ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΟΥΡΑΝΙΑ ΚΟΝΤΟΥ

Χαρακτηριστικές ιδιότητες σεισμικών καταγραφών στον Άρη και η συμβολή τους στη μελέτη της δομής του πλανήτη.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2023

ΚΟΝΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΑ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5430

Χαρακτηριστικές ιδιότητες σεισμικών καταγραφών στον Άρη και η συμβολή τους στη μελέτη της δομής του πλανήτη.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής

Επιβλέπων

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ

© Ουρανία Κοντού, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2023
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Χαρακτηριστικές ιδιότητες σεισμικών καταγραφών στον Άρη και η συμβολή τους στη μελέτη της δομής του πλανήτη.– *Διπλωματική Εργασία*

© Ourania Kontou, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2023
All rights reserved.
Characteristic properties of seismic recordings on Mars and their contribution to the study of the structure of the planet. – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Περιεχόμενα

Περίληψη **5**
Abstract **6**
Ευχαριστίες **7**
1. Εισαγωγή **7**
2. Τα σεισμόμετρα της αποστολής Insight **12**
2.1. Ευρέως φάσματος σεισμόμετρο (VBB) 12
2.2. Βραχείας περιόδου σεισμόμετρο (SP) 14
3. Σεισμικά γεγονότα καταλόγου **14**
3.1. Ποιότητα σεισμικών γεγονότων 17
4. Χαρακτηριστικά των SF γεγονότων **18**
5. Μη σεισμικά γεγονότα **20**
5.1. Modes 20
5.1.1. Modes του προσγειωτή 21
5.1.2. Συντονισμός των 2.4 Hz 22
5.1.3. Mode του 1 Hz 23
5.1.4. Modes και αναγνώριση σεισμών 23
5.1. Donks 24
5.2. Glitches 25
5.3. SP Temperature Pattern 26
5.4. Crosstalks και Whistling 29
5.5. Wind ,Pressure Drops,Evening Rumbles 30
5.6. Sunset Chirps, Sandmen 32
5.7. Άλλα Συνήθη Σήματα 34
6. Εσωτερική δομή του Άρη **35**
6.1. Φλοιός 35
6.2. Μανδύας 38
6.3. Πυρήνας 40
7. Μεθοδολογία **45**
8. Αποτελέσματα **48**
9. Συμπεράσματα **54**
Βιβλιογραφία **54**
Παράρτημα **57**

Περίληψη

Η αποστολή Insight η οποία προσεδαφίστηκε στον πλανήτη Άρη το έτος 2018 και λειτούργησε συνολικά τέσσερα χρόνια, χρονικό διάστημα σχεδόν διπλάσιο της αρχικής εκτίμησης, είχε ως κύριο στόχο την μελέτη της σεισμικότητας του πλανήτη Άρη που χρησιμοποιήθηκε ως βασικό εργαλείο για την ανακατασκευή της εσωτερικής δομής του. Για την πραγματοποίηση αυτής της ανακατασκευής ήταν φυσικά απαραίτητη η χρήση και άλλων γεωφυσικών, γεωδυναμικών και γεωχημικών δεδομένων. Στην εργασία αυτή περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι κατηγορίες των σεισμών που καταγράφηκαν στην διάρκεια της αποστολής καθώς και η πληθώρα των μη σεισμικών γεγονότων, πολλά από τα οποία παρατηρήθηκαν πρώτη φορά, που απαντώνται στις καταγραφές και δυσχεραίνουν την αναγνώριση των γεγονότων σεισμικής προέλευσης. Ακόμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα μοντέλα που έχουν προκύψει για την εσωτερική δομή του πλανήτη Άρη. Επίσης, από την μελέτη 12 γεγονότων Α ποιότητας έγινε εμφανής η συσχέτιση μεταξύ της επικεντρικής απόστασης και του χρόνου καταγραφής των σεισμικών κυμάτων μετά την εξάλειψη των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με το διαφορετικό μέγεθος των γεγονότων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Abstract

The Insight mission that landed on planet mars in the year 2018 and (was active) for (4) four years in total, a time period almost double than the the original nominal operation period, had as a main goal the study of the seismicity of planet Mars, which was used as the primary tool for the reconstruction of its internal structure. For the actualization of this reconstruction it was naturally necessary the use of more geophysical, geodynamic and geochemical data. In this thesis are described (analysed) the characteristics and the types (categories) of the seismic events which were observed during the mission, as well as the vast amount of the non-seismic events, a lot of which were observed for the very first time, that are present in the recordings and make the recognition of the seismic events more difficult. Moreover, the results and the models that have been developed for the internal structure of the planet Mars are presented. Furthermore, from the study(analysis) of twelve(12) type A events the correlation between the epicentral distance and the time of recording of the seismic waves became clear, after removing the uncertainty related to the different size of the events used in the current paper.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την σελίδα για να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Βασίλειο Καρακώστα και τον Δρ. Φοίβο Καρακώστα , η βοήθεια και η καθοδήγηση των οποίων κατέστησαν την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας δυνατή.

1. Εισαγωγή

Η ιστορία της εξερεύνησης του Κόκκινου πλανήτη ξεκίνησε το 1960. Από τότε μέχρι και σήμερα έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την αποστολή και ασφαλή προσγείωση διαστημοπλοίου στην επιφάνεια του Άρη χωρίς αυτό να σηματοδοτεί την επιτυχή έκβαση όλων αυτών των αποστολών. Η πρώτη αποστολή με σεισμολογικό ενδιαφέρον ήταν η Viking κατά την οποία εκτοξεύθηκαν δύο διαστημόπλοια το έτος 1975, το Viking 1 και το Viking 2, με διαφορά μερικών μηνών και τα οποία ήταν εφοδιασμένα και τα δύο με σεισμόμετρα(Anderson et al., 1976).

Η κύρια αποστολή του Viking ήταν η αναζήτηση στοιχείων για την ύπαρξη ζωής στον Άρη και όχι η μελέτη της σεισμικότητας του. Για τον λόγο αυτό δε δόθηκε προτεραιότητα στις ανάγκες της γεωφυσικής αποστολής, η κυριότερη των οποίων ήταν η ανάγκη για άμεση επαφή του σεισμομέτρου με το έδαφος. Αντί αυτού τα σεισμόμετρα τοποθετήθηκαν και στα δύο διαστημόπλοια πάνω στον προσγειωτή, με αποτέλεσμα την καταγραφή υψηλών επιπέδων θορύβου, τα οποία οφείλονταν όχι μόνο στον άνεμο αλλά και στην λειτουργία των διαφόρων οργάνων και μηχανημάτων του, όπως είναι ο θόρυβος που δημιουργείται κατά την περιστροφή της κάμερας κλπ.

Η παρατήρηση αυτή των υψηλών επιπέδων θορύβου ήταν δυνατή μόνο από το σεισμόμετρο του Viking 2 καθώς το Viking 1 δεν μπόρεσε να λειτουργήσει καθόλου λόγω τεχνικών προβλημάτων. Από όλες τις καταγραφές του Viking 2 λόγω των υψηλών επιπέδων θορύβου που παρουσιάζονται σε αυτές, μόνο ένα γεγονός στην ημέρα 80 της αποστολής αναγνωρίστηκε ως πιθανό σεισμικό γεγονός. Ωστόσο λόγω της απουσίας μετεωρολογικών δεδομένων δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός του ως σεισμικού γεγονότος ή γεγονότος που προκλήθηκε από την δράση του ανέμου. Έτσι η αποστολή του Viking 2 ολοκληρώθηκε από σεισμολογικής πλευράς με την καταγραφή ενός μόνου πιθανού σεισμικού γεγονότος.

Επειδή όμως ο Άρης είναι ένας πλανήτης από τον οποίον μπορούν να αντληθούν πολλές πληροφορίες για διάφορους τομείς και όχι μόνο για τον τομέα της βιολογίας σχεδιάστηκε μια νέα αποστολή με έναν από τους κύριους στόχους αυτής, την μελέτη της σεισμικότητας που λαμβάνει χώρα σε αυτόν.

Η αποστολή αυτή ονομάστηκε εξερεύνηση του εσωτερικού χρησιμοποιώντας σεισμικές μεθόδους, γεωδαισία και μεταφορά θερμότητας (Interior Exploration, using Seismic

investigations, Geodesy and Heat transport) ή αλλιώς εν συντομία Insight. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν σχετικά με την εσωτερική δομή του Άρη, μπορούν να οδηγήσουν στην καλύτερη κατανόηση της εξέλιξης και της δημιουργίας όλων των γαιωδών πλανητών (π.χ. Αφροδίτη, Γη, Ερμής κ.λ.π.). Αυτό είναι δυνατό λόγω του μεγέθους του που είναι ιδανικό για την διατήρηση των ιχνών που μαρτυρούν την δράση των διαδικασιών που είναι υπεύθυνες για την διαμόρφωση των γαιωδών πλανητών του ηλιακού μας συστήματος.

Πιο αναλυτικά επειδή τα ίχνη αυτά κρύβονται στην γενικότερη στρωμάτωση του Άρη, οι επιστημονικοί στόχοι της αποστολής Insight είναι ο καθορισμός του πάχους και της δομής του φλοιού όπως και της δομής αλλά και της σύστασης του μανδύα. Για τον πυρήνα, εκτός από τον καθορισμό της σύστασης και του μεγέθους του απαιτείται και η αποσαφήνιση της κατάστασης του, αν δηλαδή βρίσκεται σε στερεή ή υγρή μορφή. Ακόμα καθορίζεται η γενικότερη θερμική κατάσταση του εσωτερικού του πλανήτη καθώς και η μεταφορά θερμότητας από τα βαθύτερα στρώματα προς την επιφάνεια (Insight Fact Sheet-NASA/JPL-Caltech,15/2/ 2023).

Άλλος ένας κύριος στόχος της αποστολής, του οποίου όμως τα αποτελέσματα και συμπεράσματα περιορίζονται στον κόκκινο πλανήτη είναι ο καθορισμός της τεκτονικής δραστηριότητας του μέσω του μεγέθους, της συχνότητας αλλά και της γεωγραφικής κατανομής της εσωτερικής σεισμικής δραστηριότητάς του, καθώς και του αριθμού προσκρούσεων των μετεωριτών σε αυτόν.

2. Τα σεισμόμετρα της αποστολής Insight

Η μελέτη της σεισμικότητας του Άρη επιτυγχάνεται μέσω δύο σεισμομέτρων, του Very Broad Band ή VBB σεισμομέτρου στο οποίο βασίστηκε σχεδόν όλη η αποστολή και στο μικρής περιόδου ή SP σεισμόμετρο με πιο βοηθητικό ρόλο.

2.1. Ευρέως φάσματος σεισμόμετρο (VBB)

Το VBB σεισμόμετρο είναι το όργανο του SEIS (Σεισμικό Πείραμα για την Εσωτερική Δομή) το οποίο είναι ικανό να καταγράψει κινήσεις πολύ μικρής κλίμακας εξαιτίας των τριών εξαιρετικά ευαίσθητων εκκρεμών που περιέχει.

Εξαιτίας των ατμοσφαιρικών συνθηκών που επικρατούν στον Άρη με την μεγάλη διακύμανση των θερμοκρασιών, η οποία παρατηρείται όχι μόνο στην αλλαγή των εποχών αλλά και καθημερινά μεταξύ ημέρας και νύχτας, το VBB σεισμόμετρο τοποθετήθηκε κάτω από τρεις κατασκευές, οι οποίες δρουν ως προστατευτικά στρώματα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, με σκοπό την όσο πιο δυνατή απομόνωση του από το περιβάλλον.

Το πρώτο στρώμα προστασίας είναι μια σφαίρα από τιτάνιο ο ρόλος της οποίας είναι η δημιουργία αεροστεγών συνθηκών (Vacuum conditions) μεταξύ αυτής και του σεισμομέτρου. Το δεύτερο στρώμα έχει μορφή παρόμοια με της κερήθρας και χρησιμοποιεί την ίδια την ατμόσφαιρα του Άρη για την απομόνωση της σφαίρας που περιέχει το SEIS από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το τρίτο και τελευταίο στρώμα προστασίας το οποίο περιβάλλει τα δύο προηγούμενα είναι η ασπίδα, που ο ρόλος της είναι η προστασία του SEIS τόσο από τις θερμοκρασιακές μεταβολές όσο και από την δράση του ανέμου και εν συντομία αναφέρεται ως WTS (Wind and Thermal Shield, δηλαδή ασπίδα προστασίας από τον άνεμο και τις θερμικές μεταβολές, ιστοσελίδα SEIS-insight,15/2/ 2023).

