UT. The source of the event was an M8.7 flare, which



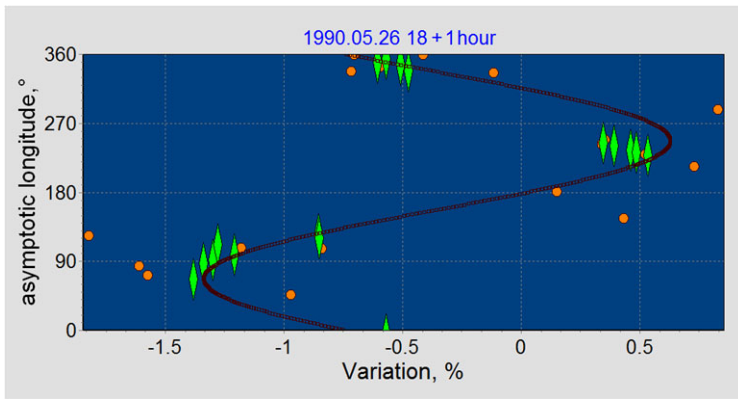
**Figure 3** The event on 24 August 2005, presented as a longitude-time distribution.



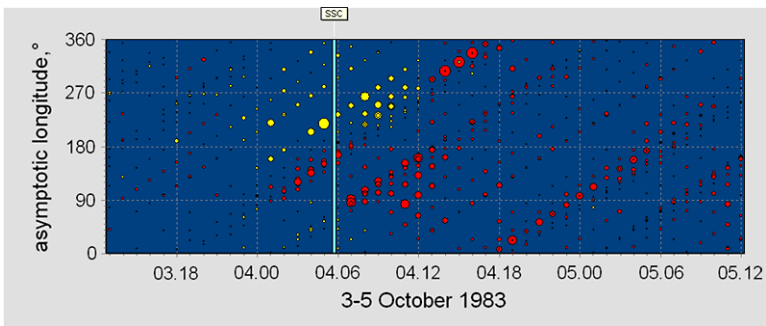
**Figure 4** The event on 26 May 1990, presented as a longitude-time distribution.

occurred on 23 May at 4:01 UT in AR6063 with coordinates N33W55. Even though there is no obvious CRI decrease, this is a good example of precursor. Almost 6 hours prior to the shock arrival a very characteristic CRI decrease at longitudes around  $90^\circ$  was recorded. This variation is expected to be a precursor of a FD, which however was not registered by neutron monitors due to the GLE on 26 May; nevertheless, it was a precursor of the geomagnetic storm which started simultaneously with the shock arrival. Cosmic rays underwent this decrease in the interplanetary medium and brought this information to Earth. Thus, this event is unusual and has no analog. During this event the observable CRI decrease was about 0.8 % but the maximum anisotropy was 2.61 %. The registered geomagnetic storm was strong ( $K_p$  and  $Dst$  indices were 7.3 and  $-87$  nT, respectively). The asymptotic longitudinal cosmic ray distribution diagram for this event is presented in Figure 4.

In previous studies (Belov *et al.*, 2001) it was shown that during precursors a specific longitudinal angle distribution of the cosmic ray variations appears when maximum and minimum are very close and, then, the CRI changes sharply around certain longitudes. In Figure 5 such a longitudinal angle distribution of the cosmic ray variations is plotted for the event on 26 May 1990, from 18:00 to 19:00 UT, two hours before the shock arrival. The figure clearly shows the close position of the minimum and maximum of cosmic ray variations in a narrow strip of longitudes, around  $90^\circ$ . As is clearly seen, this distribution cannot be described by the simple harmonic of the first order.



**Figure 5** Dependence of cosmic ray variations on the asymptotic longitude of neutron monitors in the event on 26 May 1990. For explanation see text.

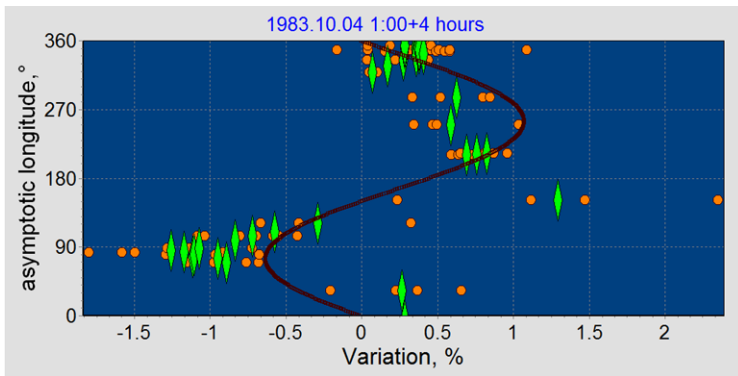


**Figure 6** The event on 4 October 1983, presented as a longitude-time distribution.

In Figures 5 and 7, orange dots are hourly cosmic ray variations, green diamonds depict cosmic ray variations averaged within the sector  $\pm 20^\circ$  for Figure 5 and  $\pm 10^\circ$  for Figure 7, while the curve is the fitted first harmonic of the anisotropy (solar–diurnal variation) for the data under consideration.

The event on 4 October 1983 (see Figure 6), demonstrates that such a characteristic precursor distribution can persist. The SSC for this event was registered on 4 October 1983, at 5:41 UT. The source of the event was an M1.1 flare on 2 October 1983, at 6:12 UT in AR4324 with coordinates S18W53. During this event the maximum IMF intensity was 23.6 nT and the maximum solar wind speed was 533 km s<sup>-1</sup>. The CRI decrease was about 1.1 % and the maximum anisotropy was 1.91 %. The registered geomagnetic storm was moderate ( $K_p$  index was 6.7 and  $Dst$  index was  $-71$  nT). In Figure 7 the data are plotted along four hours, from 1:00 to 5:00 UT on 4 October 1983. It is seen that the first harmonic does not completely describe the distribution of the variations. It is obvious that similar variations are grouped at a certain longitude, the minimum being within a narrow strip of longitudes – around  $90^\circ$ .

It should be mentioned that there is one FD on 28 October 2000, which is included not only in the group of events connected to western solar sources and geomagnetic storms, discussed in this study, but also in the group of events with an equatorial component of the first harmonic of the cosmic ray anisotropy,  $A_{xy}$ , greater than 1.2 % (Papailiou *et al.*, 2012b).



**Figure 7** Dependence of cosmic ray variations on the asymptotic longitude of neutron monitors in the event on 4 October 1983.

#### 4. Conclusions

Twenty five Forbush decreases, which were associated to western-hemispheric solar flares and followed by geomagnetic storms, were chosen from a list of events throughout the period 1967–2006. We conclude that before geomagnetic storms and Forbush effects, which are caused by CMEs with a source in the western portion of the solar disk, precursors can be seen in galactic cosmic rays very often as a CRI pre-increase and pre-decrease in certain longitudes. The growing amplitude of the first harmonic of the cosmic ray anisotropy, which is determined by neutron monitor network data, is connected, as a rule, with the appearance of the precursor.

Sometimes the size of the precursor is so big and the CRI distribution is so unusual and specific that this precursor may serve to forecast a significant interplanetary disturbance arriving to Earth, even in the absence of other data.

**Acknowledgements** The authors thank all the data providers of the NMDB stations. This work is partly supported by Russian FBR grants 11-02-01478, Program No. 22 BR of the Presidium RAS “Fundamental processes of research and development of the Solar System”.

#### References

- Asipenka, A., Belov, A.V., Eroshenko, E., Mavromihalaki, H., Papailiou, M., Papaioannou, A., Oleneva, V., Yanke, V.G.: 2009, In: *Proc. 31st ICRC*. <http://www.nmdb.eu/?q=node/109>.
- Belov, A.V., Dorman, L.I., Eroshenko, E.A., Iucci, N., Villorresi, G., Yanke, V.G.: 1995, In: Iucci, N., Lamanna, E. (eds.) *Proc. 24th ICRC* **4**, 888.
- Belov, A.V., Bieber, J.W., Eroshenko, E.A., Evenson, P., Pyle, R., Yanke, V.G.: 2001, In: Droege, W., Kunow, H., Scholer, M. (eds.) *Proc. 27th ICRC* **9**, 3507.
- Belov, A., Baisultanova, L., Eroshenko, E., Mavromihalaki, H., Yanke, V., Pchelkin, V., Plainaki, C., Mariatos, G.: 2005, *J. Geophys. Res.* **110**, A09S20. doi:[10.1029/2005JA011067](https://doi.org/10.1029/2005JA011067).
- Dorman, L.I.: 2005, *Ann. Geophys.* **23**, 2997.
- Kudela, K., Storini, M.: 2006, *Adv. Space Res.* **37**, 1443.
- Leerunnavarat, K., Ruffolo, D., Bieber, J.W.: 2003, *Astrophys. J.* **593**, 587.
- Papailiou, M., Mavromihalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: 2012a, *Solar Phys.* **276**, 337.
- Papailiou, M., Mavromihalaki, H., Belov, A., Eroshenko, E., Yanke, V.: 2012b, *Solar Phys.* **280**, 641.

# Effect of geomagnetic disturbances on physiological parameters: An investigation on aviators

M. Papailiou<sup>a</sup>, H. Mavromichalaki<sup>a</sup>, K. Kudela<sup>b,\*</sup>, J. Stetiarova<sup>b</sup>, S. Dimitrova<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, University of Athens, Athens, Greece

<sup>b</sup> Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Science, Kosice, Slovakia

<sup>c</sup> Space and Solar – Terrestrial Research Institute (SSRI), Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Received 26 May 2011; received in revised form 9 July 2011; accepted 11 July 2011

Available online 20 July 2011

## Abstract

Over the last years the potential effect that the geomagnetic activity may have on human physiological parameters (such as heart rate, arterial diastolic and systolic pressure) is being widely investigated with irrefutable results. As it is suggested, human health can be affected by solar activity and related geophysical changes. In this study a group of 4018 Slovak aviators was examined from January 1, 1994 to December 31, 2002, covering periods with high solar and geomagnetic activity. Specifically, medical data of mean values of arterial diastolic and systolic blood pressure, which were registered during the medical examinations of the Slovak aviators, were related to daily variations of Dst and Ap geomagnetic indices. All subjects were men (from 18 to 60 years old) in good health. Statistical significance levels (*p*-values) of the effect of geomagnetic activity on the aforementioned parameters up to three days before and three days after the geomagnetic event were established using the statistical method ANalysis Of VAriance (ANOVA). Statistical analysis of the arterial blood pressure variations for different levels of geomagnetic activity revealed that geomagnetic changes are connected to variations of the human physiological parameters.

© 2011 COSPAR. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Geomagnetic activity; Geomagnetic storms; Heart rate; Blood pressure

## 1. Introduction

Many attempts have been made in order to define and analyse the relationship between geomagnetic activity (GMA) and space weather changes and human health. This new scientific field, which in the last few years is being enriched with more results, is called Clinical Cosmobiology (Stoupel, 2006a). Because this kind of research is complicated, since the responses of the human organism and the state of human health can be affected and influenced by many factors, relevant investigations were conducted in

different ways. Some studies used data collected from stations all over the world in a period of many years whereas others gathered data concerning specific time periods of high solar and geomagnetic activity. These data were correlated to medical data of either a specific group of people under examination or random samples of the population.

An analysis in Baku, Azerbaijan showed that the number of sudden cardiac deaths connected to daily levels of GMA and cosmic rays could be one of the regulating factors for human homeostasis (Stoupel et al., 2006b). Moreover after studying the distribution of the monthly death number for 192 months in Lithuania, a correlation between this number and cosmic ray activity and an inverse correlation with solar activity was found. Monthly GMA was significantly correlated with traffic accidents, ischemic heart disease/stroke ratio, and suicide victim number. Deaths from stroke, non cardiovascular causes, suicide, traffic

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [mpapahl@phys.uoa.gr](mailto:mpapahl@phys.uoa.gr) (M. Papailiou), [emavromi@phys.uoa.gr](mailto:emavromi@phys.uoa.gr) (H. Mavromichalaki), [kkudela@kosice.upjs.sk](mailto:kkudela@kosice.upjs.sk), [kkudela@upjs.sk](mailto:kkudela@upjs.sk) (K. Kudela), [stetiario@kosice.upjs.sk](mailto:stetiario@kosice.upjs.sk) (J. Stetiarova), [svetla\\_stil@abv.bg](mailto:svetla_stil@abv.bg) (S. Dimitrova).

accidents were related to cosmic ray activity and, inversely, to solar activity (Stoupelet et al., 2007a).

Furthermore the potential effects of geomagnetic indices variations on human health lead to a series of studies concerning the influence of local geomagnetic storms on arterial blood pressure (Dimitrova et al., 2004a,b). Arterial diastolic and systolic blood pressure increased significantly during strong local geomagnetic storms. It is interesting to mention that women and men reacted in different ways. Women showed more sensitivity to the geomagnetic fields' variations as did people under drug treatment, mainly hypertensive therapy (Dimitrova, 2008).

Geomagnetic field variations, like geomagnetic storms, can influence the human nervous system and therefore are connected to traffic accidents caused by anxiety and nervous reactions (Aschikaliev et al., 1995). Space weather conditions are not related to train accidents due to technical factors. On the other hand their relation to those due to human error is statistically significant (Dorman et al., 2001). Recently (Mendoza and Sánchez de la Peña, 2010) have indicated that at low latitudes there are biological responses to the solar/geomagnetic activity.

Moreover periodicities were found in the reported cardiovascular incidents and their relation to periodicities of geomagnetic phenomena of the solar cycle is being discussed (Cornelissen et al., 2005). Many studies correlate the myocardial infarctions incidents' and heart rhythms variations' to the periodicity of the solar activity (11 year cycle) and geomagnetic storms. An international project, called BIOCOS (BIOsphere and COSmos), is trying to monitor, register and analyse variations of human physiological parameters in different geographical locations and in relation to geomagnetic phenomena and solar activity (Cornelissen et al., 2002).

The influence of geomagnetic activity on the functionality of the human brain, human health and psycho-emotional state was investigated in the region of Baku (Babayev and Allahverdiyeva, 2007). It was confirmed that for middle latitude locations, human physiology and psychology is affected by geomagnetic disturbances. The same study concluded that anxiety, work and concentration ability could be influenced by GMA making it clear that comprehending the connection between space weather and human physiology is of great importance in order to prevent or treat physical or psychological diseases.

The effect of geomagnetic changes, cosmic ray intensity variations and solar activity has not only been studied on cardiobiological parameters but on other parameters of the human physiology as well. The mental performance or health state of aviation personnel is influenced by space weather conditions (Dzvonik et al., 2006). Values of heart rate in load are lower during periods of maximum solar activity in comparison to those during periods of minimum solar activity. The inverse results apply to arterial diastolic blood pressure. Recently several review papers on space weather effects have been published covering a wide area of subjects including also cosmic ray effects on health (e.g. Singh et al., 2011).

Three different scientific groups from Athens (Greece), Kosice (Slovakia) and Sofia (Bulgaria) have collaborated on the study of the potential effect of GMA on the physiological state of a group of aviators. Human physiological parameters (arterial diastolic and systolic blood pressure) were analyzed in relation to Dst- and Ap-geomagnetic indices variations for a time period of eight years.

## 2. Data and method

### 2.1. Medical data

The arterial diastolic (DP) and systolic (SP) blood pressure measurements used in this study refer to a group of 4018 Slovak aviators and were provided during their periodical medical checks at ground level. The group consisted only of men (from 18 to 60 years old), all in good health. Daily mean values of DP and SP (mmHg) in rest (without load) (DPR, SPR), DP and SP in 1st degree of load (DPFDL, SPFDL – sitting on a stationary bike and pedaling at a power of 50–100 W), DP and SP in 2nd degree of load (DPSDL, SPSDL – sitting on a stationary bike and pedaling at a power of 100–150 W), maximum DP and SP achieved by load (DPMAX, SPMAX – sitting on a stationary bike and pedaling at maximum power) were registered. Each physiological parameter value represents the mean daily value of all the aviators, who were examined during that day. On some days (weekends, holidays, etc.) no medical data were available. The total number of the days of measurements is equal to 1341. The data refer to the time period from January 1, 1994 until December 31, 2002.

### 2.2. Geomagnetic activity data

The GMA of the days, for which medical data were available, was also analyzed. Geomagnetic index Dst data were obtained from the World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Ap-index data were obtained from Space Weather Prediction Centre at NOAA, Boulder ([http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old\\_indices.html](http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html)). GMA was divided into five levels (I0, I, II, III, IV) according to Dst-index and Ap-index (Table 1). Dst-index variations for the time period under examination are shown in Fig. 1.

Table 1  
Ap- and Dst-index levels and the number of days.

Ap \ Dst levels	Dst-index values, nT	Number of days	Ap-index values	Number of days
I0	Dst $\geq$ 0	206	Ap < 8	615
I	-20 < Dst < 0	665	8 $\leq$ Ap < 15	349
II	-50 < Dst $\leq$ -20	390	15 $\leq$ Ap < 30	269
III	-100 < Dst $\leq$ -50	70	30 $\leq$ Ap < 50	78
IV	Dst $\leq$ -100	10	Ap $\geq$ 50	30

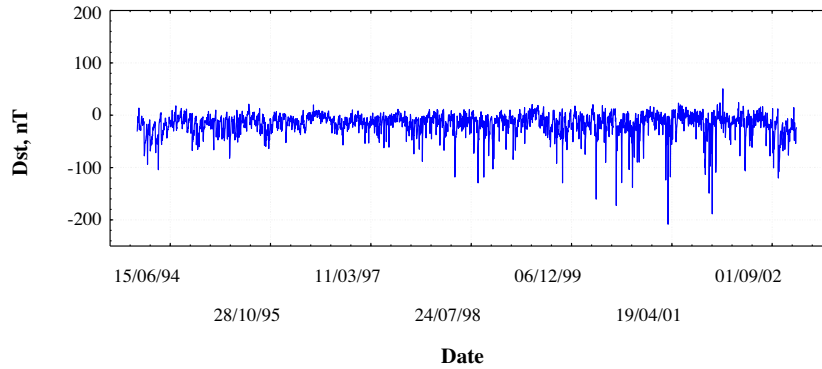


Fig. 1. Daily Dst-index (nT) variations during experiments period from January 1, 1994 to December 31, 2002.

2.3. Statistical methods

The statistical method the ANalysis of VAriance (ANOVA) (statistical package STATISTICA (ver. 6, Stat-Soft Inc., 2001), was applied to establish statistical significance levels (*p*) of the effect of GMA levels on the DP and SP parameters. The effect of GMA up to three days before and after the respective events on the examined parameters was also investigated by the help of ANOVA and superimposed epoch method. Significance levels *p*-values were calculated for the days before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms. The chosen level for statistical significance in the used data analysis software system STATISTICA is set to  $p < 0.05$  and the same value is used for interpreting the results.

3. Results

ANOVA was used for obtaining the significance levels (*p*-values) of the effect of GMA level on DP and SP for the days before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms. Table 2 shows *p*-values for Dst-index effect and Table 3 *p*-values for Ap-index effect on the parameters under examination.

The main effects of GMA levels on day 0 were not statistically significant as it can be seen from Tables 2 and 3 except for the effect of Ap-index on SPMAX. In most of the cases some decrease (small in value) of the physiological parameters with GMA increase, more particularly for

level III and IV was observed. Examples are Figs. 2 and 3, which show variations of SPSDL and DPFDL regarding Dst-index and respectively dynamic of SPR and DPR regarding Ap-index. However further analyses regarding the days of the storms revealed interesting results. It turned out that in most of the cases usually before and during geomagnetic storms physiological parameters sharply decreased and after that they sharply increased.

Table 2 shows that all of the examined parameters were statistically significantly affected on +3rd day of geomagnetic storms, estimated by Dst-index, and DPSDL was affected on +1st day as well.

Further analyses revealed that SPFDL, SPSDL, SPMAX, DPSDL, DPMAX for level IV decreased significantly from –1st till 0 day and after that increased sharply from +1st day till +2nd day. Afterwards on +3rd day the blood pressure parameters were normalized. For level III the decrease and increase were delayed by one day. An example for these variations is presented in Fig. 4, which shows dynamic of SPMAX in dependence of Dst-index classification for different geomagnetic storms and days. In some of the cases like variations of SPR, DPR (Fig. 5) and DPFDL there were just peak increases and decreases on the different days for level IV and III but the trend for obtaining minimal values during IV level on –1st day and maximal values on +2nd day of IV level and again on +3rd day of III level was kept.

Table 3 shows that SPMAX was statistically significantly affected on 0 day and +1st day of geomagnetic

Table 2

Significance levels (*p*-values) of Dst effect on the physiological parameters for the days before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms (results marked with \*) are statistically significant).

Day	<i>p</i> -Values (Dst)							
	DPR	DPMAX	DPFDL	DPSDL	SPR	SPMAX	SPFDL	SPSDL
–3	0.69359	0.18878	0.56501	0.54967	0.28007	0.33845	0.52260	0.25511
–2	0.61007	0.29944	0.40561	0.52146	0.15888	0.13661	0.27832	0.44135
–1	0.09098	0.46883	0.61261	0.36882	0.18042	0.51424	0.41089	0.41301
0	0.34181	0.50361	0.35710	0.52160	0.77808	0.19865	0.42493	0.64462
+1	0.27568	0.13068	0.10520	0.01404*	0.27445	0.19175	0.76355	0.37106
+2	0.13525	0.23740	0.31969	0.56027	0.17498	0.16290	0.45766	0.36437
+3	0.00205*	0.00005*	0.02729*	0.00739*	0.00930*	0.01096*	0.00639*	0.01048*

Table 3

Significance levels (*p*-values) of Ap effect on the physiological parameters for the days before (+), during (0) and after (–) geomagnetic storms (results marked with (\*) are statistically significant).

Day	<i>p</i> -Values (Ap)							
	DPR	DPMAX	DPFDL	DPSDL	SPR	SPMAX	SPFDL	SPSDL
–3	0.80659	0.32021	0.55846	0.39388	0.71725	0.71176	0.84320	0.75778
–2	0.95352	0.77508	0.87058	0.53198	0.57445	0.59295	0.96877	0.51069
–1	0.08259	0.57159	0.48158	0.56111	0.07149	0.68977	0.40236	0.46797
0	0.19515	0.89386	0.51358	0.71292	0.30602	0.00741*	0.51190	0.19558
+1	0.94179	0.76291	0.77119	0.46628	0.50420	0.04754*	0.84703	0.68301
+2	0.47109	0.55006	0.36854	0.25280	0.23089	0.97438	0.25678	0.27234
+3	0.78762	0.37157	0.77563	0.34515	0.20386	0.58176	0.67002	0.96683

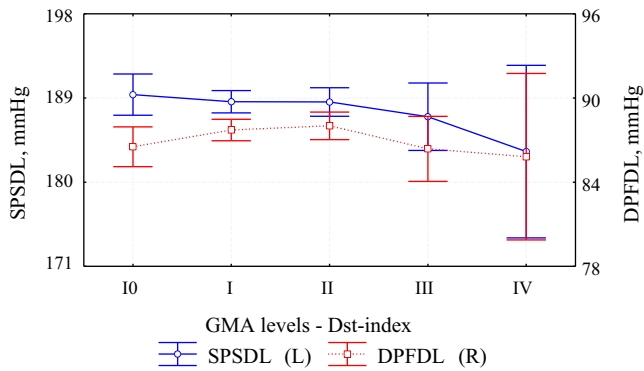


Fig. 2. GMA effect, estimated by Dst-index, on SPSDL and DPFDL (date 0) ( $\pm 95\%$  CI).

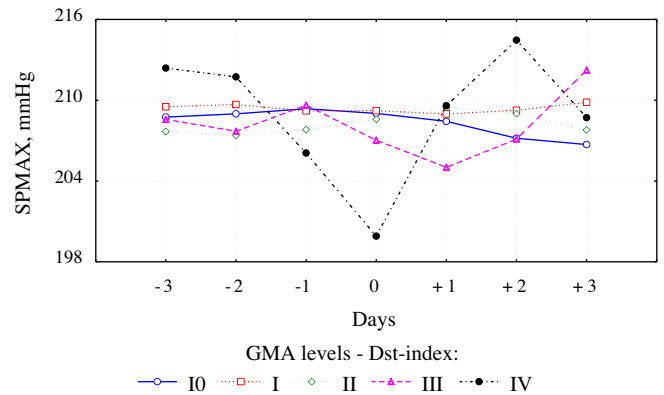


Fig. 4. GMA effect, estimated by Dst-index, on SPMAX before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms.

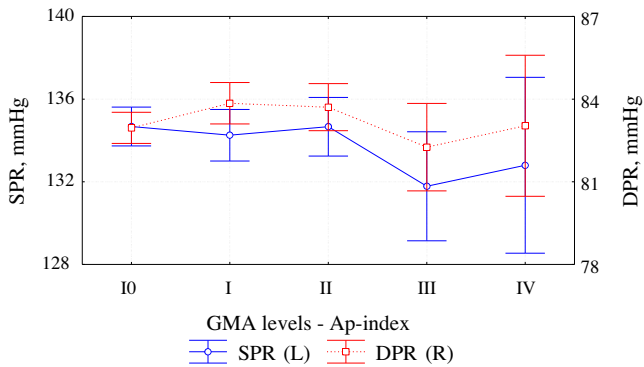


Fig. 3. GMA effect, estimated by Ap-index, on SPR and DPR (date 0) ( $\pm 95\%$  CI).

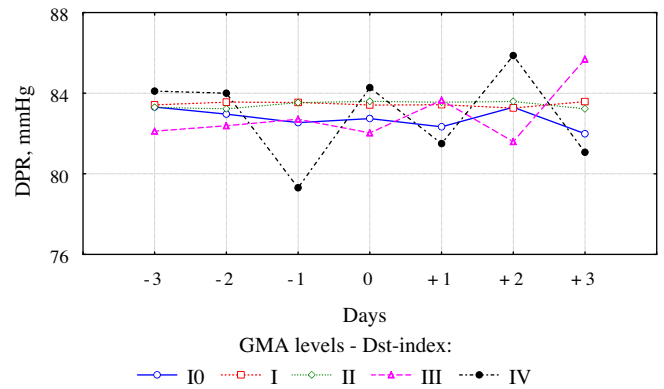


Fig. 5. GMA effect, estimated by Dst-index, on DPR before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms.

storms, estimated by Ap-index. It was established that SPMAX values decreased statistically significantly with the increase of GMA on these particular days. Its variations are shown in Fig. 6. It can be seen from the figure that SPMAX sharply decreased from –1st till 0 day for level IV of the Ap-index classification and then sharply increases after day +1.

Similar variations were established for the other physiological parameters regarding Ap-index and they resemble dynamics regarding Dst-index. It concerns especially SP parameters. DP parameters variations had mainly peak

increases and decreases. Interesting dynamic was observed for DPFDL (Fig. 7). Additionally to the peak values on the different days for IV level DPFDL had peak increases on 0 day for most of the GMA levels.