Ένα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτού του σεισμομέτρου είναι ότι παρόλο που τα τρία εκκρεμή του τοποθετούνται μεταξύ τους με γωνία ανάλογη της χωρικής κατεύθυνσης που αντιπροσωπεύουν, το σύστημα που αποτελείται και από τα τρία εκκρεμή δεν είναι παράλληλο με το οριζόντιο επίπεδο αλλά παρουσιάζει γωνία κλίσης με αυτό 32.5 μοιρών. Αυτή η γεωμετρία των αξόνων επιτρέπει την καταγραφή ενέργειας και από τους τρεις άξονες ανεξαρτήτως από την κατεύθυνση της εδαφικής κίνησης.Έτσι από μια εδαφική κίνηση μπορεί να αντληθεί περισσότερη πληροφορία.

Ακόμα άλλος ένας λόγος υπέρ αυτής της γεωμετρίας αξόνων είναι η οικονομία χώρου που προσφέρει,η οποία είναι υψίστης σημασίας στις ρομποτικές αποστολές καθώς οι διαστάσεις και η μάζα των οργάνων μεταφράζονται όχι μόνο σε κόστος αλλά και στις δυνατότητες των ρομποτικών μερών να τα διαχειριστούν, όπως στην περίπτωση της τοποθέτησης του SEIS από την πλατφόρμα του προσγειωτή στο έδαφος από το ρομποτικό χέρι.

Ωστόσο για να μπορεί να προσδιοριστεί γεωγραφικά η εδαφική κίνηση είναι επιτακτική η περιστροφή των δεδομένων από τις συνιστώσες (U,V,W) που αντιστοιχούν στο σύστημα αξόνων με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο στις συνιστώσες (Z,N,E) όπου αντιστοιχούν σε καρτεσιανό σύστημα (Lognonné et al., 2019).

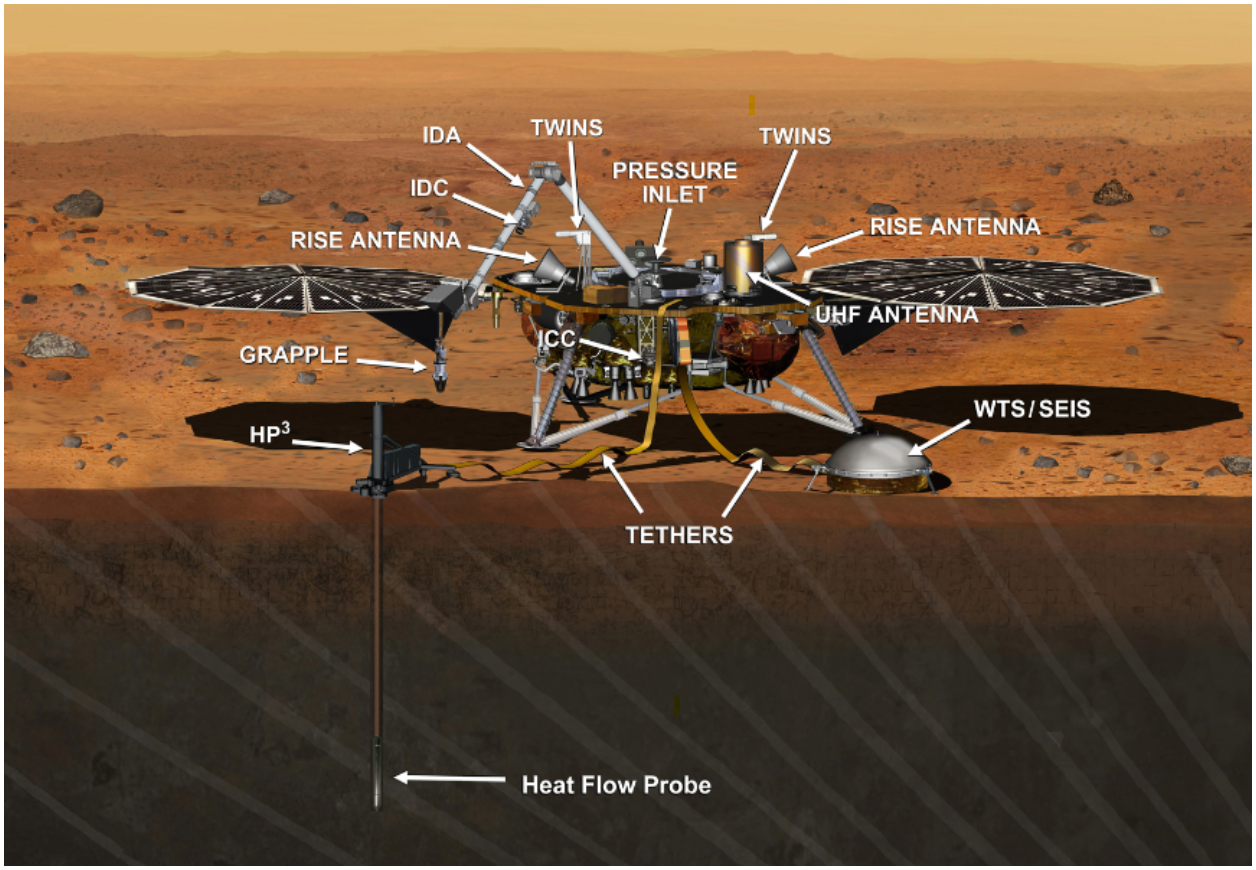
Από την αποστολή Viking 2 έγινε εμφανές ότι η θέση του σεισμομέτρου δεν πρέπει να είναι πάνω στον προσγειωτή. Έτσι το SEIS σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά του μέσω του ρομποτικού βραχίωνα στο έδαφος. Η μονη σύνδεσή του με τον προσγειωτή επιτυγχάνεται μέσω του tether, ενός καλωδίου που ενώνει το SEIS με την ηλεκτρονική μονάδα (eBox) που βρίσκεται μέσα στον προσγειωτή. Μέσω της σύνδεσης αυτής τροφοδοτείται το SEIS με ηλεκτρική ενέργεια αλλά πραγματοποιείται η ψηφιοποίηση και η μεταφορά των ψηφιακών δεδομένων από και προς τον υπολογιστή που βρίσκεται στον προσγειωτή.

Ωστόσο μία ακόμα συνθήκη εκτός από την τοποθέτηση του SEIS στο έδαφος που πρέπει να ικανοποιηθεί για την έναρξη των μετρήσεων είναι η τοποθέτηση της WTS ασπίδας, η οποία μπορεί να τοποθετηθεί μόνο όταν έχει επιτευχθεί η τοποθέτηση του SEIS όσο γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς το οριζόντιο επίπεδο, το οποίο μεταφράζεται και στην μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων. Τα παραπάνω στοιχεία που αναφέρθηκαν (SEIS,WTS κλτ.) καθώς και όλα τα εξαρτήματα από τα οποία απαρτίζεται η αποστολή του InSight φαίνονται στην **εικόνα 1**.

2.2. Βραχείας περιόδου σεισμόμετρο (SP)

Το σεισμόμετρο μικρής περιόδου (SP) συμπεριλήφθηκε στα όργανα της αποστολής κυρίως ως εφεδρικό όργανο σε περίπτωση που το VBB σεισμόμετρο παρουσίαζε κάποιο τεχνικό πρόβλημα. Μπορεί να καταγράψει την ενέργεια που εκλύεται σε συχνότητες έως και 50 Hz ωστόσο το συχνοτικό εύρος στο οποίο είναι πιο ευαίσθητο κυμαίνεται από 0.1 έως 40Hz.

Τρία βασικά σημεία στα οποία διαφέρουν τα δύο είδη σεισμομέτρων είναι το συχνοτικό εύρος καταγραφής των ενεργειών όπου το SP είναι σαφώς μεγαλύτερο, οι διαστάσεις και η μάζα των αισθητήρων όπου σε αυτήν την περίπτωση του VBB υπερτερούν σημαντικά και στην απουσία κλίσης στους αισθητήρες του SP σεισμομέτρου.



Εικόνα 1. Αναπαράσταση των επιστημονικων οργάνων και των εξαρτημάτων της αποστολής InSight.Όπου grapple είναι ο μηχανισμός που βρίσκεται στο τέλος του ρομποτικού βραχίωνα (IDA) και του επιτρέπει να πιάνει πράγματα. Heat Flow Probe, μηχανισμος που είναι υπεύθυνος για την τοποθέτησή μέσα στον ρηγόλιθο των αισθητήρων της θερμοκρασίας οι οποίοι είναι μέρος του πειράματος της ροής θερμότητας (HP^3). Pressure inlet το προστατευμένο από τον αέρα άνοιγμα του αισθητήρα της πίεσης και RISE Antenna είναι όργανο που χρησιμοποιείταιι στο πείραμα που σχετίζεται με την περιστροφή και εσωτερική δομή του Άρη. Οι αισθητήρες του ανέμου και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος συμβολίζονται ως TWINS.

3. Σεισμικά γεγονότα καταλόγου

Η ομάδα που απαρτίζει το τμήμα της αποστολής που ασχολείται με την αναγνώριση και επεξεργασία των σεισμών του Άρη (MQS - Mars Quake Service) επέλεξε για την πιο λειτουργική επεξεργασία αυτών έναν τρόπο κατηγοροποίησης που βασίζεται αποκλειστικά στο συχνοτικό τους περιεχόμενο. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αντικειμενικότητα στην ερμηνεία των γεγονότων η οποία αλλιώς θα είχε επηρεαστεί από τα βιαστικά συμπεράσματα που θα προέκυπταν από την κατηγοριοποίηση σύμφωνα με την περιγραφή της πηγής (Clinton et al., 2020).

Έτσι τα γεγονότα διακρίνονται σε 5 διαφορετικούς τύπους οι οποίοι ομαδοποιούνται σε δύο μεγάλες οικογένειες συχνοτήτων,αυτή των χαμηλών συχνοτήτων (Low frequency family ή εν συντομία LF) και αυτή των υψηλών συχνοτήτων(High frequency family ή HF).

Η οικογένεια των χαμηλών συχνοτήτων εμπεριέχει δύο τύπους γεγονότων αυτού των χαμηλών συχνοτήτων (LF) με ενέργεια και περιεχόμενο κάτω από 1 Hz και αυτού του ευρυζωνικού τύπου (Broadband ή BB) με ενεργειακό περιεχόμενο που φτάνει και μερικές φορές μπορεί και να ξεπεράσει τα 2.4 Hz. Στα 2.4 Hz παρατηρείται ένας συντονισμός ο οποίος οφείλεται αποκλειστικά στη δομή του υπεδάφους που υπάρχει κάτω από τον προσγειωτή και η οποία από την οικογένεια των χαμηλών συχνοτήτων μπορεί να διεγερθεί μόνο από τους ευρυζωνικούς σεισμούς και όχι από τους σεισμούς χαμηλών συχνοτήτων.

Η διέγερση αυτή σε ένα φασματογράφημα ή σε ένα σεισμόγραμμα μπορεί να εντοπιστεί πριν, ταυτόχρονα ή και μετά από την καταγραφή του ευρυζωνικού γεγονότος σε αυτό. Επίσης σε αυτό το συντονισμό εκτός από το ότι διαφέρει η θέση καταγραφής του ως προς το γεγονός στο οποίο οφείλει τη διέγερσή της για κάθε σεισμό έτσι διαφέρει και η έντασή του αλλά και η διάρκειά του (Clinton et al., 2020).

Η οικογένεια των υψηλών συχνοτήτων απαρτίζεται από τρεις τύπους γεγονότων οι οποίοι είναι τα γεγονότα υψηλών συχνοτήτων (High Frequency ή HF), τα 2.4 Hz γεγονότα και τα γεγονότα πολύ υψηλών συχνοτήτων (Very high frequency ή VF).