#### 4. Discussion and conclusion

The relationship between solar, geomagnetic and cosmic ray activity and changes in human physiological state has been widely investigated. Stoupel (1999) has published a series of studies concerning the changes in the way a human



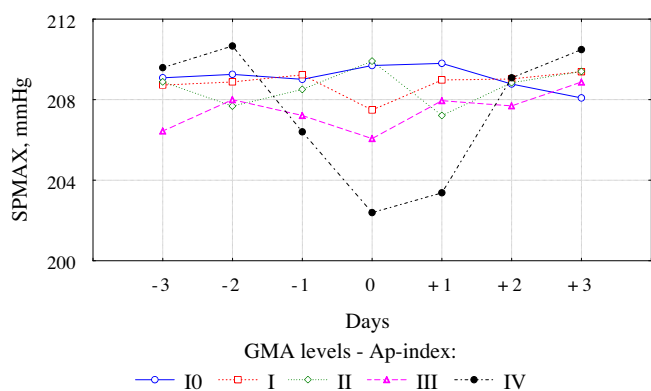


Fig. 6. GMA effect, estimated by Ap-index, on SPMAX before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms.

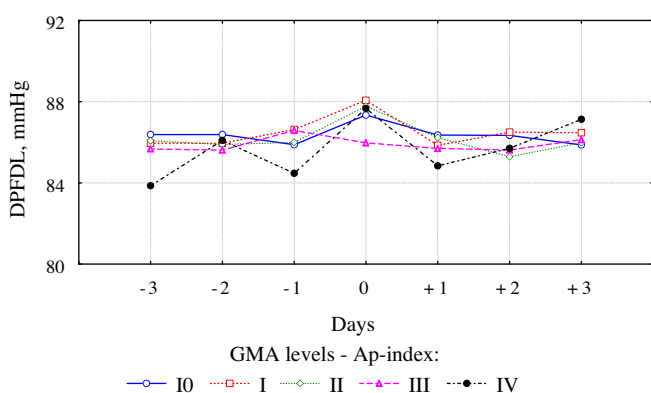


Fig. 7. GMA effect, estimated by Ap-index, on DPFDL before (–), during (0) and after (+) geomagnetic storms.

organism responds to different levels of daily and monthly GMA. As it is mentioned in Stoupel et al. (2006b) the analysis of data concerning the daily and monthly temporal distribution of sudden cardiac death in the Baku area showed that sudden cardiac death mortality is higher on the highest and lowest daily levels of GMA, while the monthly number of sudden cardiac mortality is inversely related to solar and geomagnetic activity.

According to a research performed in Kaunas registry for 204 consecutive months the monthly number of acute myocardial infarctions correlates with solar, geomagnetic and cosmic ray activity. This relationship is stronger in women (Stoupel et al., 2005). Similar results are also mentioned in Stoupel et al. (2007b) for the Baku area during the period 2003–2005. The monthly number of acute myocardial infarctions was inversely related to monthly solar activity and correlated with cosmic ray activity.

Furthermore more recent studies focus on the influence of the human cardiovascular functionality, through changes of physiological parameters, such as arterial blood pressure, heart rate, heart rate variability, etc. (Babayev and Allahverdiyeva, 2007; Mavromichalaki et al., 2008, 2009; Dimitrova et al., 2009a; Papailiou et al., 2009, 2010).

In previous investigations, during periods of high GMA, arterial diastolic and systolic blood pressure increased during intense GMA whereas results concerning heart rate were not statistically significant (Usenko et al., 1989; Ghione et al., 1998; Dimitrova et al., 2004a; Dimitrova, 2008). Usenko et al. (1989) studied a group of pilots and obtained results which showed a significant increase of systolic blood pressure and heart rate during years of maximal solar activity in comparison with years of minimal solar activity. Furthermore decrease in parameters of heart rate variability has also been found for periods of high GMA (Baevsky et al., 1997; Cornelissen et al., 1999; Otsuka et al., 2001; Stoilova and Dimitrova, 2008; Dimitrova et al., 2009b).

In this study the effect of GMA, through variations of the Ap and Dst geomagnetic indices, on the physiological parameters of aviators was examined with interesting results. High GMA levels (when geomagnetic storms occur) are associated to variations in DP and SP. The physiological parameters under study seem to take their minimum value for Ap- and Dst- indices levels III and IV on the days of geomagnetic storms. Results, concerning the variations of the parameters on the days before and after geomagnetic storms according to the Ap- and Dst-indices classification, show that mainly for levels III and IV a sharp decrease, noticed on the days before or during the geomagnetic storms, is usually followed by a sharp increase on the days after the storms and then the parameters decrease again. In some cases peak increases and decreases on different days for the same levels of GMA are registered. The first trend concerns mainly SP parameters, while the second refers to DP parameters.

This reaction of the physiological parameters under examination for most of the cases is according to the General Adaptation Syndrome theory by Hans Selye (Selye, 1956). The typical reaction of the human organism to any lasting stress-factor (the non-specific stress-response) consists of three stages. During the first stage (Alarm), the body's physiological system drop below optimal functioning. The second stage (Resistance) is characterized by peak-capacity work of the physiological compensatory systems at the levels above homeostatic. After the organism's energy depletion, the Exhaustion stage starts and physiological parameters drop. This stage is the most dangerous for the organism, as it cannot continuously resist to environmental stressors. The body becomes susceptible to any disease. All the complaints of the patients and ambulance calls usually correspond to this stage (Khabarova and Dimitrova, 2009). Similar results were obtained for blood pressure of persons examined in Sofia and Moscow. A decrease of blood pressure prior both to weather and space weather changes, an increase during and after the environmental changes and sharp decrease after the events was established (Khabarova and Dimitrova, 2009). The results in the presented study confirm again the potential effects of GMA on human physiological state but show, as it was pointed out in the last mentioned reference, that it is a

necessary adaptation reaction and not something exceptional according to the General Adaptation Syndrome.

## Acknowledgements

We thankfully acknowledge the contribution of the medical staff and aviators who participated in the examinations. K. Kudela wishes to acknowledge support of grant agency VEGA, Project 2/0081/10.

## References

- Aschikaliev, Y.F., Drobjev, V.I., Somsikiv, V.M., Turkeeva, V.A., Yakovets, T.K. Influence of heliogeophysical parameters on ecology. *Biofizika (Biophysics)* 40, 1031–1037, 1995.
- Babayev, E.S., Allahverdiyeva, A.A. Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies. *Adv. Space Res.* 40, 1941–1951, 2007.
- Baevsky, R.M., Petrov, V.M., Cornelissen, G., Halberg, F., Orth-Gomer, K., Akerstedt, T., Otsuka, K., Breus, T., Siegelova, J., Dusek, J., Fiser, B. Meta-analyzed heart rate. Variability exposure to geomagnetic storms, and the risk of ischemic heart disease. *Scripta Med.* 70, 201–206, 1997.
- Cornelissen, G., Halberg, F., Schwartzkopff, O., Delmore, P., Katinas, G., Hunter, D., Tarquini, B., Tarquini, R., Perfetto, F., Watanabe, Y., Otsuka, K. Chronomes, time structures, for chronobioengineering for 'a full life'. *Biomed. Instrum. Technol.* 33, 152–187, 1999.
- Cornelissen, G., Halberg, F., Breus, T., Syytkina, E., Baevsky, R., Weydahl, A., Watanabe, Y., Otsuka, K., Siegelova, J., Fiser, B., Bakken, E. Non-photic solar associations of heart rate variability and myocardial infarction. *JASTP* 64, 707–720, 2002.
- Cornelissen, G., Halberg, F., Kovac, M., Mikulecky, M., Otsuka, K., Bakken, E. Geographic and extraterrestrial aspects of morbidity and/or mortality patterns from myocardial infarction and stroke. *Biomed. Pharmacother.* 59, 68–75, 2005.
- Dimitrova, S., Stoilova, I., Cholakov, I. Influence of local geomagnetic storms on arterial blood pressure. *Bioelectromagnetics* 25, 408–414, 2004a.
- Dimitrova, S., Stoilova, I., Yanev, T., Cholakov, I. Effect of local and global geomagnetic activity on human cardiovascular homeostasis. *Arch. Environ. Health: Int. J.* 59, 84–90, 2004b.
- Dimitrova, S. Different geomagnetic indices as an indicator for geoeffective solar storms and human physiological state. *JASTP* 70, 420–427, 2008.
- Dimitrova, S., Angelovm, I., Petrova, E. A case study of possible effects of geomagnetic activity and mobile phones on heart rate variability. *Medical Data: Med. Rev.* 1, 13–16, 2009a.
- Dimitrova, S., Mustafa, F.R., Stoilova, I., Babayev, E.S., Kazimov, E.A. Possible influence of solar extreme events and related geomagnetic disturbances on human cardio-vascular state: results of collaborative Bulgarian-Azerbaijani studies. *Adv. Space Res.* 43, 641–648, 2009b.
- Dorman, L.I., Iucci, N., Ptitsyna, N.G., Villaresi, G. Cosmic ray as indicator of space weather influence on frequency of infract myocardial, brain strokes, car and train accidents, in: *Proceedings of the 27th ICRC (Hamburg)*, pp. 3511–3514, 2001.
- Dzvonik, O., Stetiarova, J., Kudela, K., Daxner, P. A monitoring of space weather effects on some parameters of mental performance and health in aviation personnel. *Stud. Psychol.* 48, 273–292, 2006.
- Ghione, S., Mezzasalma, L., Del Seppia, C., Papi, F. Do geomagnetic disturbances of solar origin affect arterial blood pressure? *J. Hum. Hypertens.* 12, 749–754, 1998.
- Khabarova, O.V., Dimitrova, S. On the nature of people's reaction to space weather and meteorological weather changes. *Sun Geosphere* 4, 60–71, 2009.
- Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mustafa, F.R. Geomagnetic disturbances and cosmic ray variations in relation to human cardio-health state: a wide collaboration, in: *Proceedings of the 21st ECRS (Kosice)*, pp. 351–356, 2008.
- Mavromichalaki, H., Papailiou, M., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S. Physiological state of Slovak aviators in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray intensity variations, in: *Proceedings of the 31st ICRC (Lodz) icrc0673*, 2009.
- Mendoza, B., Sánchez de la Peña, S. Solar activity and human health at middle and low geomagnetic latitudes in Central America. *Adv. Space Res.* 46, 449–459, 2010.
- Otsuka, K., Cornelissen, G., Weydahl, A., Holmeslet, B., Hansen, T.L., Shinagawa, M., Kubo, Y., Nishimura, Y., Omori, K., Yano, S., Halberg, F. Geomagnetic disturbance associated with decrease in heart rate variability in a Subarctic Area. *Biomed. Pharmacother.* 55, 51–56, 2001.
- Papailiou, M., Dimitrova, S., Babayev, E.S., Mavromichalaki, H. Analysis of changes of cardiological parameters at middle latitude region in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray variations, in: *(AIP) Conference Proceedings*, vol. 1203, ISBN 978-0-7354-0740-4, pp. 748–753, 2009.
- Papailiou, M., Mavromichalaki, H., Kudela, K., Stetiarova, J., Dimitrova, S. The effect of cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators. *ASTRA*, in press, 2010.
- Selye, H. *The Stress of Life*. McGraw-Hill, New York, 1956.
- Singh, A.K., Singh, D., Singh, R.P. Impact of galactic cosmic rays on Earth's atmosphere and human health. *Atmos. Environ.* 45 (23), 3806–3818, 2011.
- Stoilova, I., Dimitrova, S. Geophysical variables and human health and behavior. *JASTP* 70, 428–435, 2008.
- Stoupel, E. Effect of geomagnetic activity on cardiovascular parameters. *J. Clin. Basic Cardiol.* 2, 34–40, 1999.
- Stoupel, E., Domarkiene, S., Radishauskas, R., Israelevich, P., Abramson, E., Sulkes, J. In women myocardial infarction occurrence is much stronger related to environmental physical activity than in men – a gender or an advanced age effect? *J. Clin. Basic Cardiol.* 8, 59–60, 2005.
- Stoupel, E. Cardiac Arrhythmia and geomagnetic activity. *Indian Pacing Electrophysiol. J.* 6, 49–53, 2006a.
- Stoupel, E., Babayev, E.S., Mustafa, F.R., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J. Clinical Cosmobiology – sudden cardiac death and daily/monthly geomagnetic, cosmic ray and solar activity – the Baku study (2003–2005). *Sun Geosphere* 1, 13–16, 2006b.
- Stoupel, E., Kalediene, R., Petrauskiene, J., Starkuviene, S., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J. Monthly deaths number and concomitant environmental physical activity: 192 months observation (1990–2005). *Sun Geosphere* 2, 78–83, 2007a.
- Stoupel, E., Babayev, E., Mustafa, F., Abramson, E., Israelevich, P., Sulkes, J. Acute myocardial infarction occurrence: environmental links – Baku 2003–2005 data. *Med. Sci. Monit.* 13, 175–179, 2007b.
- Usenko, G.A., Deriapa, N.R., Kopanev, S.I., Panin, L.E. Influence of the heliogeophysical factors on some professional and physiological functions of the Sibir's pilots, in: *Biophysical and Clinical Aspects of Heliobiology*. House Nauka, Leningrad, pp. 52–65, 1989.

## Cosmic radiation influence on the physiological state of aviators

M. Papailiou · H. Mavromichalaki · K. Kudela ·  
J. Stetiarova · S. Dimitrova

Received: 1 August 2011 / Accepted: 1 December 2011 / Published online: 16 December 2011  
© Springer Science+Business Media B.V. 2011

**Abstract** Aviation personnel exposure to cosmic radiation and its biological effects has been an interesting subject for research over the last decade. In this study, scientific groups from Greece, Slovakia, and Bulgaria collaborated in order to examine the potential effects of cosmic radiation on the cardiovascular functionality of a group of Slovak aviators. Specifically, daily data concerning mean values of arterial diastolic and systolic blood pressure, which were registered during the medical examinations of the group of aviators, were related to daily variations of cosmic ray intensity, as measured by the Neutron Monitor Station on Lomnický štít. Statistical methods (analysis of variance—ANOVA and method of superimposed epochs) were applied in order to establish a statistical significance (*p*-values) of the effect of cosmic ray intensity variations on the aforementioned physiological parameters not only on the days of the events but also on the days preceding and following these events. Results reveal that diastolic and systolic blood pressure can be influenced by changes in cosmic ray activity.

**Keywords** Cosmic ray intensity · Cosmic ray decreases · Heart rate · Blood pressure

---

M. Papailiou · H. Mavromichalaki  
Nuclear and Particle Physics Section, Department of Physics, University of Athens, Athens, Greece  
e-mail: mpapahl@phys.uoa.gr

H. Mavromichalaki  
e-mail: emavromi@phys.uoa.gr

K. Kudela (✉) · J. Stetiarova  
Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Science, Kosice, Slovakia  
e-mail: kkudela@kosice.upjs.sk

J. Stetiarova  
e-mail: stetiario@kosice.upjs.sk

S. Dimitrova  
Space and Solar-Terrestrial Research Institute (SSRI), Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
e-mail: svetla\_stil@abv.bg

## 1 Introduction

Cosmic rays are high energy particles (protons,  $\alpha$  particles, and other heavier nuclei) that come from either the galactic or extragalactic area. According to its origin, cosmic radiation is divided to galactic cosmic rays and solar cosmic rays. Galactic cosmic rays come in permanently even though their intensity is modulated by solar activity. Solar cosmic rays, which consist of particles accelerated at the Sun, are more sporadic and are handled as individual events, on top of the usual particle flux from the remote Universe.

Once cosmic rays enter the upper atmosphere and before hitting the ground, they collide with atoms creating the secondary cosmic rays (protons, neutrons, muons, and electrons) that can be detected by ground-based particle counters. A large worldwide network of ground-based counters (neutron monitors) is used for measuring the neutron component (<http://www.nmdb.eu>).

To make a study of cosmic rays is of great importance, since they can provide a tool for exploring and understanding the Universe and its mechanisms but they can also directly affect the Earth. Moreover, not only the performance and reliability of space-borne or ground-based technological systems can be influenced during strong cosmic ray intensity (CRI) events but also human life. A recent review on the subject can be found, e.g., in paper (Singh et al. 2011).

The effect that CRI variations and geomagnetic activity (GMA) may have on the functionality of the human organism was already known a long time ago (Villoresi et al. 1994a, b; Ptitsyna et al. 1996, 1998; Dorman et al. 1999), but over the last years, many interesting studies have been carried out with remarkable results (Cornelissen et al. 2002; Dzvonič et al. 2006; Stoupel et al. 2007a, b; Dimitrova et al. 2009; Mavromichalaki et al. 2009; Papailiou et al. 2009).

Although the anticorrelation between the CRI and solar activity is very well known, and indications about solar activity and connected geomagnetic activity in the aspect of health are widely discussed in literature (e.g., recently by Mendoza and Sánchez de la Pena 2010; Diaz-Sandoval et al. 2011), there is some motivation to study the possible relationships between the CRI at Earth and health parameters too, namely due to the facts that (1) cross-correlation between cosmic ray time series and solar activity has extremum not exactly in time lag 0 and it is changing over long time periods (e.g., Usoskin et al. 2001 among others), and (2) Forbush decreases are not “one to one” with the Dst strong depression (e.g., Kudela and Brenkus 2004; Kane 2010).

Dorman et al. (1999) have shown that Forbush decreases (FDs) are the most sensitive indicators of the relationship between geomagnetic disturbances and health parameters like the number of incidences of ischemic and brain strokes, myocardial infarctions, and traffic accidents. Dorman et al. (2001) and Stoupel (2002) have shown that cardiovascular diseases are affected by space weather long-term (solar activity) but also short-term (FDs) parameters.

According to Stoupel et al. (2007a), the number of acute myocardial infarctions is correlated with cosmic ray activity. This was a result of a study conducted in the Baku area using acute myocardial infarctions data from 21 first aid stations during the years 2003–2005. Moreover, higher cosmic ray activity is predominant for acute myocardial infarction occurrence and pre-admission mortality (Stoupel et al. 2007a).

Another study concerning the monthly deaths distribution in a period of 192 months in the Republic of Lithuania in relation to solar, geomagnetic, and cosmic ray activity is the topic studied in Stoupel et al. (2007b). It is shown that cosmic ray activity is significantly correlated with monthly deaths number (total, stroke, non cardiovascular, and suicides) and

inversely correlated with monthly number of traffic accidents and is also related to monthly deaths' distribution.

This study is a result of a wide collaboration between three different scientific groups from Athens (Greece), Kosice (Slovakia), and Sofia (Bulgaria). The results that are being presented concern the potential influence CRI variations may have on the human physiological state through the variations of physiological parameters such as arterial systolic pressure (SP) and arterial diastolic pressure (DP).

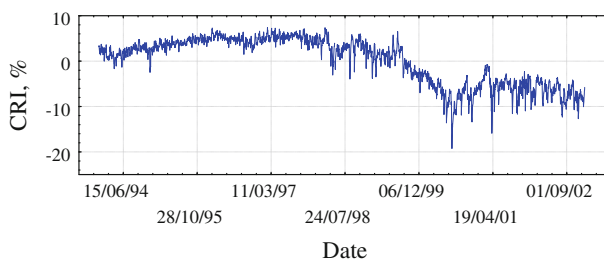
## 2 Data and method

### 2.1 Cosmic ray data

Pressure corrected daily data of CRI were obtained from Lomnický štít Neutron Monitor (SNM-15) of the Department of Space Physics, Institute of Experimental Physics, Kosice, Slovakia (<http://neutronmonitor.ta3.sk/realtime.php3>). This station is located at 2634 m above sea level and detects particles with a cut-off rigidity of 3.84 GV. It has been operational since December 1981 providing high-quality data (archive, current data) through the Internet in digital form (<http://neutronmonitor.ta3.sk/>). CRI variations for the time period under examination are shown in Fig. 1. The largest decrease (−16%) was registered on April 12, 2001. The normalized CRI variations were calculated using the relation  $\frac{I_i - I_{mean}}{I_{mean}}$ , where  $I_i$  is the hourly CRI and  $I_{mean}$  is the average CRI for the time period under consideration. In this way, no further corrections due to long- or short-term cosmic ray modulation, such as solar cycle variation or FDs, which can possibly influence the average DP and SP, were necessary. Cosmic ray activity was divided into six levels (−3, −2, −1, 0, +1, and +2) according to CRI (Table 1).

### 2.2 Medical data

The DP and SP measurements used in this study refer to a group of 4018 Slovak aviators and were provided during their periodical medical checks at ground level. The group consisted only of men (from 18 to 60 years old), all in good health state according to the requirements for the aviators staff. Daily mean values of DP and SP (mmHg) for the group were registered. More specifically, the measured parameters were as follows:



**Fig. 1** Normalized daily CRI variations during the experiments period from January 1, 1994 to December 31, 2002

**Table 1** CRI levels and the corresponding number of days

CRI levels	CRI (%)	Number of days
-3	$-16 \leq \text{CRI} \leq -11$	25
-2	$-11 < \text{CRI} \leq -6$	271
-1	$-6 < \text{CRI} \leq -1$	273
0	$\text{CRI} = 0$	32
1	$1 \leq \text{CRI} \leq 4$	435
2	$4 < \text{CRI} \leq 8$	305

- DP and SP in rest without load (DPR and SPR);
- DP and SP in 1st degree of load (DPFDL and SPFDL—sitting on a stationary bike and pedaling at a power of 50–100 Watts);
- DP and SP in 2nd degree of load (DPSDL and SPSDL—sitting on a stationary bike and pedaling at a power of 100–150 Watts);
- Maximum DP and SP achieved by load (DPMAX and SPMAX—sitting on a stationary bike and pedaling at maximum power).

Each physiological parameter value represents the mean daily value of all the aviators, who were examined during that day. On some days (weekends, holidays, etc.), no medical data were available. The total number of the days of measurements is equal to 1341. The data refer to the time period from January 1, 1994 until December 31, 2002.

### 2.3 Statistical method

The statistical method, the *ANalysis Of VAriance* (ANOVA), (statistical package STATISTICA (ver.6, StatSoft Inc., 2001), was applied to establish statistical significance levels ( $p$ ) of the effect of CRI variations on the DP and SP parameters. The effect of CRI variations up to 3 days before and after the respective events (CRI decreases and increases) on the examined parameters was also investigated by the help of ANOVA and superimposed epoch method. The chosen level for statistical significance in the used data analysis software system STATISTICA is set to  $p < 0.05$ , and the same value is used for interpreting the results.

## 3 Results

Diastolic pressure and systolic pressure variations have been analyzed in regard to CRI variations. ANOVA was used for obtaining the significance levels ( $p$ -values) of the effect of the percentage of CRI variations on the DP and SP parameters.  $p$ -values were calculated for the days before (–), during (0), and after (+) CRI variations.

Table 2 shows  $p$ -values for CRI effect on all the parameters under study. For SP parameters, only SPFDL was statistically significantly affected by CRI variations on all of the days before (–), during (0), and after (+) the event, while SPMAX was affected only during and before the event (days 0, –1st, and –3rd). Furthermore, for DP parameters, statistically significant results were obtained only for DPSDL (except on day 0) and DPFDL (for day 0).

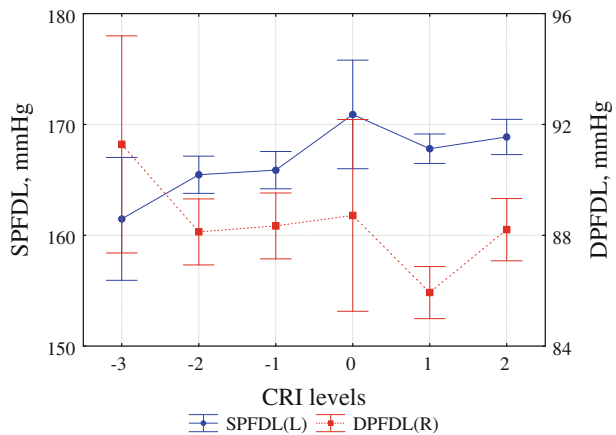
SPFDL and DPFDL variations in relation to CRI levels (as they were gradated in Table 1) are shown in Fig. 2. As it is seen, SPFDL decrease is associated with strong CRI

**Table 2** Significance levels (*p*-values) of CRI effect on the physiological parameters under study for the days before (–), during (0), and after (+) CRI variations

Day	<i>p</i> -values (CRI)							
	SPR	SPMAX	SPFDL	SPSDL	DPR	DPMAX	DPFDL	DPSDL
–3	0.36380	0.02550*	0.00385*	0.63225	0.35838	0.05468	0.42203	0.00196*
–2	0.31961	0.09411	0.01305*	0.86791	0.39709	0.32002	0.44713	0.00633*
–1	0.29558	0.00166*	0.00385*	0.33590	0.28481	0.08942	0.34159	0.00907*
0	0.47034	0.04547*	0.00326*	0.28520	0.58137	0.18252	0.00183*	0.11839
+1	0.52325	0.23876	0.00602*	0.82745	0.53935	0.15069	0.12549	0.00073*
+2	0.69084	0.23215	0.00559*	0.76853	0.38358	0.31278	0.33813	0.00197*
+3	0.62430	0.05270	0.00421*	0.97634	0.27194	0.44875	0.39805	0.01767*

Results marked with <\*> are statistically significant

**Fig. 2** CRI variations effect on SPFDL and DPFDL (date 0) (±95% CI)

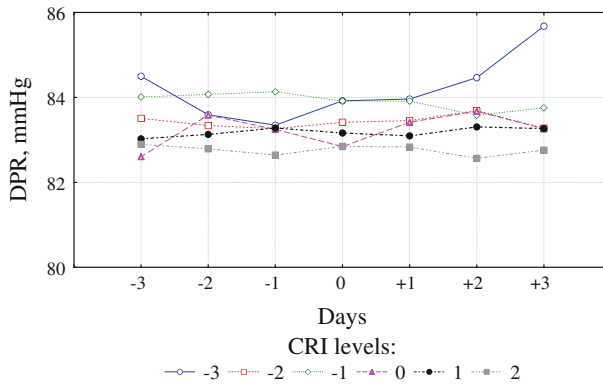


decreases. A similar behavior is also noticed for the rest of the SP parameters under study (SPR, SPMAX, and SPSDL). Their minimum values are noticed for levels –2 and –3 of the CRI gradation. On the other hand, DPFDL maximum value is obtained during strong CRI events (level –3) as it is seen in Fig. 2. The same effect is also noted for DPR, DPMAX, and DPSDL.