Τα γεγονότα υψηλών συχνοτήτων χαρακτηρίζονται από το ότι το κυρίως μέρος της ενέργειας τους είναι 2.4 Hz. Το άλλο μικρότερο μέρος αυτής εκτείνεται ακόμα και πάνω από τα 4 Hz , ενώ μπορεί να υπάρχει και ενέργεια σε χαμηλότερες συχνότητες από 2.4 Hz. Χωρίς ωστόσο το μεγάλο εύρος συχνοτήτων στο οποίο κυμαίνονται οι ενέργειες να αναιρεί ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτής βρίσκεται στα 2.4 Hz, συνθήκη που λειτουργεί ως διακριτικό στοιχείο μεταξύ των ευρυζωνικών και υψηλής συχνότητας σεισμών καθώς στους πρώτους όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας τους βρίσκεται σε συχνότητες χαμηλότερες των 2.4 Hz παρόλο που μπορεί να υπάρχει και μέρος της ενέργειας σε υψηλότερες συχνότητες.

Το συχνοτικό περιεχόμενο των γεγονότων τύπου 2.4 Hz κυμαίνεται σε συχνότητες γύρω από αυτών των 2.4 Hz με μέγιστη τιμή τα 4 Hz. Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει δηλαδή τα γεγονότα που δεν είναι τόσο ισχυρά ώστε να διαγείρουν κάποια άλλα modes εκτός από αυτό των 2.4 Hz που σχετίζεται με τη δομή του υπεδάφους στην περιοχή που βρίσκεται ο σταθμός καταγραφής, όπως είναι τα modes των 4 Hz και άνω τα οποία σχετίζονται με τα εξαρτήματα του προσγειωτή τα οποία τίθενται σε ταλάντωση εξαιτίας του.

Η αναγνώριση των modes σε συχνότητες από 4 Hz και άνω γίνεται με ευκολία στα δεδομένα με αποτέλεσμα η ερμηνεία αυτών να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από αυτά όταν υπάρχει ένα σεισμικό γεγονός αρκετά ισχυρό για να τα διεγείρει. Όμως στην περίπτωση των γεγονότων τύπου 2.4 Hz η παραπάνω πρόταση δεν ισχύει καθώς αναφερόμαστε σε τόσο ασθενή γεγονότα που συχνά είναι εμφανή μόνο στην κάθετη συνιστώσα και για αυτόν τον λόγο προσομοιάζονται με χαμηλού πλάτους εκδοχές των υψηλών συχνοτήτων σεισμών (Clinton et al., 2020).

Ο τελευταίος τύπος δεδομένων που είναι μέλος της οικογένειας των υψηλών συχνοτήτων είναι αυτός των πολύ υψηλών συχνοτήτων (Very high frequency ή VF). Σε αυτόν τον τύπο το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας βρίσκεται σε πολύ υψηλότερες συχνότητες σε αντιδιαστολή με το συχνοτικό περιεχόμενο των προαναφερθέντων τύπων γεγονότων. Το εύρος των συχνοτήτων που απαντάται κυρίως η ενέργεια εδώ είναι μεταξύ 5 με 10 Hz ενώ έχουν παρατηρηθεί και περιπτώσεις όπου η συχνότητα βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα πάνω από 35 Hz. Εξαιτίας λοιπόν των κατά πολύ υψηλότερων συχνοτήτων οι οποίες διεγείρουν πολύ πιο έντονα τις οριζόντιες από τις κάθετες συνιστώσες δεν υπάρχει κίνδυνος λανθασμένης κατηγοριοποίησης των VF γεγονότων μικρού πλάτους ως 2.4 Hz ή HF γεγονότα, παρόλου που και τα VF γεγονότα διεγείρουν την 2.4 Hz resonance (Van Driel et al., 2020).

Ωστόσο εκτός από τους τύπους γεγονότων που έχουν περιγραφεί παραπάνω έχει αναγνωριστεί και ένας ακόμα τύπος ο οποίος λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του αποτρέπει την κατηγοριοποίηση του σε μια από τις δύο οικογένειες είτε των χαμηλών είτε των υψηλών συχνοτήτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η πολύ μικρή διάρκεια του, περίπου 20s,καθώς και το συχνοτικό του περιεχόμενο που δεν περιέχει συχνότητες κάτω από τα 5 Hz . Για αυτόν τον λόγο η MQS ομάδα δημιούργησε μια ξεχωριστή κατηγορία για αυτού του είδους τα γεγονότα που την ονόμασε άλλα σήματα (other signals) (Clinton et al., 2020) και στην οποία κατατάσσονται μόνο τα γεγονότα πολύ υψηλών συχνοτήτων (Super High Frequency Events ή SF).

Η πηγή στην οποία οφείλουν την δημιουργία τους τα SF γεγονότα δεν έχει ακόμα αναγνωριστεί ωστόσο η πολύ μικρή διάρκειά τους σε συνδυασμό με τις πολύ υψηλές συχνότητες που έχουν (5-30 Hz) προϊδεάζει για μια πηγή που βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση από τη θέση του προσγειωτή (Dahmen et al 2020). Αναλυτικότερη περιγραφή αυτών των γεγονότων θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο αυτής της εργασίας.

3.1. Ποιότητα σεισμικών γεγονότων

Το συχνοτικό περιεχόμενο δεν είναι ο μόνος παράγοντας ο οποίος χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση των σεισμικών γεγονότων του Άρη. Υπάρχει ακόμα ένας τρόπος αξιολόγησης και διαχωρισμού τους και αυτός είναι η ποιότητά τους. Η ποιότητα των σεισμικών γεγονότων διαβαθμίζεται σε τέσσερις (4) κατηγορίες: A, B, C, D. Ο χαρακτηρισμός τους σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες γίνεται σύμφωνα με το πόσο ευκρινής είναι σε αυτά η “αναγνώριση” και η “ερμηνεία” των σεισμικών φάσεων. Ένας παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η παραπάνω αναφερόμενη συνθήκη είναι τα επίπεδα θορύβου, τα οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα σε σχέση με αυτά του σήματος.

Πιο συγκεκριμένα για την ποιότητα A, τα κριτήρια που πρέπει να πληρεί ένα γεγονός για να συμπεριληφθεί σε αυτήν είναι να είναι ευκρινείς σε αυτό τόσο οι φάσεις των επιμήκων (P) όσο και των εγκαρσίων (S) σεισμικών κυμάτων. Ακόμα, θα πρέπει τα στοιχεία που αντλούμε από την πόλωση να είναι επαρκή ώστε να μας οδηγήσουν στον προσδιορισμό της θέσης του σεισμού.

Τούτο καθίσταται δυνατό διότι πρωτίστως μέσω της πόλωσης έχει καθοριστεί η απόσταση του σεισμού από τον σταθμό καθώς και από το πίσω αζιμούθιο (Clinton et al.,2020).

Στην ποιότητα B κατατάσσονται όλοι οι σεισμοί για τους οποίους μπορεί να προσδιοριστεί είτε η απόσταση είτε το αζιμούθιο αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα. Στην πρώτη περίπτωση μπορούν να αναγνωριστούν οι φάσεις του γεγονότος αλλά δεν υπάρχει πόλωση ενώ στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει πόλωση αλλά μόνο μια καθαρά αναγνώριση φάση με αποτέλεσμα να μπορεί να προσδιοριστεί μόνο η διεύθυνση του γεγονότος και όχι και η απόστασή του.

Για τις υπόλοιπες δύο κατηγορίες ποιότητος οι πληροφορίες που μπορούν να αντληθούν είναι περιορισμένες καθώς για την ποιότητα C η αναγνώριση των φάσεων σε αυτά αποδεικνύεται ιδιαίτερα δύσκολη παρόλου που η αναλογία σήματος- επίπεδο θορύβου είναι τέτοια ώστε να επιτρέπεται η ευκρινής αναγνώριση του γεγονότος, η αναγνώριση όμως των φάσεων των επιμηκών και εγκαρσίων κυμάτων δεν είναι το ίδιο ευκρινής και αποδεικνύεται ιδιαίτερα δύσκολη. Ενώ για την ποιότητα D καθίσταται αδύνατη οποιαδήποτε αναγνώριση έστω της μίας από τις δύο φάσεις των σεισμικών κυμάτων καθώς η αναλογία σήματος - επίπεδο θορύβου είναι τέτοια που με δυσκολία επιτρέπει την αναγνώριση του γεγονότος.

4. Χαρακτηριστικά των SF γεγονότων

Οι ιδιαιτερότητες των SF γεγονότων από όλα τα υπόλοιπα γεγονότα που υπάρχουν στον σεισμικό κατάλογο δεν αφορούν μόνο τη διάρκεια τους και το συχνοτικό τους περιεχόμενο αλλά και την απουσία ευδιάκριτων φάσεων καθώς και την σχεδόν ολοκληρωτική απουσία καταγραφής ενέργειας στην κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμογράφου.

Παρόλο το μεγάλο εύρος που χαρακτηρίζει το συχνοτικό τους περιεχόμενο από 5 Hz μέχρι 30 Hz, η ενέργεια της πληθώρας των γεγονότων αυτού του τύπου που έχουν καταγραφεί ως τώρα βρίσκεται σε συχνότητες των 7 - 9 Hz. Λόγω αυτού του περιορισμού τα SF γεγονότα δε διεγείρουν κάποια από τα γνωστά modes του προσγειωτή (π.χ. το mode των 4 Hz). Το μόνο mode που έχει παρατηρηθεί να διεγείρεται εξαιτίας αυτών των γεγονότων είναι το mode των 28 Hz το οποίο καταγράφεται και στις τρεις συνιστώσες του σεισμογράμματος.

Αυτός ο περιορισμός των συχνοτήτων καθιστά δυνατή την αυτοματοποιημένη αναγνώριση των SF γεγονότων παρά τις δυσμενείς συνθήκες που δημιουργούν για αυτήν, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών όπως είναι η πολύ μικρή διάρκειά τους, η καταγραφή ενέργειας σχεδόν αποκλειστικά από τις οριζόντιες συνιστώσες και φυσικά η απουσία της ενίσχυσης του γεγονότος

από την 2.4 mode το οποίο αποτελεί συνθήκη που ικανοποιούν όλοι οι υπόλοιποι τύποι σεισμικών γεγονότων (Dahmen et al 2020).

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την αυτοματοποιημένη αναγνώριση βασίστηκε στην σύγκριση της ενέργειας μεταξύ δύο συχνοτικών παραθύρων αυτό του 7 - 9 Hz , στο οποίο παρατηρείται συνήθως η ενέργεια των SF γεγονότων και του 3 - 5 Hz , όπου παρατηρείται η mode των 4 Hz η οποία διεγείρεται από τον αέρα.Όταν η αναλογία αυτών των ενεργειών είναι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο όριο σε έστω μία από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες είναι πιθανή η έκλυση ενέργειας στο παράθυρο των 7 - 9 Hz να έχει προκληθεί από ένα SF γεγονός.

Η επιτυχία του αλγόριθμου αυτού οφείλεται σε έναν βαθμό από την απουσία στο συχνοτικό παράθυρο των 7 - 9 Hz ενέργειας που οφείλεται σε διαγειρόμενες από τον αέρα modes του προσγειωτή καθώς και στο ότι οι glitches και τα donks που η παρουσία τους είναι έκδηλη σχεδόν σε όλα τα φασματογράμματα και σεισμογράμματα των υπόλοιπων σεισμών ως παροδικά σήματα μικρής διάρκειας ,δε διεγείρονται σε αυτές τις συχνότητες εκτός βέβαια σπανίων εξαιρέσεων.

Όμως η χρήση αυτού δεν συνεπάγεται την απόλυτη αναγνώριση όλων των SF γεγονότων αφού μικρού έως μεσαίου πλάτους γεγονότα μπορεί να, να μην εντοπιστούν όταν επικρατούν συνθήκες με ισχυρούς έντονους ανέμους διότι καθώς το ότι δεν υπάρχουν modes του προσγειωτή που οφείλονται στη δράση του αέρα στις συχνότητες 7 - 9 Hz δεν αναιρεί την ύπαρξη σεισμικού θορύβου σε αυτές που οφείλονται σε αυτόν.

Ακόμα εκτός από την παράλειψη μερικών γεγονότων, η αυτόματη αναγνώριση ενέχει τον κίνδυνο της λανθασμένης αναγνώρισης SF γεγονότων οπότε ο μετέπειτα έλεγχος των αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητος έτσι ώστε να διορθωθούν χειροκίνητα από την ομάδα του MQS οποιαδήποτε λάθη.

Όπως φάνηκε και από τα παραπάνω η αναγνώριση των SF γεγονότων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα επίπεδα του θορύβου που επικρατούν κατά τη διάρκεια μιας ημέρας στον Άρη λόγω του σχετικά μικρού τους πλάτους.Έτσι η αναγνώρισή τους γίνεται σχεδόν μόνο στα διαστήματα της μέρας όπου λόγω των χαμηλών επιπέδων θορύβου χαρακτηρίζονται ως ήσυχα.Τα διαστήματα αυτά δεν είναι σταθερά στο χρόνο αλλά μεταβάλλονται σύμφωνα με την μεταβολή των εποχών στον Άρη. Για το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων που μελετήθηκαν ως ήσυχο διάστημα θεωρείται το χρονικό διάστημα που οριοθετείται από λίγο πριν τη δύση του ηλίου ως λίγο πριν τα μεσάνυχτα.

Η περιοδικότητα των SF γεγονότων, η μη ύπαρξη ευκρινών φάσεων σε αυτά καθώς και το χαμηλό τους πλάτος είναι κάποια από τα κοινά χαρακτηριστικά που μοιράζονται αυτά με τα περιοδικά σήματα υψηλών συχνοτήτων και μικρής διάρκειας που έχουν καταγραφεί για την Σελήνη σε χρόνους που σχετίζονται με τη δύση και την ανατολή του Ηλίου.

Σε αναλογία λοιπόν με την επικρατέστερη θεωρία για το μηχανισμό δημιουργίας των σεισμών αυτών στην Σελήνη η οποία είναι η θερμική κίνηση και τα ραγίσματα του ρεγκόλιθου μέσα στους

κρατήρες, στα εμπόδια και στα πετρώματα, τα SF γεγονότα στον Άρη μπορούν να εξηγηθούν μέσω των τάσεων που δημιουργούνται εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας στον Άρη. Αυτή η μεταβολή είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη της Σελήνης αλλά αρκετά μεγάλη (της τάξης των 100 K) ώστε να είναι ικανή να δημιουργήσει θερμικά ραγίσματα στον κόκκινο πλανήτη.

Ωστόσο οι μετρήσεις της θερμοκρασίας από τα 2 μικρόφωνα TWINS δεν έδειξαν κάποια συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και της δημιουργίας των SF γεγονότων. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη θέση των 2 μικροφώνων όπου είναι πάνω στον προσγειωτή και συνεπώς απέχουν περίπου 1.2 m από το έδαφος αλλά και 0.2 m από την πλατφόρμα (Deck) του προσγειωτή (Golombek et al.,2020). Λόγω αυτών των αποστάσεων τα δεδομένα που προέρχονται από τα 2 μικρόφωνα μπορούν να δώσουν μόνο μια γενικότερη εκτίμηση της θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή που βρίσκεται ο προσγειωτής καθώς η πραγματική θερμοκρασία των εξαρτημάτων του αλλά και των πετρωμάτων και του ρεγκόλιθου θα παρουσιάζει μεγάλες διαφορές εξαιτίας των μονωτικών υλικών που βρίσκονται σε διάφορα βάθη στο υπέδαφος αλλά και της επίδρασης της ακτινοβολίας και την ύπαρξη περιοχών όπου λόγω εμποδίων (όπως είναι ο προσγειωτής και τα όργανα) δε φτάνει η ηλιακή ενέργεια (Dahmen et al,2020).

Παρόλο που τα δεδομένα που έχουμε μέχρι στιγμής στην διάθεσή μας δεν είναι αρκετά ούτε για να απορρίψουν αλλά ούτε και για να επιβεβαιώσουν τον συσχετισμό των SF γεγονότων με τη μεταβολή της θερμοκρασίας παραμένει η επικρατέστερη θεωρία για τον τρόπο δημιουργίας αυτών των γεγονότων καθώς ο μόνος άλλος τρόπος δημιουργίας τους μπορεί να είναι ο συσχετισμός τους με τον προσγειωτή και τη θερμική διαστολή των μηχανημάτων αυτού.

Η θεωρία αυτή ωστόσο έρχεται σε σύγκρουση με το ότι τα SF γεγονότα δε διεγείρουν κανένα γνωστό φυσικό mode του προσγειωτή όπως κάνουν τα donks υψηλών συχνοτήτων όπου μαζί με τις glitches αποτελούν τις καταγραφές των θερμικών διαστολών των μηχανημάτων του .Η μοναδική διέγερση mode παρατηρείται στο συχνοτικό παράθυρο των 25 - 30 Hz (το mode των 28 Hz) και όχι μάλιστα από όλα τα SF γεγονότα αλλά μόνο από αυτά που περιέχουν ενέργεια σε τόσο υψηλές συχνότητες αλλά η πηγή αυτής της διέγερσης παραμένει άγνωστη.Ακόμα άλλος ένας λόγος που υποδεικνύει ότι αυτή η θεωρία δεν μπορεί να ισχύει είναι η μορφή των καταγραφών των θερμικών διαστολών (donks και glitches) που διαφέρει σημαντικά από αυτή των SF γεγονότων(impulsive signal)(Dahmen et al.,2020)

5. Μη σεισμικά γεγονότα

Για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή αναγνώριση και ερμηνεία των σεισμικών γεγονότων από τα δεδομένα που προέρχονται από τα δύο σεισμόμετρα του SEIS πρέπει να γίνει η αναγνώριση των διαφόρων πηγών στις οποίες οφείλονται τα σήματα που καταγράφονται σε αυτά και αυτό γιατί η προέλευση όλων των σημάτων δεν είναι απαραίτητα σεισμική.

Μερικές πηγές εκτός από τις σεισμικές που είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των σημάτων που παρατηρούνται στις καταγραφές είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως είναι ο αέρας, οι θερμοκρασιακές διαφορές, οι διαφορές στην πίεση, η δομή του υπεδάφους αλλά ακόμα και τα ίδια τα όργανα και μηχανήματα του προσγειωτή. Παρακάτω θα ακολουθήσει αναλυτική περιγραφή των μη σεισμικών γεγονότων που καταγράφονται καθώς και των πηγών από τις οποίες προέρχονται.

5.1. Modes

Ένα χαρακτηριστικό των φασματογραφημάτων που πρέπει να εξηγηθεί και το οποίο δεν σχετίζεται με τα σεισμικά γεγονότα είναι οι οριζόντιες γραμμές που παρατηρούνται σε συχνότητες από 1 Hz και πάνω.Οι οριζόντιες αυτές γραμμές αντιστοιχούν στα modes τα οποία ταξινομούνται σε τρεις(3) κύριους τύπους, τα modes των 4 Hz και παραπάνω, την 2.4 Hz resonance και το 1 Hz mode.

5.1.1. Modes του προσγειωτή

Τα modes των 4 Hz και άνω ονομάζονται αλλιώς και modes του προσγειωτή καθώς η παρουσία τους ήταν ξεκάθαρη από τις πρώτες καταγραφές των σαράντα οκτώ ωρών που πραγματοποιήθηκαν όταν ακόμα το SEIS βρισκόταν στην πλατφόρμα του προσγειωτή και όχι στο έδαφος που τοποθετήθηκε εν συνεχεία από τον ρομποτικό βραχίωνα. Έτσι τα modes αυτά θεωρούνται ως φυσικές συχνότητες τόσο του προσγειωτή όσο και του ημίκαμπτου καλωδίου (semi-rigid) που είναι υπεύθυνο για την σύνδεση του προσγειωτή με το SEIS , η ενέργεια των οποίων όταν διεγείρονται φτάνει στο SEIS είτε μέσω του εδάφους είτε απευθείας μέσω του καλωδίου όπου καταγράφεται το μεγαλύτερο μέρος αυτής στις οριζόντιες συνιστώσες και το μικρότερο στην κάθετη συνιστώσα των σεισμογράφων (Dahmen et al., 2021).

Εξαιτίας της παρατήρησης της μεταβολής των κυρίαρχων συχνοτήτων των modes κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ της ανατολής και της δύσης του ήλιου στο οποίο επικρατούν οι υψηλότερες θερμοκρασίες (κατά τη διάρκεια μιας ημέρας στον Αρη) σε χαμηλότερες συχνότητες γίνεται εμφανής η συσχέτιση των modes του προσγειωτή με τη θερμοκρασία.

Η μείωση των συχνοτήτων μπορεί να εξηγηθεί μέσω της διαστολής των εξαρτημάτων του προσγειωτή από την αυξημένη θερμοκρασία η οποία σηματοδοτεί την μείωση της ακαμψίας

τους.Έτσι από τον τύπο υπολογισμού της φυσικής συχνότητας (σχέση 1) φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ αυτής και της ακαμψίας είναι ανάλογη οπότε η μείωση της ακαμψίας προκαλεί και μείωση της φυσικής συχνότητας.

$$F_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (1)$$

Όπου F_n = η φυσική συχνότητα

k = η ακαμψία

m = η μάζα

Ακόμα τα modes του προσγειωτή δεν είναι μόνο ευαίσθητα στη θερμοκρασία αλλά και στον αέρα όπως δείχνει η θετική συσχέτιση του πλάτους τους με την ταχύτητα του ανέμου. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου που θέτει σε κίνηση τον προσγειωτή και τους συλλέκτες ηλιακής ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το πλάτος της ενέργειας που εκλύεται στις συχνότητες των modes του προσγειωτή εξαιτίας αυτής της κίνησης (Ceylan et al., 2020).Η εξάρτηση για τα modes του προσγειωτή με συχνότητες κάτω από 10 Hz συμπεριλαμβανομένου και των πιο συνήθων modes στα 4 και 7 Hz με τον αέρα που περιγράφηκε παραπάνω μεταφράζεται σε απότομη και γρήγορη απόσβεση αυτών όταν η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπερνά το όριο των 2.4 m/s περίπου (Haralambous et al., 2020).

5.1.2. Συντονισμός των 2.4 Hz

Η 2.4 resonance αποτελεί τον δεύτερο τύπο στον οποίο διακρίνονται τα modes καθώς η απουσία τους από τις πρώτες καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν όταν τα SEIS βρισκόταν ακόμα στην πλατφόρμα του προσγειωτή αποκλείει η πηγή τους να είναι ο προσγειωτής όπως είναι για τα προηγούμενα modes που περιγράφηκαν.

Ακόμα εκτός από την διαφορετική πηγή ο συντονισμός των 2.4 Hz διαφέρει από τα modes του προσγειωτή στο ότι η μεγαλύτερη ενέργειά τους καταγράφεται στις κάθετες συνιστώσες των σεισμογράφων από ότι στις οριζόντιες όπως και στο ότι είναι κάθετα πολωμένα (Ceylan et al., 2020).

Η σημαντικότερη τους όμως διαφορά είναι ότι παρόλο που ο συντονισμός των 2.4παρουσιάζει μια ευαισθησία ως προς τον αέρα η οποία εκφράζεται μέσω μιας μικρής αύξησης του πλάτους

της όταν επικρατούν άνεμοι μέτριας έντασης, που όμως είναι κατά πολύ μικρότερη τόσο της αύξησης στο πλάτος των modes του προσγειωτή με συχνότητες κοντά σε αυτή των 2.4 Hz όσο και της αύξησης του πλάτους του θορύβου που προέρχεται από το περιβάλλον για την ίδια έντασης άνεμο (Dahmen et al., 2021), το συχνοτικό της περιεχόμενο καθώς και το πλάτος της μπορεί να θεωρηθούν ανεπηρέαστα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αυτό φυσικά δεν ισχύει όπως περιγράφηκε αναλυτικά νωρίτερα για τα modes του προσγειωτή που είναι άκρως εξαρτημένα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (μεταβολές στην πίεση, στην θερμοκρασία, στην ένταση του ανέμου κτλ) τόσο ως προς τις συχνότητες όσο και ως προς τα πλάτη τους.

Αφού αποκλείστηκε το ενδεχόμενο η πηγή για τον συντονισμό των 2.4 Hz να είναι ο προσγειωτής τόσο από την μη καταγραφής της κατά τις πρώτες 48 ώρες λειτουργίας του SEIS όσο και από την απουσία συσχέτισης της με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι πρόκειται για μια φυσική resonance του περιβάλλοντος. Η δημιουργία αυτής οφείλεται στην ανισοτροπία της δομής του υπεδάφους που βρίσκεται κάτω από τον προσγειωτή και το οποίο αποτελείται από στρώσεις βασάλτη και ιζηματογενών πετρωμάτων δηλαδή από στρώσεις γεωλογικών υλικών με αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες (Dahmen et al., 2021).