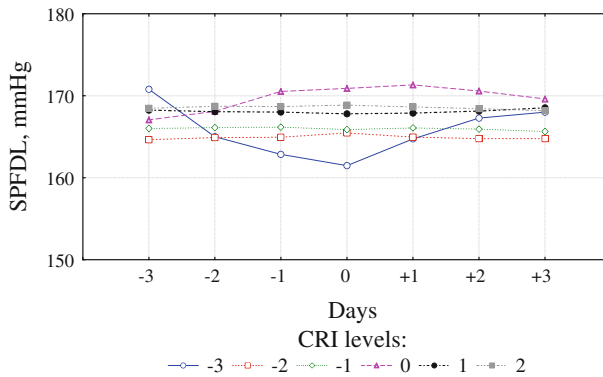
DPR and SPFDL vary significantly on the days before (–3rd, –2nd, and –1st), during (0), and after (+1st, +2nd, and +3rd) CRI decreases (levels –3, –2, –1, 0, 1, 2 according to the CRI classification) as it is shown in Figs. 3 and 4, respectively.

Regarding DPR, strong variations were noticed mostly for level –3 (the biggest registered CRI decreases), described by the CRI classification (Fig. 3). DPR decreased on –2nd and –1st days before the CRI event and increased from there on until +3rd day after the event. The same decrease on –2nd day before the event is also noticed for parameters DPMAX, DPFDL, and DPSDL. However, the increase phase for parameters DPMAX and DPFDL is completed on day 0, whereas for DPSDL, the increase lasts until day +2nd (similar to DPR).

The dynamic of SPFDL in dependence of CRI classification for different CRI variations and days is shown in Fig. 4. SPFDL changes are more pronounced mostly for level –3 of



**Fig. 3** CRI effect on DPR before (–), during (0), and after (+) the corresponding variations



**Fig. 4** CRI effect on SPFDL before (–), during (0), and after (+) the corresponding variations

the CRI classification. Minimum value of SPFDL, for level –3 of the CRI classification, was noticed on the day of the event (day 0). This physiological parameter decreased from –2nd day until day 0 and increased from there on until +3rd day after the event. The same behavior is also noticed for SPR, SPSDL, and SPMAX.

#### 4 Discussion and conclusions

The effects of geomagnetic and cosmic ray activity on the SP and DP parameters, for the specific group of aviators, were examined separately since geomagnetic storms and FDs are two phenomena that are connected but could also evolve independently (Kudela and Brenkus 2004; Kane 2010). FDs are created by disturbances in the heliosphere, while Dst variations depend on the local situation in the magnetotail near the Earth (Kane 2010). Usually, high cosmic ray activity (strong decreases in CRI) is related to strong GMA (corresponding Dst depressions); however, as it is already mentioned, CRI decreases are not always accompanied by strong GMA variations and, respectively, large Dst depressions are not marked by CRI decreases (Kudela and Brenkus 2004).



In a previous study by Papailiou et al. (2011b), the results concerning SP and DP behavior during strong geomagnetic storms, for the same group of aviators, were presented. In order to estimate GMA, daily values of the geomagnetic indices Ap and Dst were used and classified into four levels. As it was shown, the SP parameters decreased for high GMA (levels III and IV of the Ap- and Dst-indices classification), which is in agreement with the decrease in these parameters during strong CRI decreases. However, for the DP parameters, results are not so clear since these parameters decrease during high GMA (levels III and IV of the Ap- and Dst-indices classification) but increase during strong CRI decrease (levels  $-3$  and  $-2$  for the CRI classification). Concerning the behavior of SP and DP parameters on the days before, during, and after strong geomagnetic storms and large CRI decreases, a decrease in these parameters on the days before strong events is usually followed by an increase in the days after the events, apart from cases where peak increases and decreases on different days for the same levels of GMA were registered, mostly for DP parameters.

There is an increasing number of studies connecting human health state to space weather parameters (Cornelissen et al. 2002; Stoupel 2006; Babayev and Allahverdiyeva 2007; Dimitrova et al. 2009). A large amount of these investigations focuses mainly on the influence cosmic ray activity may have on the human physiological state (Stoupel et al. 2007a, b; Mavromichalaki et al. 2009; Papailiou et al. 2009, 2011a) since cosmic ray activity could be considered as one of the regulating external/environmental factors in human homeostasis (Stoupel et al. 2006).

The most important results are not only those concerning cardiovascular diseases and diseases of the nervous system, especially strokes, myocardial infarctions, and traffic accidents (Villoresi et al. 1994a, b; Ptitsyna et al. 1996, 1998; Dorman et al. 1999) but also those concerning human physiological parameters variations such as heart rate and arterial systolic and diastolic pressure (Dimitrova 2008; Dimitrova et al. 2009; Papailiou et al. 2011a). More specifically, in Dimitrova (2008), a group of 86 volunteers was examined during periods of high solar and geomagnetic activity. It was shown that CRI decrease was associated with mean arterial systolic and diastolic blood pressure, pulse pressure, and subjective psycho-physiological complaints increase, while in Papailiou et al. (2011a), CRI decrease is associated with heart rate decrease.

Stoupel et al. (2005) have shown that the monthly number of acute myocardial infarctions is significantly related to cosmic ray (positive correlation) and solar and geomagnetic (negative correlation) activity. Moreover, the sudden cardiac death mortality has also been investigated in relation to periodical changes of solar, geomagnetic, and cosmic ray activity (Stoupel et al. 2006). As it was revealed, days with increased number of sudden cardiac deaths were accompanied by higher cosmic ray activity. Additionally, the monthly number of sudden cardiac deaths was positively linked to cosmic ray activity level.

Monthly data of myocardial infarctions, brain strokes, and car accident incidences as well as two types of train accidents (caused by man-related factors or technological factors) of the Siberian Railways for the period 1986–1993 were analyzed in relation to space weather changes (Dorman et al. 2001). It was shown that during FDs, the average number of traffic accidents and cardiovascular diseases, as myocardial infarctions and brain strokes, was higher. These results were in agreement with other studies (Villoresi et al. 1994a, b; Ptitsyna et al. 1996). Moreover, train accidents (caused by man-related factors) can also be influenced by FDs events (Dorman et al. 2001).

In this study, the effect of CRI variations on the physiological parameters of aviators was examined. Results reveal that strong CRI decreases (Forbush decreases) are associated with arterial blood pressure variations. The SP parameters have a minimum value for CRI

decreases (levels  $-3$  and  $-2$ ) on the days of CRI events. The opposite behavior is noticed for the DP parameters under examination. Moreover, results, concerning the variations of the physiological parameters on the days before and after CRI decreases, show that mainly for the biggest registered CRI decreases during the period of examination (level  $-3$  of the CRI classification), a decrease, noticed on the days before the CRI decreases, is usually followed by an increase in the days after the CRI decreases.

**Acknowledgments** We thankfully acknowledge the contribution of the medical staff and aviators who participated in the examinations. K. Kudela wishes to acknowledge support of grant agency VEGA, project 2/0081/10. Thanks are due to the referees for their useful comments.

## References

- Babayev ES, Allahverdiyeva AA (2007) Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies. *Adv Space Res* 40:1941–1951
- Cornelissen G, Halberg F, Breus T, Syytkina E, Baevsky R, Weydahl A, Watanabe Y, Otsuka K, Siegelova J, Fiser B, Bakken E (2002) Non-photic solar associations of heart rate variability and myocardial infarction. *JASTP* 64:707–720
- Diaz-Sandoval R, Erdélyi R, Maheswaran R (2011) Could periodic patterns in human mortality be sensitive to solar activity? *Ann Geophysic* 29:1113–1120
- Dimitrova S (2008) Possible heliogeophysical effects on human physiological state. *Proc IAU Symp* 257:65–67
- Dimitrova S, Mustafa FR, Stoilova I, Babayev ES, Kazimov EA (2009) Possible influence of solar extreme events and related geomagnetic disturbances on human cardio-vascular state: results of collaborative Bulgarian-Azerbaijani studies. *Adv Space Res* 43:641–648
- Dorman LI, Iucci N, Ptitsyna NG, Villorosi G (1999) Cosmic ray Forbush decreases as indicators of space dangerous phenomena and possible use of cosmic ray data for their prediction. *Proc 26th ICRC* 6:476–479
- Dorman LI, Iucci N, Ptitsyna NG, Villorosi G (2001) Cosmic ray as indicator of space weather influence on frequency of infract myocardial, brain strokes, car and train accidents. *Proc of 27th ICRC* 3511–3514
- Dzvonik O, Stetiartova J, Kudela K, Daxner P (2006) A monitoring of space weather effects on some parameters of mental performance and health in aviation personnel. *Studia Psychol* 48:273–292
- Kane RP (2010) Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships re-examined. *Ann Geophysic* 28:479–489
- Kudela K, Brenkus R (2004) Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982–2002. *J Atm Solar Terr Phys* 66:1121–1126
- Mavromichalaki H, Papailiou M, Kudela K, Stetiartova J, Dimitrova S (2009) Physiological state of Slovak aviators in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray intensity variations. *Proc 31st ICRC icrc0673*
- Mendoza B, Sánchez de la Peña S (2010) Solar activity and human health at middle and low geomagnetic latitudes in Central America. *Adv Space Res* 46:449–459
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Vassilaki A, Kelesidis KM, Mertzanos GA, Petropoulos B (2009) Cosmic ray variations of solar origin in relation to human physiological state during December 2006 solar extreme events. *Adv Space Res* 43:523–529
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Kudela K, Stetiartova J, Dimitrova S (2011a) The effect of cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators. *ASTRA* 7:373–377
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Kudela K, Stetiartova J, Dimitrova S (2011b) Effect of geomagnetic disturbances on physiological parameters: an investigation on aviators. *Adv Space Res* 48:1545–1550
- Ptitsyna NG, Villorosi G, Kopytenko YA, Kudrin VA, Tyasto MI, Kopytenko EA, Iucci N, Voronov PM, Zaitsev DB (1996) Coronary heart diseases: an assessment of risk associated with work exposure to ultra low frequency magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 17:436–444
- Ptitsyna NG, Villorosi G, Dorman LI, Iucci N, Tyasto MI (1998) Natural and man made low-frequency magnetic fields as a potential health hazard. *UFN (Uspekhi Physicheskikh Nauk)* 168:767–791
- Singh AK, Singh D, Singh RP (2011) Impact of galactic cosmic rays on Earth's atmosphere and human health. *Atm Environ* 45:3806–3818

- Stoupel E (2002) The effect of geomagnetic activity on cardiovascular parameters. *Biomed Pharmacother* 56:247–256
- Stoupel E (2006) Cardiac arrhythmia and geomagnetic activity. *Indian Pacing Electrophysiol J* 6:49–53
- Stoupel E, Domarkiene S, Radishauskas R, Israelevich P, Abramson E, Sulkes J (2005) In women myocardial infarction occurrence is much stronger related to environmental physical activity than in men—a gender or an advanced age effect? *J Clin Basic Cardiol* 8:59–60
- Stoupel E, Babayev ES, Mustafa FR, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J (2006) Clinical cosmobiology—sudden cardiac death and daily/monthly geomagnetic, cosmic ray and solar activity—the Baku Study (2003–2005). *Sun Geosph* 1:13–16
- Stoupel E, Babayev E, Mustafa F, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J (2007a) Acute myocardial infarction occurrence: Environmental links—Baku 2003–2005 data. *Med Sci Monit* 13:175–179
- Stoupel E, Kalediene R, Petrauskiene J, Starkuviene S, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J (2007b) Monthly deaths number and concomitant environmental physical activity: 192 months observation (1990–2005). *Sun Geosph* 2:78–83
- Usoskin IG, Mursula K, Kananen H, Kovaltsov GA (2001) Dependence of cosmic rays on solar activity for odd and even solar cycles. *Adv Space Res* 27:571–576
- Villoresi G, Breus TK, Iucci N, Dorman LI, Rapoport SI (1994a) The influence of geophysical and social effects on the incidences of clinically important pathologies (Moscow 1979–1981). *Phys Med* 10:79–91
- Villoresi G, Kopytenko YA, Ptitsyana NG, Tyasto MI, Kopytenko EA, Iucci N, Voronov PM (1994b) The influence of geomagnetic storms and man-made magnetic field disturbances on the incidence of myocardial infarction in St. Petersburg (Russia). *Phys Med* 10:107–117

# Space weather hazards and their impact on human cardio-health state parameters on Earth

H. Mavromichalaki · M. Papailiou · S. Dimitrova · E. S. Babayev · P. Loucas

Received: 9 January 2012 / Accepted: 13 July 2012 / Published online: 27 July 2012  
© Springer Science+Business Media B.V. 2012

**Abstract** Recent multi-disciplinary heliobiological and biometeorological researches reveal that the human organism is sensitive to environmental physical activity changes and reacts to them through variations of the physiological parameters of the human body. In this study, electrocardiograms of functionally healthy persons, who were digitally registered at the Laboratory of Heliobiology located in the Medical Centre INAM (Baku, Azerbaijan), were studied in relation to different levels of cosmic ray activity and geomagnetic field disturbances. In total, 1,673 daily digital data of heart rate values and time series of beat-to-beat heart rate intervals (RR intervals) were registered for the time period July 15, 2006–March 31, 2008, which includes the period of December 2006, when intense cosmic ray events and strong geomagnetic disturbances occurred. The statistical significance of the influence of geomagnetic activity levels and cosmic ray intensity variations on heart rate and RR intervals was estimated. Results revealed that heart rate increase and RR intervals variations were more pronounced for high levels of geomagnetic activity and large cosmic ray intensity decreases, whereas very small or even minimum cosmic ray intensity variations did not affect heart rate dynamics. Moreover, heart rate increased on the days before, during and after geomagnetic storms with high intensities and on the days preceding, and following cosmic ray intensity decreases.