5.1.3. Mode του 1 Hz

Το mode του 1 Hz παραμένει σταθερό τόσο ως προς το συχνοτικό περιεχόμενο όσο και ως προς το πλάτος για όλες τις ημέρες των καταγραφών αφού δεν επηρεάζεται ούτε από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες ούτε από τους σεισμούς. Αναφέρεται αλλιώς και ως tick - noise καθώς δημιουργείται από την ύπαρξη μη επιθυμητών σημάτων κατά την απόκτηση δεδομένων από το E - Box ανά χρονικά διαστήματα του ενός δευτερολέπτου (Ceylan et al.,2020). Ωστόσο μπορεί να παρατηρηθούν κάποιες υψηλότερες αρμονικές οι οποίες όμως δεν οφείλονται σε μηχανικά σφάλματα, όπως το 1 Hz mode, αλλά σχετίζονται με τον μετασχηματισμό του Fourier για ένα επαναλαμβανόμενο σήμα του ενός Hz (Dahmen et al., 2021). Τέτοιες αρμονικές μπορεί να παρατηρηθούν στις συχνότητες των 2 και 4 Hz αλλά και σε άλλες συχνότητες. Στο **σχήμα 1** φαίνονται οι τρόποι με τους οποίους παρουσιάζονται στα φασματογραφήματα και οι 3 τύποι των modes που περιγράφηκαν ανωτέρω.

5.1.4. Modes και αναγνώριση σεισμών

Μέσω των διαφορετικών modes που διεγείρονται σε ένα σήμα (εξαιρούνται τα modes του 1 Hz διότι πρόκειται για μηχανικά σφάλματα κατά την λειτουργία των οργάνων) καθίσταται δυνατή η

διάκριση μεταξύ των σεισμικών και μη σεισμικών γεγονότων. Έτσι αν σε ένα σήμα παρατηρείται μόνο η mode των 2.4 Hz και καμία άλλη οριζόντια γραμμή πάνω από αυτήν την συχνότητα στα φασματογραφήματα τότε το σήμα είναι σεισμικής προέλευσης αφού η 2.4 Hz επειδή είναι ανεπηρέαστη από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορεί να διεγερθεί μόνο μέσω των σεισμικών γεγονότων. Η διέγερση αυτή έχει ως τελικό αποτέλεσμα την ενίσχυση του πλάτους των σεισμών πάνω από τα επίπεδα του σεισμικού θορύβου βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο την ευκολότερη αναγνώριση των σεισμικών γεγονότων .

Αντίστοιχα αν σε ένα σήμα παρατηρούνται μόνο τα modes του προσγειωτή διαφόρων συχνοτήτων τότε το σήμα δε σχετίζεται με τα σεισμικά γεγονότα καθώς αυτα δεν μπορούν να διεγείρουν τα modes του προσγειωτή, αλλά μόνο οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορούν. Ωστόσο είναι δυνατόν σε ένα σήμα να συνυπάρχουν ταυτόχρονα και τα δύο είδη mode δηλαδή και του προσγειωτή και των 2.4 Hz. (Clinton et al.,2020). Αυτή η περίπτωση όμως είναι σχετικά σπάνια λόγω του μικρού πλάτους της 2.4 Hz mode το οποίο δεν της επιτρέπει να γίνεται εμφανής όταν επικρατούν άνεμοι μεγάλης έντασης λόγω του μεγάλου πλάτους θορύβου που δημιουργούν. Πιο συγκεκριμένα τα γεγονότα που εντοπίζονται στις καταγραφές και τα οποία δεν έχουν σεισμική προέλευση έχουν ονομαστεί ως donks, glitches, μοτίβα θερμοκρασίας, πτώση πιέσης, evening rumbles, crostalk, VBB whistling, sunset chirps, sandmen αλλά και άλλα σήματα που προκαλούνται από τις δραστηριότητες του προσγειωτή όπως είναι η κίνηση του ρομποτικού χεριού.

5.1. Donks

Τα donks είναι γεγονότα υψηλών συχνοτήτων μεγαλύτερα των 12 Hz περίπου και μικρής διάρκειας ,μερικών μόνο δευτερολέπτων.Η ενέργεια τους καταγράφεται ταυτόχρονα και από τις οριζόντιες αλλά και από την κάθετη συνιστώσα του σεισμομέτρου και παρά τις μεγάλες συχνότητες που χαρακτηρίζουν το μεγαλύτερο μέρος αυτής,μπορεί να υπάρχει και ένα μικρότερο μέρος της, μια ουρά, με συχνότητες κάτω των 8 Hz.

Η δημιουργία των donks οφείλεται στην εκτόνωση με την μορφή ενέργειας των τάσεων που συσσωρεύονται λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών στα εξαρτήματα του προσγειωτή,στο SEIS καθώς και στο καλώδιο που είναι υπεύθυνο για την ένωση αυτών των δύο και οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την διαστολή και συστολή αυτών.Η απότομη έκλυση αυτής της ενέργειας προκαλεί την διέγερση πολλών modes του προσγειωτή τα οποία μπορούν να διεγερθούν όχι μόνο μέσω των donks αλλά και από την δράση του αέρα.

Τα σήματα αυτά παρατηρούνται κυρίως στις περιόδους όπου η δράση του ανέμου δεν είναι τόσο έντονη ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες που δυσχεραίνουν την αναγνώριση και παρατήρησή τους(Ceylan et. al.) και παρουσιάζουν χρονική κατανομή η οποία συσχετίζεται με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.Το μικρό τους μέγεθος το οποίο αν και μπορεί να προσομειαστεί με αυτό των SF γεγονότων δεν προκαλεί σύγχυση μεταξύ αυτών των δύο ,εξαιτίας οχι μόνο του διαφορετικού συχνοτικού τους περιεχομένου αλλά και της έλλειψης διέγερσης των mode του προσγειωτή από τα SF γεγονότα.Άλλη μια διαφορά είναι ότι τα donks μπορούν να παρατηρηθούν αρκετές φορές στις καταγραφές ακόμα και σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, όπως αυτού του 1 λεπτού(Compare et, al., 2021) κάτι που δεν ισχύει για τα SF. Στο **σχήμα 1** φαίνεται ο τρόπος με των οποίων απαντώνται στις καταγραφές.

5.2. Glitches

Glitches είναι η ονομασία που δόθηκε στον τύπο θορύβου που δημιουργείται από τα μηχανήματα και είναι μικρής διάρκειας περίπου 25 - 30 s και μεγάλου πλάτους. Στα φασματογράμματα εμφανίζονται ως κάθετα τμήματα ευρυζωνικής ενέργειας σε συχνότητες από πολύ μικρές μέχρι και πάνω από 1 Hz για τις πιο ασθενείς μέχρι τις πιο ισχυρές αντίστοιχα(Ceylan et. al., 2020) χωρίς αυτό να αποκλείει την καταγραφή μερικών glitches από το SP σεισμόμετρο,οι οποίες οφείλονται στην συμπεριφορά των αισθητήρων στις θερμοκρασιακές μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας.Η καταγραφή τους μπορεί να γίνει είτε από την μια ή από τις τρεις ή ακόμα και από τις έξι συνιστώσες και των δύο σεισμομέτρων του VBB και του SP ταυτόχρονα, αν και από τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει ως τώρα πιο συνήθης είναι η καταγραφή τους από το VBB σεισμόμετρο.

Χάρη στο συχνοτικό τους εύρος το οποίο συμπίπτει με τις συχνότητες στις οποίες εκλύεται η ενέργεια πολλών σεισμικών γεγονότων και ιδιαίτερα των σεισμών μεγάλης περιόδου, γίνεται εμφανής η αρνητική επίδραση της παρουσίας τους στην ερμηνεία των σεισμικών γεγονότων.

Στην αρχή της καταγραφής ορισμένων glitches πολλές φορές παρατηρούνται αρκετά υψηλές συχνότητες.Το χρονικό αυτό διάστημα των υψηλών συχνοτήτων αναφέρεται ως Spike και ένα διακριτό του στοιχείο είναι ότι συνήθως συνυπάρχει με donk του οποίου η ενέργεια φτάνει χαμηλότερα από τα 5 Hz.Άλλες φορές παρατηρείται η καταγραφή μιας glitch να ξεκινάει πριν να έχει ολοκληρωθεί η καταγραφή της προηγούμενης και αυτό το φαινόμενο έχει ονομαστεί ως

polyglitches(John-Robert Scholz et al., 2020).Η κύρια περίοδος παρατήρησης τους είναι όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν δεν είναι τόσο έντονες όπως είναι νωρίς το απόγευμα και το βράδυ.

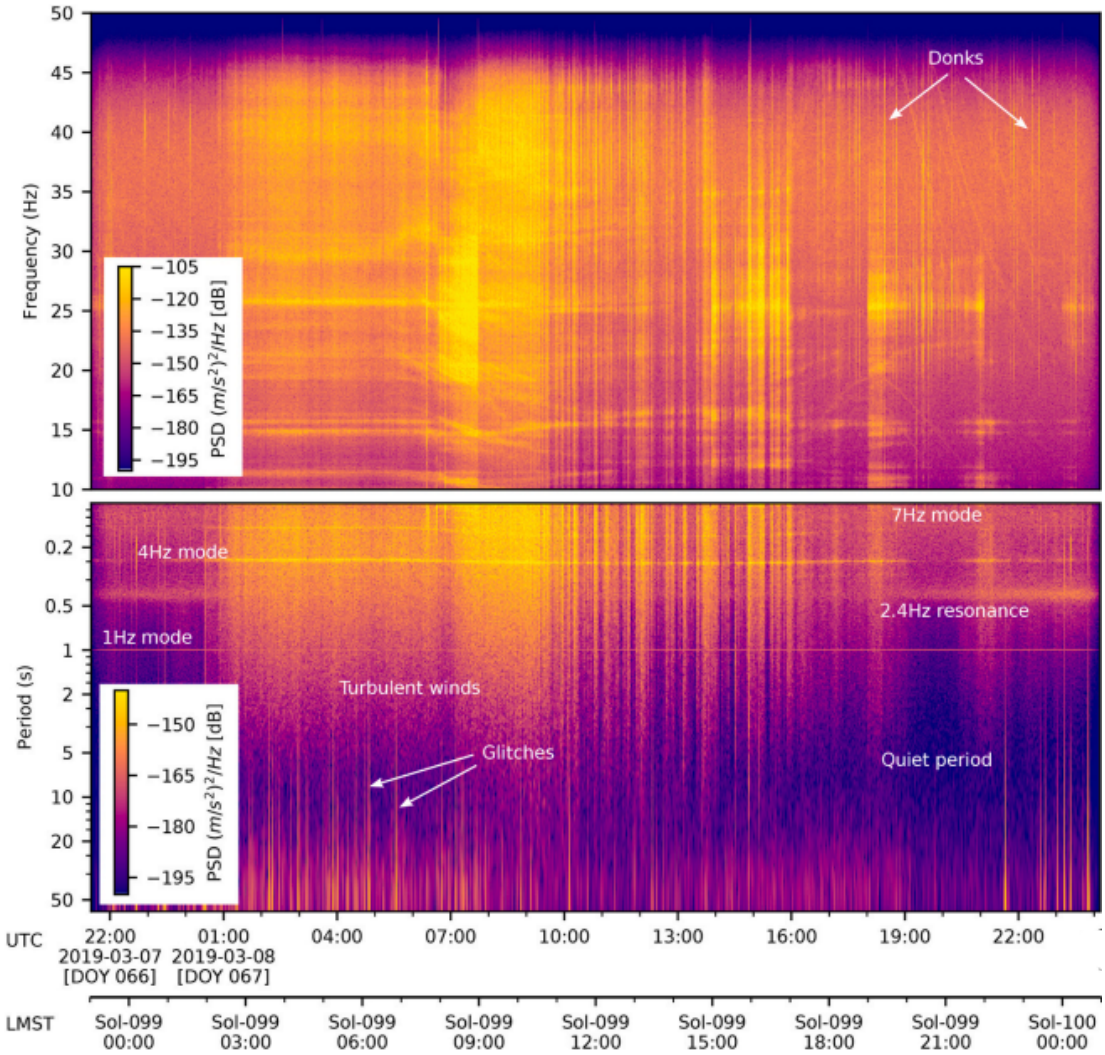
Οι glitches μπορούν να διακριθούν σε δύο πιθανές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργήθηκαν.Μια κατηγορία είναι οι glitches οι οποίες οφείλονται στην αντίδραση των μηχανημάτων του SEIS στις θερμοκρασιακές μεταβολές και η άλλη είναι αυτές οι οποίες οφείλονται στην μεταβολή της κλίσης του SEIS. Για την δεύτερη περίπτωση η μεταβολή που αναφέρεται είναι πολύ μικρή, της τάξης των μερικών νανοακτινών, αλλά αρκετή για να προκαλέσει διαφορετική προβολή του διανύσματος της βαρύτητας σε κάθε συνιστώσα με αποτέλεσμα την δημιουργία των glitches (Ceylan et al., 2020).

Η πληθώρα των παρατηρούμενων glitches ανήκει στην πρώτη κατηγορία γιατί παρόλη την προσπάθεια που έγινε για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απομόνωση του SEIS από τις εξωτερικές συνθήκες με την τοποθέτηση της WTS ,της σφαίρας για την δημιουργία αεροστεγών συνθηκών κλπ, οι θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται στο απομονωμένο κουτί του SEIS είναι της τάξης των 15 k, οι οποίες οδηγούν στην συσσώρευση τάσεων στα μηχανήματα που τελικά εκφράζεται με την έκλυση ενέργειας και τη δημιουργία των glitches(John-Robert Scholz et al., 2020).Η πηγή αυτών των τύπων των glitches και η πηγή των donks ταυτίζονται.

Άλλες πηγές δημιουργίας των glitches μπορεί να είναι η κίνηση του ρομποτικού χεριού όπως διαπιστώνεται από την εμφάνισή τους στα χρονικά διαστήματα που πραγματοποιείται μια κίνηση αυτού.Αυτή η συσχέτιση μπορεί να εξηγηθεί από μια μικρή αλλαγή της κλίσης του εδάφους εξαιτίας της κίνησης, η οποία συνεπάγεται αλλαγή στην προβολή του διανύσματος της βαρύτητας και τελικά την δημιουργία των glitches.Επίσης μια ακόμα αλλαγή της κλίσης που οφείλεται στην αντίδραση είτε του καλωδίου που ενώνει το SEIS με τον προσγειωτή ή του περίσσιου φορτίου (load Shunt) με τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της έντασης του αέρα είναι υπεύθυνη για μια ακόμα κατηγορία των glitches η οποία παρουσιάζει θετική πόλωση κατά την διάρκεια της ημέρας και ανητική κατά την διάρκεια της νύχτας.

Λόγω της έντονης παρουσίας τους στις καταγραφές σε συχνότητες που καταγράφονται τα σεισμικά γεγονότα και της μεγάλης διακύμανσης του πλάτους τους ,δημιουργούν επιπλοκές στην εφαρμογή πολλών σεισμολογικών μεθόδων ,οπως είναι η ανάλυση του σεισμικού θορύβου

και για αυτό θα πρέπει όπου είναι δυνατόν οι ανωμαλίες αυτές να απομακρύνονται ή να αποφεύγονται.Η μορφή τους στα φασματογραφήματα φαίνεται στο **σχήμα 1.**



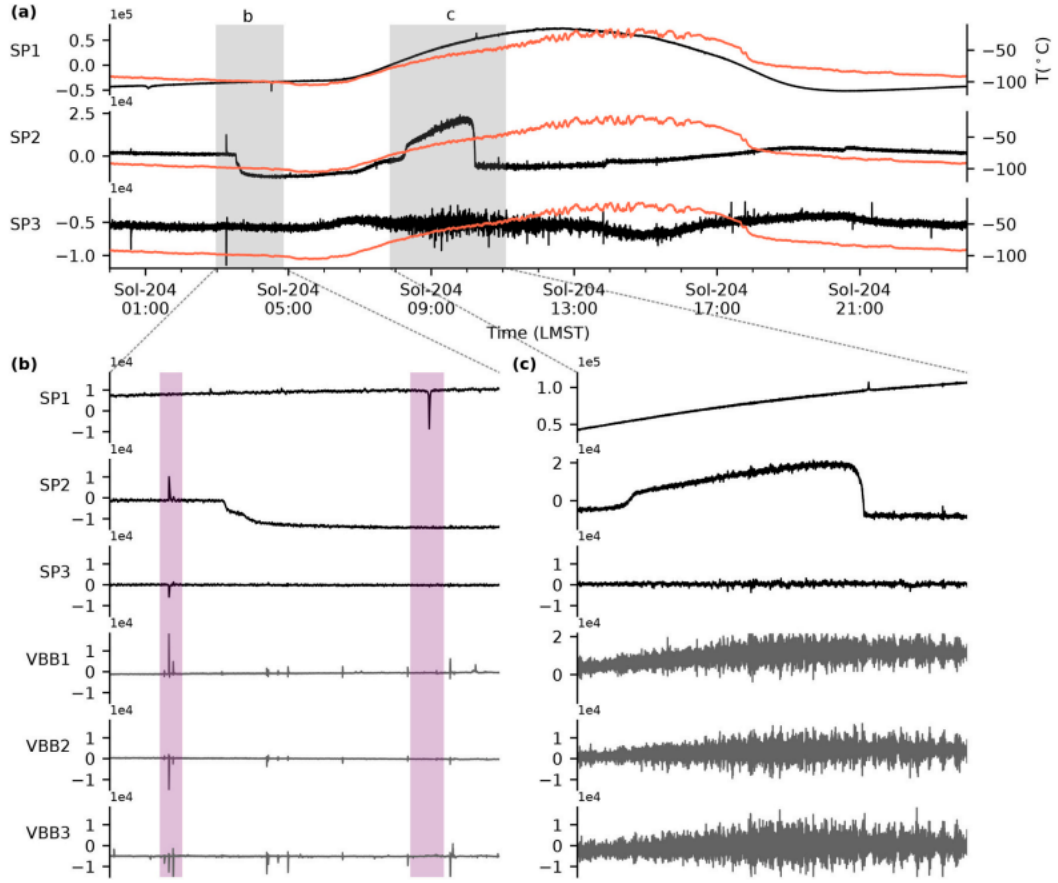
Σχήμα 1. Φασματογράφημα της επιτάχυνσης της ημέρας 99 στο οποίο φαίνονται τόσο τα διάφορα modes όσο και οι glitches και τα donks(Ceylan et al.,2020).

5.3. SP Temperature Pattern

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την διάρκεια της ημέρας επηρεάζουν τους αισθητήρες και των δύο σεισμομέτρων αλλά ιδιαιτέρως του SP.Από την παρατήρηση και των τριών συνιστωσών του,εντοπίστηκε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο στις αντιδράσεις του ως προς τις

θερμοκρασιακές μεταβολές το οποίο περιέχει μεγάλου πλάτους Spikes και μεγάλης περιόδου drift.

Πιο αναλυτικά η συνιστώσα που επηρεάζεται περισσότερο από τις θερμοκρασιακές μεταβολές είναι η κάθετη (SP1) καθώς ακολουθεί παρόμοια τάση με αυτή της θερμοκρασίας.Από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες η SP2 είναι σχετικά πιο ευαίσθητη στις μεταβολές της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2** και από την απότομη πτώση που παρουσιάζει στις χαμηλές θερμοκρασίες και από τη θετική τάση που ακολουθεί αργότερα με τις υψηλότερες θερμοκρασίες των πρωινών ωρών.Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι παρά την χαμηλή ευαισθησία της SP3 οριζόντιας συνιστώσας αλλά και του VBB αισθητήρα καταγράφονται glitches που δημιουργήθηκαν από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Στην SP3,τα glitches έχουν πάντα αρνητική διεύθυνση σε αντίθεση με αυτήν στην SP2 συνιστώσα που είναι πάντα θετική.Στην αρχή του μοτίβου του SP σεισμομέτρου οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι περίπου στους -48 βαθμούς °C.Ενώ η SP1 συνιστώσα έχει μια θετική και μια αρνητική διεύθυνση glitches τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος του μοτίβου όπου η θερμοκρασία είναι περίπου στο -48 βαθμούς °C.

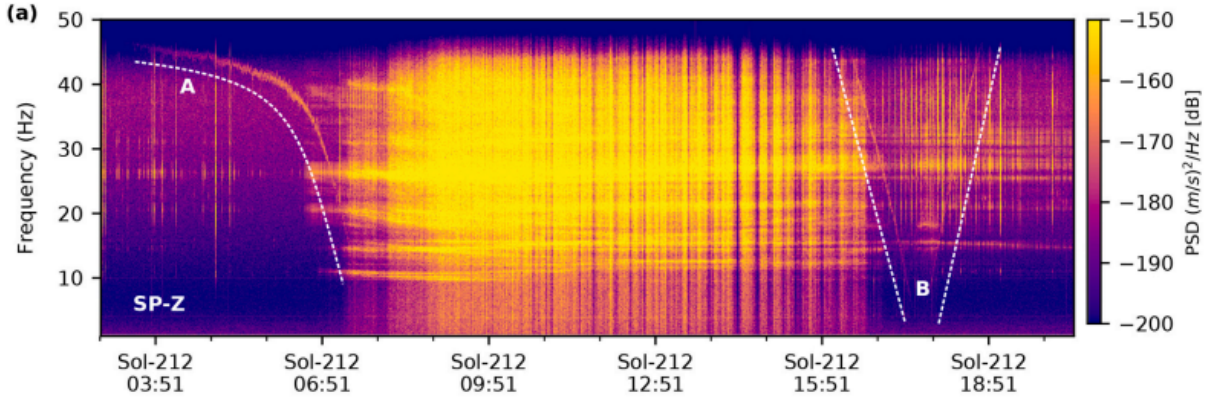


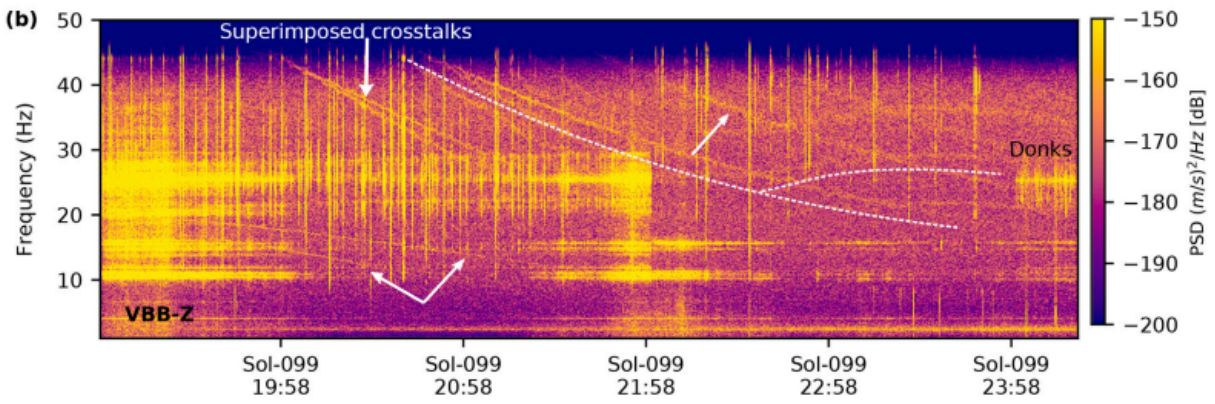
Σχήμα 2. Δεδομένα από τον SP αισθητήρα για την ημέρα 204 μαζί με τις αντίστοιχες μετρήσεις του αέρα και της θερμοκρασίας(a).Τα σχήματα (b) και (c) εστιάζουν στα γκρι τμήματα του (a) δείχνοντας της μη επεξεργασμένες καταγραφές των ταχυτήτων του SP και του VBB.Τα μωβ τμήματα στο (b) δείχνουν της SP temperature glitches(Ceylan et al.,2020).

Ωστόσο το παραπάνω αναφερόμενο μοτίβο δεν είναι σταθερό στον χρόνο καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το θερμοκρασιακό καθεστώς που επικρατεί κάθε χρονική στιγμή. Έτσι για παράδειγμα όταν άρχισαν να λειτουργούν οι θερμαντήρες του SEIS από την Sol 168 και μετά οι παρατηρούμενες glitches στις δύο οριζόντιες συνιστώσες (SP2 και SP3) των -56 βαθμών °C καταγράφονται πλέον στους - 47 βαθμούς °C όπως αναφέρθηκε και πιο αναλυτικά στο παραπάνω μοτίβο που περιγράφηκε με βάση το σχήμα 2 για την sol 204 (Ceylan et al., 2020).