---

H. Mavromichalaki (✉) · M. Papailiou · P. Loucas  
Nuclear and Particle Physics Section, Physics Department, University of Athens, Athens, Greece  
e-mail: emavromi@phys.uoa.gr

M. Papailiou  
e-mail: mpapahl@phys.uoa.gr

S. Dimitrova  
Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

E. S. Babayev  
Shamakhy Astrophysical Observatory named after N. Tusi and Laboratory of Heliobiology, Azerbaijan  
National Academy of Sciences, Baku, The Republic of Azerbaijan

E. S. Babayev  
Science Development Foundation under the President of the Republic of Azerbaijan, Baku,  
The Republic of Azerbaijan

**Keywords** Space weather · Cosmic ray intensity · Geomagnetic disturbances · Heart rate · RR intervals

## 1 Introduction

During the last several decades, many scientists have intensively worked on the possible impact of space weather variations on living beings. Since the mid-twentieth century, different individual and group investigations conducted at national and international levels have studied (either basic or clinical) how the Sun, processes in the Earth's magnetosphere, geomagnetic and cosmic ray activity can affect the physiological and cardio-vascular health state of humans (Kleimenova and Troitskaia 1992; Oraevskii et al. 1998; Dorman et al. 2001; Zhadin 2001; Cornelissen et al. 2002; Palmer et al. 2006; Dimitrova et al. 2009b; Babayev et al. 2012).

The possible influence of geomagnetic activity (GMA) and cosmic ray intensity (CRI) variations either on the human cardio-vascular state through variations of physiological parameters, such as heart rate (HR) and arterial systolic and diastolic blood pressure (Usenko et al. 1989; Stoupel et al. 1995; Ghione et al. 1998; Dimitrova 2008a, b; Dimitrova et al. 2009a), heart rate variability (Cornelissen et al. 2002; Oinuma et al. 2002) and the central and vegetative nervous system through changes of the human brain's functional state and psycho-emotional state (Babayev and Allahverdiyeva 2007) or on the frequency of myocardial infarctions, brain strokes and sudden cardiac deaths (Stoupel et al. 2005; Stoupel et al. 2006; Stoupel et al. 2007a) is being widely investigated.

Specifically as it is mentioned in the paper by Dimitrova (2008b), the mean systolic and diastolic blood pressure, as measured for a group of 86 healthy volunteers in Sofia (Bulgaria), statistically significantly increased during high GMA and CRI decrease. These results indicated that while the dynamics of arterial blood pressure reveals a compensatory reaction of the human organism for adaptation, HR for healthy people (particularly, at middle latitudes) can be regarded as a stable physiological parameter which is not so sensitive to environmental changes (Dimitrova et al. 2009a). Furthermore, it is found that the influence of the geomagnetic disturbances on the human health seems to vary from men to women (Stoupel et al. 2005; Dimitrova 2008a), and for people taking medications because of cardio-vascular complaints (Dimitrova 2006; Dimitrova 2008a).

A similar study was conducted for a group of aviators in Kosice (Slovakia) for the time period 1994–2002. Human physiological parameters (daily mean values of HR and arterial systolic and diastolic blood pressure) were analyzed in relation to GMA (using Ap and Dst geomagnetic indices) and CRI variations (Papailiou et al. 2011a, b, 2012). Results revealed that diastolic and systolic pressure decrease is related to high GMA levels (Papailiou et al. 2011b), while strong CRI decreases are accompanied by systolic pressure parameters decrease and diastolic pressure parameters increase (Papailiou et al. 2012). Furthermore, the decrease in blood pressure during and on the days before strong geomagnetic storms and large CRI decreases was usually followed by an increase in the days after the events, apart from cases where peak increases and decreases on different days for the same levels of GMA were registered, mostly for diastolic pressure parameters (Papailiou et al. 2011b, 2012). Heart rate is also connected to geomagnetic disturbances and CRI variations. Specifically, GMA increase and CRI decrease are associated to HR decrease and strong HR variations (similar to arterial blood pressure dynamic) on the days before, during and after the changes in the considered space weather factors (Papailiou et al. 2011a).

Stoupel et al. (2005) studied the possible links between the monthly numbers of acute myocardial infarction (in the pre-troponin analysis era) in general, in women and men separately, with solar, geomagnetic and cosmic ray activity. A significant inverse correlation with solar activity and GMA indices and a correlation with the accompanying cosmic ray activity level were found. Recent investigations (Stoupel et al. 2006; Stoupel et al. 2007a) conducted for heliobiological data from Baku (Azerbaijan) for the time period from 2003 to 2005 have revealed that the number of sudden cardiac deaths and the incidents and pre-admission mortality from acute myocardial infarction increased on the days of the highest and the lowest daily levels of GMA as well as on the days with high levels of cosmic ray activity, recorded by the ground based neutron monitors.

Moreover, on the basis of statistical data on several million medical events in Moscow and in Saint-Petersburg, a sufficient influence of geomagnetic storms (accompanied by a Forbush decrease in CRI) on the frequency of myocardial infarctions and brain strokes was found (Villoresi et al. 1995). The most remarkable and statistically significant effects have been revealed for the declining phase of the Forbush decrease, when the average number of infarctions and brain strokes increased by  $(10.5 \pm 1.2) \%$  and  $(7.0 \pm 1.7) \%$ , respectively (Dorman 2005).

Concerning the geomagnetic and cosmic ray activity levels and their relation to the human cardio-health state, in this paper, “direct indicators” of these potential influences were considered. Direct indicators are physiological parameters, which can be objectively verified and which are acquired either *in vivo* directly on the subject (i.e., heart rate and its variability) or *in vitro* by laboratory diagnostics or tissue investigations. It should be noted that most of the “direct indicators” also vary significantly with factors other than GMA (Palmer et al. 2006).

In this paper, three collaborating scientific groups from Athens (Greece), Baku (Azerbaijan) and Sofia (Bulgaria) have studied the potential effects of environmental, physical activity changes (geomagnetic field disturbances and CRI variations through Forbush decreases) on the cardio-health state of functionally healthy humans. A modern heliobiological and cardiologic experiment conducted at a middle latitude region during the descending and near-minimum phase of 11-year solar activity cycle (when cosmic ray activity increased) provided the digital data of electrocardiograms which are used in this study. The investigation focuses on how HR dynamics and RR intervals (the time elapsing between two consecutive RR waves in the electrocardiogram) could be influenced by variations in GMA and CRI.

## 2 Data and methods

### 2.1 Medical data

The relevant heliobiological (medical) measurements were conducted with a permanent group consisting of functionally healthy men and women (average age of the group members was 31.6 years) from Baku, Azerbaijan (geographic coordinates: latitude:  $40^{\circ} 23'$  North; longitude:  $49^{\circ} 51'$  East). Digitized electrocardiograms were registered during one and the same daytime (morning) on working days and Saturdays in the Laboratory of Heliobiology located in the Medical Centre INAM (Baku), from July 15, 2006 to March 31, 2008. In total, the number of obtained digital recordings, which were subjected to analysis, was 1,673 and referred to such cardiologic parameters as RR intervals (time series

of beat-to-beat HR intervals or HR period in ms), minimal RR<sub>min</sub>, maximal RR<sub>max</sub>, average RR<sub>avg</sub> and HR values.

In order to minimize the effects of other parallel objective and subjective factors (environmental conditions, artificial electromagnetic fields, etc.), the registrations were conducted in a special isolated room, which was designed for medical examinations, providing also the possibility for full relaxation of the persons examined. None of the members of the group were informed about current space weather conditions before and during the measurements. In addition to all mentioned above, the physiological and psycho-physiological state of these persons was also taken into consideration, and in case of complaints (stress, emotional experiences, an additional pathology—influenza, cold, etc.), their measurements were neither conducted nor considered. These small and rare gaps did not significantly affect the results of the experiment.

## 2.2 Geomagnetic activity data

The geomagnetic Dst-index data from the World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) were used in this study for the considered period. GMA was divided into four levels (I0, I, II, III) according to the average daily Dst-index values as shown in Table 1. This table also presents the corresponding number of HR and RR measurements for each GMA level. Level “I0” (positive values for Dst-index) was introduced because for the time period under study, there were quite many days with very low GMA. Inclusion of these very low levels of GMA in our study is also based on the aforementioned results that very weak fluctuations or almost the lack of fluctuations in the geomagnetic field can also have adverse effects on the human health state (Palmer et al. 2006; Stoupelet et al. 2007a). During the considered period, a major space weather event was recorded on December 15, 2006 when Dst-index had a value of  $-99$  nT and the CRI decrease was approximately  $-4$  %.

Similar separation/gradation (I0, I, II, III, IV) is shown in Table 1 for the other GMA index used in this study, the Ap-index. These data were handled from the Space Weather Prediction Centre at NOAA, Boulder, USA ([http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old\\_indices.html](http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html)).

## 2.3 Cosmic ray data

Daily values of pressure-corrected data of the hadronic component of the CRI obtained from the Neutron Monitor Station (Super 6NM-64) of the University of Athens (geographic coordinates: latitude:  $37^{\circ} 58'$  North; longitude:  $23^{\circ} 47'$  East) were used. This

**Table 1** Dst-index and Ap-index levels and values and the corresponding number of measurements of cardiologic parameters

Ap/Dst levels	Dst-index values, nT	Number of measurements	Ap-index values	Number of measurements
I0	$Dst \geq 0$	494	$Ap < 8$	986
I	$-20 < Dst < 0$	966	$8 \leq Ap < 15$	409
II	$-50 < Dst \leq -20$	208	$15 \leq Ap < 30$	248
III	$Dst \leq -50$	5	$30 \leq Ap < 50$	21
IV			$Ap \geq 50$	9

station is located at altitude of 260 m above sea level and detects particles with a cut-off rigidity of 8.53 GV. It has been operational since November 2000 providing high quality real-time CRI data to the Internet (<http://cosray.phys.uoa.gr>). These data have time resolutions of 1 h, 1 min and 1 s, and the statistical error is smaller than 0.3 % on hourly data (Mavromichalaki et al. 2001; Mavromichalaki et al. 2005). It is important to note that the latitudinal location of the Athens Station is quite close to the latitude of Baku, where the experiment was conducted.

Cosmic ray intensity data were normalized to the mean value of CRI for the time period July 15, 2006–March 31, 2008. CRI variations during the examined period ranged from  $-4$  to  $+1$  %. It denotes maximal decreases in cosmic ray activity up to  $-4$  % and increases up to  $1$  %. CRI was divided into six levels by step of  $1$  %:  $-4$  %,  $-3$  %,  $-2$  %,  $-1$  %,  $0$  %,  $1$  %, respectively.

## 2.4 Statistical methods

The statistical method, the ANalysis Of VAriance (ANOVA) (statistical package STATISTICA, ver.6, StatSoft Inc., 2001), was applied to establish the statistical significance levels ( $p$ ) of the effect of GMA levels and CRI variations on the HR and RRmin, RRavg and RRmax (for the whole group and for each person in this group). The effect of GMA levels and CRI variations up to three days before and after the respective events (geomagnetic storms development and CRI decreases and increases) on the examined HR and RR parameters (RRmin, RRmax and RRavg) was also investigated by the help of ANOVA and the method of superimposed epochs.

$p$  values were calculated for the days before ( $-$ ), during ( $0$ ) and after ( $+$ ) geomagnetic storms and CRI variations. The chosen level for statistical significance in the used data analysis software system STATISTICA is set to  $p < 0.05$ , and the same value is used for interpreting the results. Different significant levels have different advantages and disadvantages; smaller  $p$  gives greater confidence in the determination of significance, but causes greater risks of failing to reject a false null hypothesis.

## 3 Results

The time period covered by the experiments referred to the descending and near-minimum phase of long-lasting solar activity cycle 23 and was characterized mainly by low GMA (Mavromichalaki et al. 2008). The most significant space weather event was registered on December 15, 2006 when Dst-index had a value of  $-99$  nT and Ap-index reached 104. Meanwhile the CRI decrease was more than  $-4$  % (Mavromichalaki et al. 2008; Papailiou et al. 2009). Nevertheless, it was quite interesting to investigate how HR dynamics and changes in RR intervals could be influenced by different (high- and low level) variations in GMA and CRI. The analyses have been performed for each person of the group separately and for the whole group (to study so called “collective effect”). In this paper, only selected and typical figures (either for separate persons or for whole group) are provided to describe the general picture. Results of analysis of a large amount of figures, which are not included in the paper because of the limited space, were used for the conclusions.

ANOVA was used for obtaining the significance levels ( $p$ ) of the effect of GMA level and the percentage of CRI variations on HR and RR intervals.  $p$  values were calculated for the days before ( $-3$ rd,  $-2$ nd and  $-1$ st day), during ( $0$ ) and after ( $+1$ st,  $+2$ nd and  $+3$ rd day) geomagnetic storms occurred, and CRI variations were registered.



Tables 2 and 3 show *p* values for CRI and GMA potential effect (significance levels: *p* values) on all physiological parameters for the days before (–), during (0) and after (+) CRI and GMA variations for those of the examined persons whose HR and RR intervals were statistically significantly affected by CRI and GMA variations on some of the days under consideration. RRavg for the majority of persons was statistically significantly affected by CRI variations mostly for the days before (–3rd and –2nd day), during (0) and after (+2nd day) the event. Statistically significant results also refer to parameters RRmin and RRmax on the days before (–3rd and –2nd day), during (0) and after (+1st, +2nd day) the event (Table 2). For GMA and geomagnetic indices Ap and Dst, mostly, the results for days –3rd and –2nd are statistically significant for all parameters (Table 3).

Figure 1 is an example for HR and RRavg dynamics in relation to CRI variations for one of the persons in the group (p4). For larger CRI decreases (from –3 to –2 % decreases), HR values were higher in contrast to RR intervals values, which decreased. RRmax and RRmin had the same behavior as RRavg for strong CRI decreases. Variations of HR and RRavg under CRI changes were about 21 % as it can be seen in Figure 1, and the results presented in Table 2 for day 0 show that these effects were statistically significant (*p* = 0.0003).

HR and RRavg variations in relation to GMA through Ap- and Dst-index levels (as they were divided in Table 1) revealed that higher GMA levels (GMA increase, i.e. Ap-index values increase and Dst-index values decrease) were accompanied with HR increase and RRavg decrease. More specific analyses revealed that HR increase and RR decrease are connected to high GMA (levels III and IV of the Ap-index classification and level III of the Dst-index classification). Figure 2 is an example of HR and RRavg dynamics for one of the persons in the group (p4) under GMA variations, estimated by Ap-index. As can be seen from Fig. 2 deviations of cardio-vascular parameters were about 11 %.

Analysis of HR variations before (–), during (0) and after (+) geomagnetic disturbances with different intensities and CRI variations for different individuals of the group revealed that HR of different persons had peak increments on some of the days before, during and after days with high GMA and CRI decreases (more than –2 %). HR dynamics for the whole group under changes of Ap, Dst and CRI levels on the days before (–), during (0) and after (+) occurrence of geomagnetic storms and Forbush decreases are shown, respectively, on Fig. 3. It appears that HR varies significantly and obtains peak

**Table 2** Significance levels (*p* values) of CRI potential effect on all physiological parameters for the days before (–), during (0) and after (+) CRI variations

Days	<i>p</i> values (% CRI decrease)						
	RRavg <sub>p1</sub>	RRavg <sub>p4</sub>	RRmax <sub>p4</sub>	RRmin <sub>p1</sub>	RRmin <sub>p4</sub>	HR <sub>p1</sub>	HR <sub>p4</sub>
–3	0.03878*	0.03878*	0.19476	0.02936*	0.02936*	0.04109*	0.0003*
–2	0.01175*	0.00013*	0.01338*	0.01107*	0.00014*	0.02374*	0.0002*
–1	0.19345	0.19345	0.40637	0.16417	0.16417	0.21960	0.003*
0	0.03916*	0.00031*	0.00576*	0.08669	0.00026*	0.04282*	0.0003*
+1	0.06004	0.74668	0.69609	0.03539*	0.90353	0.11133	0.00007*
+2	0.02587*	0.00011*	0.00129*	0.03984*	0.00020*	0.05431	0.00012*
+3	0.13795	0.25258	0.46216	0.36634	0.46453	0.16539	0.0002*

\* Statistically significant

p<sub>i</sub> denotes examined person in the group

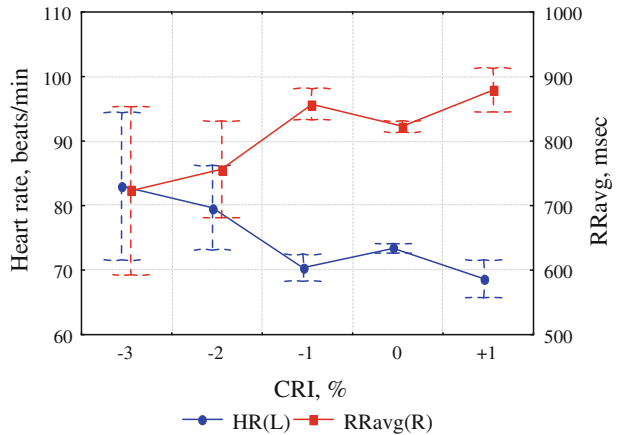
**Table 3** Significant levels (*p* values) of GMA potential effect on all physiological parameters for the days before (–), during (0) and after (+) GMA variations

Days	<i>p</i> values (Ap levels)				<i>p</i> values (Dst levels)			
	RRavg <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRmax <sub>p<sub>7</sub></sub>	RRmin <sub>p<sub>3</sub></sub>	HR <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRavg <sub>p<sub>1</sub></sub>	RRmax <sub>p<sub>4</sub></sub>	RRmin <sub>p<sub>4</sub></sub>	HR <sub>p<sub>1</sub></sub>
–3	0.04688*	0.91999	0.56347	0.02306*	0.00382*	0.00905*	0.00414*	0.00138*
–2	0.01353*	0.00848*	0.00533*	0.00864*	0.00377*	0.25477	0.04496*	0.00320*
–1	0.49318	0.64871	0.82570	0.56138	0.84544	0.79558	0.53306	0.85588
0	0.41165	0.42060	0.52161	0.35169	0.67324	0.33487	0.04118*	0.77558
+1	0.29242	0.28428	0.76431	0.13997	0.06208	0.96717	0.96435	0.12495
+2	0.15321	0.31604	0.56264	0.23987	0.11469	0.35886	0.08748	0.18013
+3	0.50128	0.05294	0.00062*	0.71170	0.85522	0.79373	0.80154	0.85657

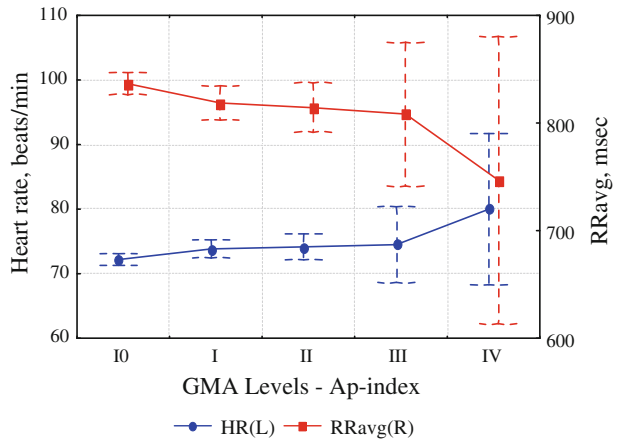
\* Statistically significant

p<sub>1</sub> denotes examined person in the group

**Fig. 1** CRI effect on heart rate and RRavg (±95 % CI) for the person p4 in the group. (Legend: “L” denotes Left axis, “R” denotes Right axis)

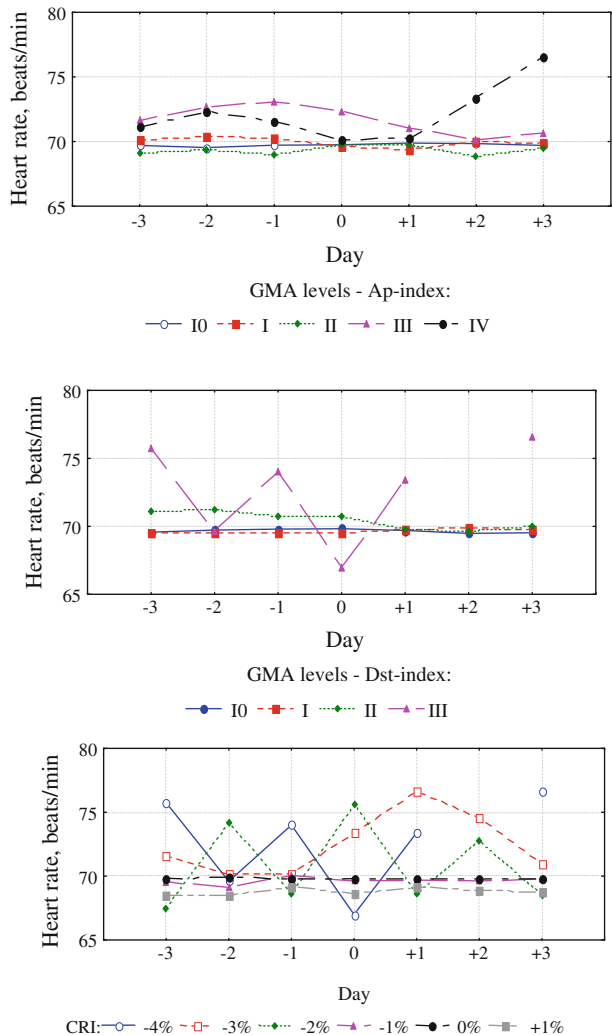


**Fig. 2** GMA effect, estimated by Ap-index, on heart rate and RRavg (±95 % CI) for the person p4 in the group. (Legend: “L” denotes Left axis, “R” denotes Right axis)



values for high GMA as well as for the largest CRI decreases which were registered during the examination period. More specifically, as it is shown in Fig. 3 (upper panel) for Ap-index for level IV, HR slightly decreased on 0 and +1st day and then increased on +2nd day and reached its maximum value on +3rd day. For level III of the Ap-index classification, HR values were higher from -3rd to 0 day in comparison with the HR values on the days after these moderate storms. For lower levels of GMA, estimated by Ap-index (I0, I and II), no significant variations were registered. Regarding Dst-index level, there were peak increases of HR for the highest registered GMA level (level III) on -3rd, -1st and +1st day and decrease on 0 day (Fig. 3, middle panel). For level II of Dst-index classification, HR values from -3rd till 0 day were higher in comparison with the HR values on the days after these weak storms (+1, +2 and +3 day). HR is almost constant on all of the considered days for low and very low GMA, estimated by Dst-index. Moreover, HR varies significantly for strong CRI decreases (from -4 to -2 %) as can be seen in Fig. 3 (bottom

**Fig. 3** GMA effect estimated by Ap-index (upper panel), Dst-index (middle panel) and CRI effect (bottom panel) on heart rate of the whole group for the days before (-), during (0) and after (+) the corresponding variations



panel). During strong CRI decreases ( $-4$  and  $-2$  %), HR had peak increases on some of the days before, during or after the CRI decrease, while for CRI decrease  $-3$  % HR increased for the period from day 0 till +2nd day after the event.

Variations of RRavg were very similar: analysis of the RRavg variations for the whole group for the different levels of GMA (estimated by Ap and Dst-index) and CRI variations (%), respectively, on the days before ( $-$ ), during (0) and after ( $+$ ) changes in the studied environmental physical activity factors revealed that RRavg decreased significantly on some of the days before, during and after high GMA level and strong CRI decreases, which were registered during the examination period. Specifically for higher values of GMA level, the parameter RRavg shows decrease (Papailiou et al. 2010).

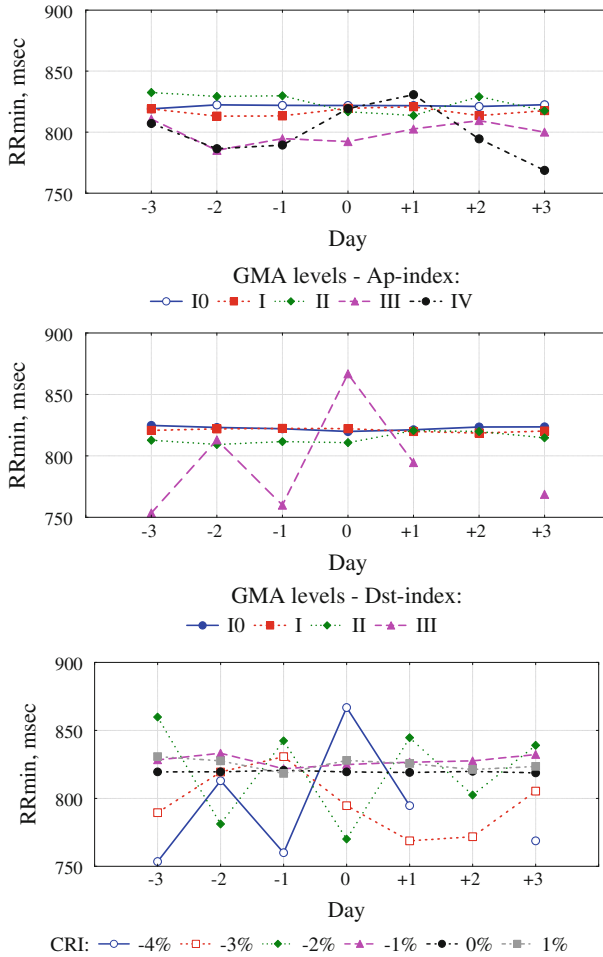
RRmin variations for the whole group on the days before ( $-$ ), during (0) and after ( $+$ ) changes in the monitored space weather parameters are presented, respectively, in Fig. 4. As it is seen, they were affected in a similar way as HR. RRmin had lower values on the days before, during and after moderate storms regarding Ap-classification (level III for Ap-index) in comparison with the RRmin values registered on the days before, during and after very low, low GMA and weak storms (levels I0, I and II). For the highest registered Ap-index level (level IV), RRmin decreased also on these days except on 0 and +1 day (Fig. 4, upper panel). Strong similar variations were also observed for the highest level of the Dst-index classification (level III) as it was shown in Fig. 4 (middle panel). RRmin dynamics in relation to CRI decreases are shown in Fig. 4 (bottom panel). As it has already been mentioned weak decreases ( $-1$  %), no CRI variations (0 %) or weak positive variations (1 %) do not seem to affect significantly the physiological parameters while for CRI decreases  $-2$  ÷  $-4$  % RRmin had significant peak variations.