5.4. Crosstalks και Whistling

Το φαινόμενο της ανεπιθύμητης καταγραφής παροδικών σημάτων παρατηρείται και στα δύο είδη σεισμόμετρων (VBB και SP).Οι συχνότητες των παροδικών αυτών σημάτων δεν είναι σταθερές με τον χρόνο αλλά παρουσιάζουν μία σταθερή αύξηση ή μείωση ως προς αυτόν και η παρουσία τους είναι πιο εμφανής σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10 Hz(**σχήμα 3**).Τα ανεπιθύμητα σήματα δημιουργούνται στα ηλεκτρονικά συστήματα είτε στα κανάλια είτε στο καλώδιο που ενώνει το SEIS με τον προσγειωτή και θεωρούνται ως μικρής κλίμακας των μη επεξεργασμένων velocity counts λόγω της συμφωνίας στην οποία βρίσκεται η συχνότητα τους με αυτά και αναφέρονται ως crosstalks.

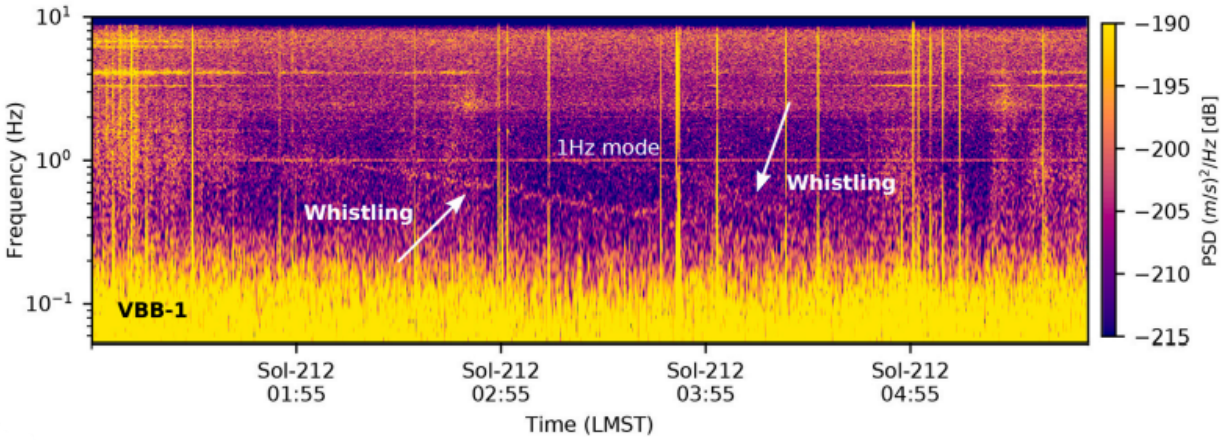




Σχήμα 3. Φασματογράφημα της ταχύτητας της κάθετης συνιστώσας του SP σεισμομέτρου για την ημέρα 212 στο οποίο φαίνεται η μεταβολή των συχνοτήτων με τον χρόνο στα crosstalks σήματα (a).Στο (b) φαίνεται στο φασματογράφημα της ημέρας 099 τα Superimposed crosstalks(Ceylan et al.,2020).

Μια πιο περίπλοκη μορφή των ανεπιθύμητων σημάτων δημιουργείται όταν για την οριζόντια συνιστώσα SP και για τις συνιστώσες VBB χρησιμοποιούνται καταγραφές από κάθε αισθητήρα του SP και VBB (και από τους 6) σεισμόμετρο στους οποίους υπάρχει καταγραφή από το εν λόγω σήμα.Οι μορφές αυτών στις καταγραφές έχουν ονομαστεί ως Superimposed Crosstalks(**σχήμα 3**)

Όταν ένα ανεπιθύμητο σήμα που παρατηρείται στα δεδομένα του SEIS καταγράφεται μόνο από την μία συνιστώσα και δεν δημιουργεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα σε άλλα κανάλια, όπως συμβαίνει με τα Crosstalks σήματα, εκτός από αυτό που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του τότε ονομάζεται whistling(Ceylan et al.,2020).



Σχήμα 4. Φασματογράφημα ταχύτητας της ημέρας 212 στο οποίο φαίνεται το ανεπιθύμητο σήμα Whistling(Ceylan et al.,2020).

5.5. Wind ,Pressure Drops,Evening Rumbles

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δρουν ως πηγή για την δημιουργία τριών τύπων γεγονότων μη σεισμικής προέλευσης οι οποίοι οφείλονται στην δράση του αέρα και στις διαφορές πιέσεως. Παρόλης της προσπάθειας που έγινε να μειωθεί η επίδραση του αέρα στις καταγραφές των σεισμόμετρων μέσω του προσεκτικού σχεδιασμού και της τοποθέτησης της ασπίδας για την προστασία από τις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος και από την δράση του αέρα (WTS), ο άνεμος παραμένει ο κύριος υπεύθυνος για πληθώρα γεγονότων μη σεισμικής προέλευσης όπως είναι ο σεισμικός θόρυβος που δημιουργείται εξαιτίας του. Ακόμα τα modes του προσγειωτή ,που και αυτά οφείλονται στην δράση του ,έχουν πολλές ομοιότητες ως προς την μορφή τους με αυτήν των σεισμικών γεγονότων,συνθήκη που μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση των δύο, ειδικά στις περιόδους που χαρακτηρίζονται από μεγάλης έντασης ανέμους όπως είναι το χρονικό διάστημα στη μέση της ημέρας.

Οι καταγραφές παροδικών πτώσεων πίεσης είναι πολύ συχνές εξαιτίας της χαμηλής πίεσης θερμού αέρα ο οποίος ανέρχεται πάνω από από τον ψυχρότερο και κινείται σε περιστροφική κίνηση προς τα μπροστά.Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται dust devil γιατί κατά την κίνησή του μπορεί να συμπαρασύρει άμμο και σκόνη και είναι ιδιαίτερα σύνηθες στην αρειανή ατμόσφαιρα ιδιαίτερα στις πρώτες ώρες του απογεύματος όπου οι άνεμοι είναι έντονοι και οι θερμοκρασίες υψηλές.

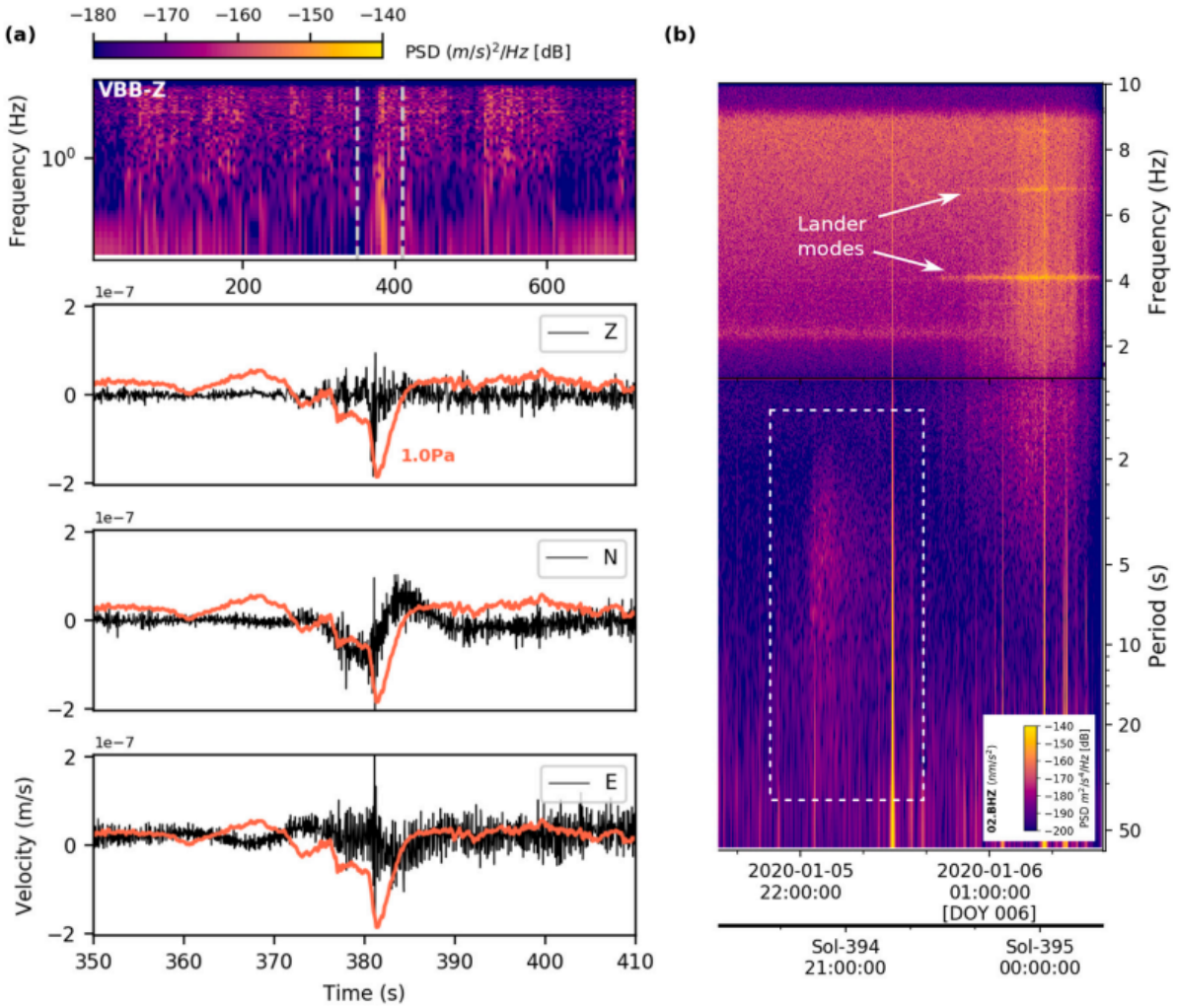
Η χαμηλής πίεσης αυτή δίνη καθιστά δυνατή την εκτίμηση της ακαμψίας του υπεδάφους μέσω της κλίσης που δημιουργείται από το αρνητικό φορτίο που ασκείται στο υπέδαφος το οποίο παράγεται από την ΄΄ανασήκωση΄΄ του εδάφους κατά την κίνησή του. Όσο μικρότερη είναι η κλίση που καταγράφεται τόσο πιο άκαμπτο είναι το υλικό του υπέδαφους και αντίστροφα.

Άλλο ένα γεγονός μη σεισμικής προέλευσης το οποίο παρατηρείται στις καταγραφές και οφείλεται στην πίεση είναι αυτό που έχει ονομαστεί ως evening rumbles.Η μορφή αυτών των σημάτων μπορεί να προσομοιαστεί και με τη μορφή ενός συγκεκριμένου σεισμού αλλά και με τη μορφή που δημιουργούν οι ριπές ανέμου στις καταγραφές.

Πιο αναλυτικά για την πρώτη περίπτωση ο τύπος αυτός σεισμικού γεγονότος είναι τα γεγονότα χαμηλών συχνοτήτων (LF) με τα οποία όμως παρουσιάζουν ομοιότητα μόνο στον τομέα του φάσματος και ως διακριτικό χαρακτηριστικό αυτών χρησιμοποιείται η πολύ μεγάλη διάρκεια των

σημάτων που δημιουργούνται από τις πιέσεις(2 - 3 ωρών) καθώς και η μεγάλη περίοδος διέγερσης τους.Για την δεύτερη περίπτωση ο διαχωρισμός προκύπτει από την απουσία διέγερσης από τα evening rumbles των mode του προσγειωτή που είναι και το κύριο χαρακτηριστικό της δράσης των ριπών ανέμου.