RRmax variations for different levels of GMA (according to the Ap-index classification) are shown in Fig. 5 (upper panel). In general, RRmax had lower values for levels III and IV in comparison with the RRmax values for levels I0, I and II, especially on  $-1$ st and 0 day for level III and +2nd and +3rd day for level IV. Exception with increase of RRmax values was  $-1$ st and 0 day for level IV and +3rd day for level III. Similar behavior is noticed for level III of the Dst-index classification (Fig. 5, middle panel) and CRI decrease  $-4$  % (Fig. 5, bottom panel). RRmax was significantly lower on the days before and after the biggest events except for the period from  $-2$ nd till 0 day when RRmax values were comparable with the values calculated for RRmax for the other levels of the studied factors.

It is interesting to note that on the day before ( $-1$ st day) the highest GMA (regarding both Ap- and Dst-index) and largest CRI decreases, RRmin and RRmax did not have unidirectional variation. It might be indicative for probable arrhythmia; however, additional examinations and studies should be performed to clarify this result.

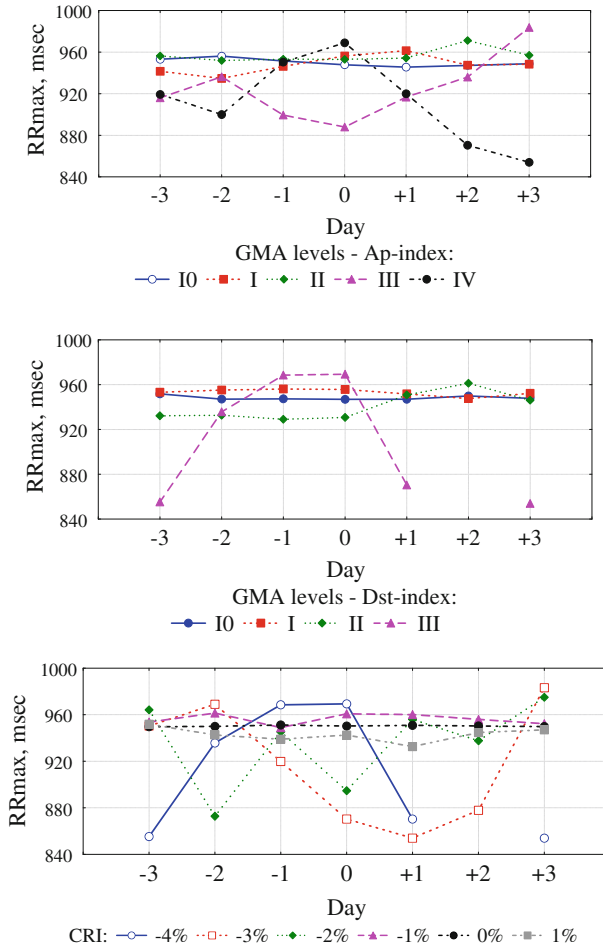
#### 4 Discussion and conclusions

Heliobiology is the branch of science that deals with the impact of solar activity and related effects on living organisms (Palmer et al. 2006; Babayev and Allahverdiyeva 2007). Heliobiological studies have shown that living beings, including humans, have the ability to adapt to normal variations of GMA (Dimitrova 2008a). But, any deviations from this normal level, either extremely high or extremely low fluctuations in the GMA, will undoubtedly have an effect on the brain, the cardio-vascular, nervous and other biological systems of living organisms (Palmer et al. 2006; Babayev and Allahverdiyeva 2007; Stoupel et al. 2007a).



**Fig. 4** GMA effect estimated by Ap-index (*upper panel*), Dst-index (*middle panel*) and CRI effect (*bottom panel*) on RRmin of the whole group for the days before (–), during (0) and after (+) the corresponding variations

The established changes in cardiologic parameters deserve attention from a medical point of view. They indicate that geomagnetic field and CRI variations might be related to cardio-vascular diseases morbidity and mortality as it has been shown by different indirect investigations using epidemiological medical data (Cornelissen et al. 2002; Stoupel et al. 2007b). For example, in Stoupel et al. (2007b) the monthly deaths, distribution for a period of 192 months in the Republic of Lithuania in relation to solar, geomagnetic and cosmic ray activity was studied. The number of monthly deaths (total, stroke, non-cardiovascular and suicides) significantly correlated to cosmic ray activity and inversely correlated to solar and geomagnetic activity. Cornelissen et al. (2002) studied mortality from myocardial infarction for a 29-year period in Minnesota and found an approximate 10.5-year cycle, similar to that of solar activity. They showed that the incidence of mortality due to myocardial infarction increased in Minnesota by 5 % during years of maximum solar activity compared to years of minimum solar activity (there is an additional risk of



**Fig. 5** GMA effect estimated by Ap-index (*upper panel*), Dst-index (*middle panel*) and CRI effect (*bottom panel*) on RRmax of the whole group for the days before (–), during (0) and after (+) the corresponding variations

myocardial infarction during solar maximum compared to solar minimum, which implies an additional risk during high levels of GMA).

Furthermore, previous studies have shown that systolic and diastolic blood pressure, pulse pressure and subjective psycho-physiological complaints of examined healthy volunteers (Dimitrova 2008b; Dimitrova 2009) as well as human HR (Mavromichalaki et al. 2008; Dimitrova et al. 2009a) increased under high GMA and strong CRI decreases.

This paper is an outcome of three different collaborative research teams and focuses on the possible relation between geomagnetic and cosmic ray activity and digitally measured human cardiologic parameters. It has been shown that GMA and CRI variations could be considered as one of the indicators of space weather, which play a role in regulating external (environmental physical activity) factors in human homeostasis, particularly, cardio-vascular health state. Moreover, CRI decreases together with GMA index (Ap- and Dst-index) variations have been analyzed in regard to HR and RR interval variations. RR

intervals and HR showed opposite correlations which proved the reliability of conducted measurements. The most interesting and common result that has been revealed is that HR and RR interval variations appear to be connected to geomagnetic disturbances and CRI variations. The effects are more pronounced for high levels of GMA (when geomagnetic storms occur) and strong CRI decreases.

However, because the possible space weather conditions influence on human health is a rather sensitive subject, it is of great importance to conduct further complex and synchronous investigation of solar, geomagnetic and cosmic ray activity effects on human physiological and cardiologic parameters at different latitudinal and longitudinal areas and at different levels of environmental physical activity.

**Acknowledgments** We are grateful to Medical Centre INAM (Baku) and personally Doctor E. Kazimov, A. Asgarov and F. Mustafa (ShAO) as well as all participants of heliobiological experiments. World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto, Space Weather Prediction Centre at NOAA, Boulder, and the Cosmic Ray Station of the University of Athens are acknowledged for relevant space weather data.

## References

- Babayev ES, Allahverdiyeva AA (2007) Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies. *Adv Space Res* 40:1941–1951
- Babayev ES, Crosby NB, Obridko VN, Rycroft MJ (2012) Potential effects of solar and geomagnetic variability on terrestrial biological systems. In: Maris G and Demetrescu C (eds) *Advances in solar and solar-terrestrial physics*, Research Signpost, Kerala, India, pp 329–376, ISBN: 978-81-308-0483-5
- Cornelissen G, Halberg F, Breus T, Syytkina E, Baevsky R, Weydahl A, Watanabe Y, Otsuka K, Siegelova J, Fiser B, Bakken E (2002) Non-photic solar associations of heart rate variability and myocardial infarction. *JASTP* 64:707–720
- Dimitrova S (2006) Relationship between human physiological parameters and geomagnetic variations of solar origin. *Adv Space Res* 37:1251–1257
- Dimitrova S (2008a) Different geomagnetic indices as an indicator for geo-effective solar storms and human physiological state. *JASTP* 70:420–427
- Dimitrova S (2008b) Possible heliogeophysical effects on human physiological state. *Proc. IAU Symposium No 257*:65–67
- Dimitrova S (2009) Cosmic rays variations and human physiological state. *Sun Geosph* 4:79–83
- Dimitrova S, Mustafa FR, Stoilova I, Babayev ES, Kazimov EA (2009a) Possible influence of solar extreme events and related geomagnetic disturbances on human cardio-vascular state: results of collaborative Bulgarian-Azerbaijani studies. *Adv Space Res* 43:641–648
- Dimitrova S, Babayev ES, Mustafa FR, Stoilova I, Taseva T, Georgieva K (2009b) Geomagnetic storms and acute myocardial infarctions morbidity in middle latitudes. *Sun Geosph* 4:72–78
- Dorman LI (2005) Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data. *Ann Geophys* 23:2997–3002
- Dorman LI, Iucci N, Ptitsyna NG and Villoresi G (2001) Cosmic ray as indicator of space weather influence on frequency of infract myocardial, brain strokes, car and train accidents. In: *Proceedings in 27th ICRC (Hamburg)*, pp 3511–3514
- Ghione S, Mezzasalma L, Del Seppia C, Papi F (1998) Do geomagnetic disturbances of solar origin affect arterial blood pressure? *J Hum Hypertens* 12:749–754
- Kleimenova NG, Troitskaia VA (1992) Geomagnetic pulsations as one of ecological environment factors. *Biofizika* 37:429–438
- Mavromichalaki H, Sarlanis C, Souvatzoglou G, Tatsis S, Belov A, Eroshenko E, Yanke V and Pchelkin A (2001) Athens neutron monitor and its aspects in the cosmic-ray variations. In: *Proceedings in 27th ICRC 2001 Vol 10. Hamburg*, pp 4099–4102
- Mavromichalaki H, Papaioannou A, Petrides A, Assimakopoulos B, Sarlanis C, Souvatzoglou G (2005) Cosmic-ray events related to solar activity recorded at the Athens neutron monitor station for the period 2000–2003. *Int Mod J Phys A* 20:6714–6716

- Mavromichalaki H, Papailiou M, Dimitrova S, Babayev ES, Mustafa FR (2008) Geomagnetic disturbances and cosmic ray variations in relation to human cardio-health state: a wide collaboration. In: Proceedings in 21st ECRS (Kosice), pp 351–356
- Oinuma S, Kubo Y, Otsuka K, Yamanakata T, Murakami S, Matsuoka O, Ohkawa S, Cornelissen G, Weydahl A, Holmeslet B, Hall C, Halberg F (2002) Graded response of heart rate variability, associated with an alteration of geomagnetic activity in a subarctic area. *Biomed Pharmacother* 56:284–288
- Oraevskii VN, Breus TK, Baevskii RM, Rapoport SI, Petrov VM, Barsukova ZV, Gurfinkel I, Rogoza AT (1998) Effect of geomagnetic activity on the functional status of the body. *Biofizika* 43:819–826
- Palmer SJ, Rycroft MJ, Cermack M (2006) Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. *Surv Geophys* 27:557–595
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Vassilaki A, Kelesidis KM, Mertzanos GA, Petropoulos B (2009) Cosmic ray variations of solar origin in relation to human physiological state during December 2006 solar extreme events. *Adv Space Res* 43:523–529
- Papailiou M, Dimitrova S, Babayev ES, Mavromichalaki H (2010) Analysis of changes of cardiological parameters at middle latitude region in relation to geomagnetic disturbances and cosmic ray variations. In: Proceedings in (AIP) Conference, Vol 1203. pp 748–753 doi: [10.1063/1.3322548](https://doi.org/10.1063/1.3322548)
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Kudela K, Stetiarova J, Dimitrova S (2011a) The effect of cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators. *ASTRA* 7:373–377
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Kudela K, Stetiarova J, Dimitrova S (2011b) Effect of geomagnetic disturbances on physiological parameters: an investigation on aviators. *Adv Space Res* 48:1545–1550
- Papailiou M, Mavromichalaki H, Kudela K, Stetiarova J, Dimitrova S (2012) Cosmic radiation influence on the physiological state of aviators. *Nat Hazards* 61:719–727
- Stoupe E, Wittenberg C, Zabudowski J, Boner G (1995) Ambulatory blood pressure monitoring in patients with hypertension on days of high and low geomagnetic activity. *J Hum Hypertens* 9:293–294
- Stoupe E, Domarkiene S, Radishauskas R, Israelevich P, Abramson E, Sulkes J (2005) In women myocardial infarction occurrence is much stronger related to environmental physical activity than in men—a gender or an advanced age effect? *J Clin Basic Cardiol* 8:59–60
- Stoupe E, Babayev ES, Mustafa FR, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J (2006) Clinical cosmobiology—sudden cardiac death and daily/monthly geomagnetic, cosmic ray and solar activity—the Baku study (2003–2005). *Sun Geosph* 1:13–16
- Stoupe E, Babayev ES, Mustafa FR, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J (2007a) Acute myocardial infarction occurrence: environmental links—Baku 2003–2005 data. *Med Sci Monit* 13:175–179
- Stoupe E, Kalediene R, Petrauskiene J, Starkuviene S, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J (2007b) Monthly deaths number and concomitant environmental physical activity: 192 months observation (1990–2005). *Sun Geosph* 2:78–83
- Usenko GA, Deryapa NR, Kopanev SI, Panin LE (1989) Influence of the heliogeophysical factors on some professional and physiological functions of aviation operators in Siberia. In: Gnevyshev MN, Ol'AI (eds) Problems of cosmic biology. Biophysical and clinical aspects of heliobiology, vol 65. “Nauka” Publishing House, Leningrad, pp 52–65
- Villoresi G, Dorman LI, Ptitsyna NG, Iucci N, Tyasto MI (1995) Forbush decreases as indicators of health-hazardous geomagnetic storms. In: Proceedings in 24th ICRC, vol 4. Rome, pp 1106–1109
- Zhadin MN (2001) Review of Russian literature on biological action of DC and low frequency AC magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 22:27–45