Η καταγραφή αυτών των γεγονότων εκτός από το κανάλι της πίεσης γίνεται και από το VBB σεισμόμετρο και ιδιαίτερα από την κάθετη συνιστώσα αυτού όπως δείχνει και η συσχέτιση του αισθητήρα της πίεσης και της VBB - Z κατά την καταγραφή ισχυρών γεγονότων.Για τα πιο ασθενή γεγονότα καμία τέτοια συσχέτιση δεν μπορεί να παρατηρηθεί καθώς το πλάτος του σήματος από τον αισθητήρα της πίεσης είναι πολύ μικρότερο από τα επίπεδα του θορύβου και άρα μη παρατηρήσιμο.Ο μόνος τρόπος σε αυτήν την περίπτωση αναγνώρισής τους είναι μέσω των καταγραφών από το VBB σεισμόμετρο.



Σχήμα 5. Στο (α) φαίνονται τα pressure drops που δημιουργούνται για πτώση πίεσης πλάτους περίπου 1Pa(πορτοκαλί γραμμή στα σεισμογράμματα).Στο (b) φαίνεται η διαφορά των συχνοτήτων μεταξύ του evening rumble (στο ορθογώνιο) και των modes του προσγειωτή (Ceylan et al.,2020).

Το evening rumbles είναι ένα γεγονός το οποίο δεν παρατηρήθηκε εξαρχής στις καταγραφές αλλά η πρώτη του εμφάνιση έγινε μετά την Solar Conjunction. Λόγω αυτού θεωρείται ότι είναι γεγονός που σχετίζεται με την μεταβολή των εποχών και πλέον αυτό το σήμα μεγάλης περιόδου (> 25 s) το συναντάμε συχνά στις καταγραφές που μελετάμε στις ήσυχες περιόδους του απογεύματος.

5.6. Sunset Chirps, Sandmen

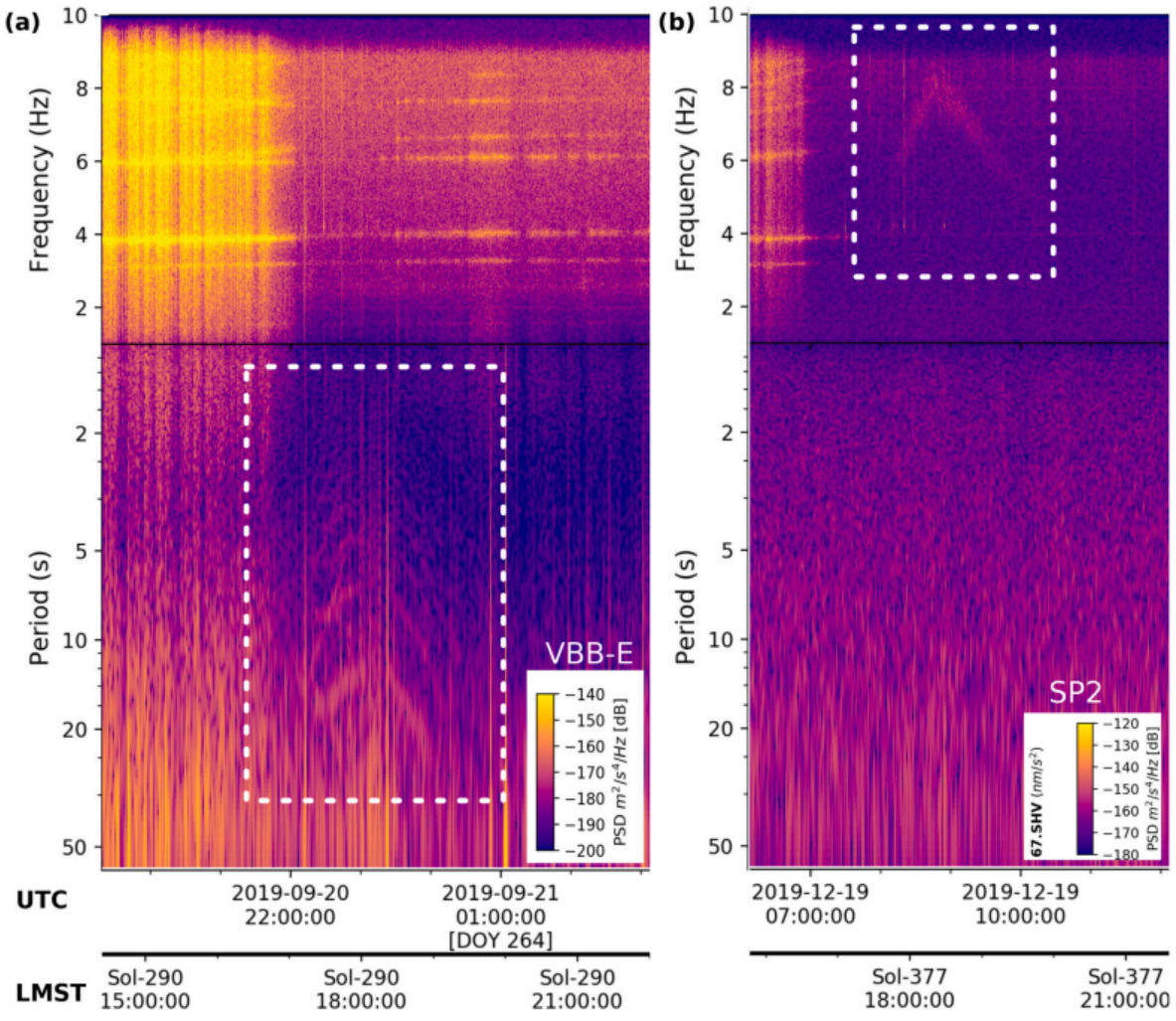
Ένα ακόμα μη σεισμικό γεγονός το οποίο συνδέεται με τη δράση του αέρα και πιο συγκεκριμένα με την απουσία της, είναι το Sunset Chirps το οποίο παρατηρείται τις απογευματινές ώρες που χαρακτηρίζονται από σχετικά ήρεμες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αναγνωρίζονται μόνο στα φασματογραφήματα από την χαρακτηριστική μορφή τους που θυμίζει ψαροκόκκαλο (**σχήμα 6**)και η διάρκειά τους κυμαίνεται από μισή μέχρι μία ώρα.Η μορφή τους είναι απόρροια της διασποράς της ενέργειας τους.Η διασπορά αυτή πραγματοποιείται μέσω αρμονικών των οποίων οι συχνότητες αυξάνονται με τον χρόνο καταγραφής αποκλειστικά από το VBB σεισμόμετρο και μάλιστα από την οριζόντια ανατολική του συνιστώσα.Το συχνοτικό τους περιεχόμενο κυμαίνεται σε χαμηλές συχνότητες με μεγαλύτερη αυτή των 0,5 Hz και ο αριθμός τους στις ημέρες που παρατηρούνται ,γιατί δεν καταγράφονται κάθε ημέρα, είναι πάντα πάνω από 1.

Ανάλογο σήμα με αυτό του Sunset Chirps, το οποίο όμως καταγράφεται αποκλειστικά από την κάθετη συνιστώσα του SP σεισμόμετρου είναι το σήμα που ονομάζεται Sandmen. Οι ομοιότητες αυτών των δύο μη σεισμικών γεγονότων είναι ότι εντοπίζονται λόγω της χαρακτηριστικής τους μορφής αποκλειστικά από το φασματογράφημα μιας μόνο συνιστώσας ενός από των δύο τύπων σεισμομέτρων (με διαφορετική συνιστώσα και τύπου σεισμομέτρου για κάθε γεγονός) στις ήσυχες περιόδους του απογεύματος.

Οι διαφορές τους είναι καταρχάς η μορφή τους καθώς το σήμα του Sandman θυμίζει συνήθως την μορφή του ανεστραμμένου γράμματος V**(σχήμα 6**), χωρίς αυτό ωστόσο να είναι καθολικό αφού έχει παρατηρηθεί και με άλλες μορφές πιο κυκλικές ή ακόμα και χωρίς την πλήρη ορατότητα όλων των τμημάτων του.Μια ακόμα διαφορά είναι το συχνοτικό τους περιεχόμενο

όπου για το Sandman κυμαίνεται μεταξύ των 5 - 8 Hz, για ενέργεια σχετικά μικρού πλάτους που εκλύεται για περίοδο διάρκειας 2 ωρών περίπου πάντα στο χρονικό διάστημα των 18:00 - 20:00 LMST.

Ένα ακόμα στοιχείο στο οποίο διαφέρουν αυτά τα σήματα είναι η συχνότητα εμφάνισης τους αφού μπορεί και τα δύο γεγονότα να είναι γεγονότα που δεν εμφανίζονται αναγκαστικά στις καταγραφές κάθε μέρα,αλλά στην ημέρα που θα καταγραφούν το γεγονός του Sandmen θα είναι μοναδικό κάτι που δεν ισχύει για τα γεγονότα του Sunset Chirp, τα οποία είναι πάντα πάνω από ένα.



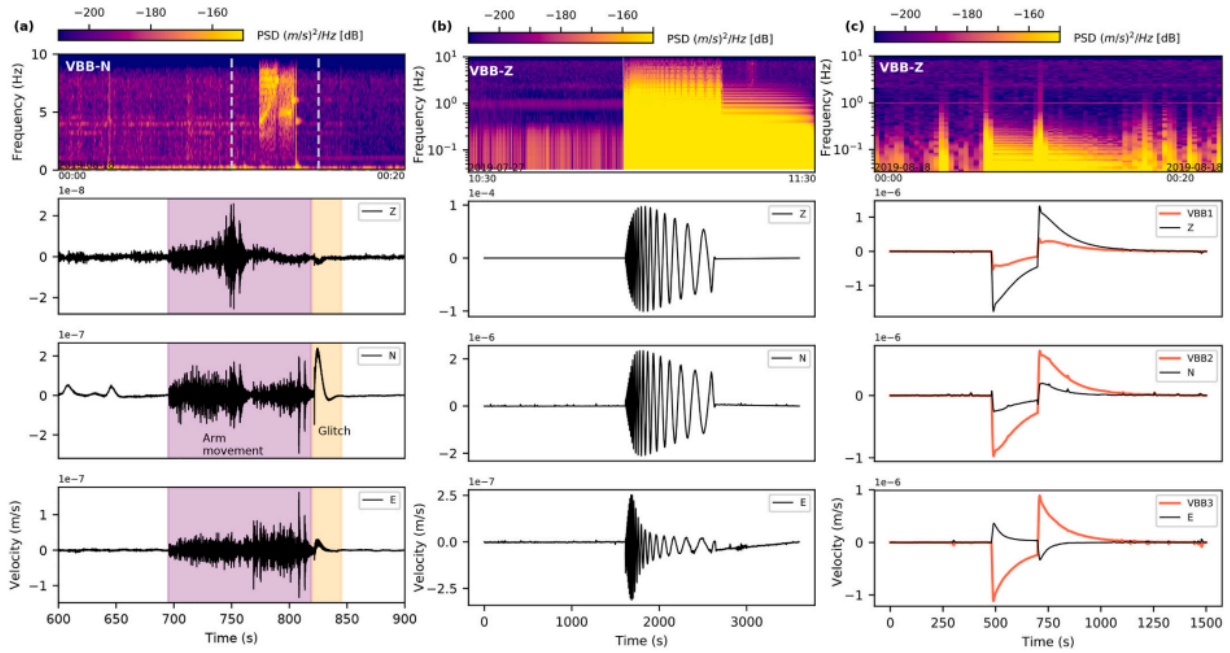
Σχήμα 6. Στο (a) φαίνεται μέσα στο ορθογώνιο το σήμα sunset chirp με την χαρακτηριστική μορφή του ψαροκόκαλου, το οποίο είναι ορατό μόνο από την ανατολική συνιστώσα του VBB σεισμομέτρου ενώ στο ορθογώνιο του σχήματος (b) φαίνεται το σήμα sandman το οποίο είναι ορατό μόνο στην SP2 συνιστώσα(Ceylan et al.,2020).

5.7. Άλλα Συνήθη Σήματα

Η τελευταία κατηγορία μη σεισμικών γεγονότων που παρατηρούνται είναι αυτά που σχετίζονται με τις δράσεις του προσγειωτή ή με τις διαδικασίες συντήρησης των επιστημονικών οργάνων. Αυτά τα σήματα είναι σχετικά εύκολο να διαχωριστούν από τα σεισμικά γεγονότα ανεξαρτήτως ομοιοτήτων που μπορεί να έχουν καθώς πρόκειται για τεχνητά σήματα όπου ο χρόνος καταγραφής τους ,ο χρόνος δηλαδή που αναμένεται η παρουσία τους, είναι γνωστός από τις πληροφορίες του προσγειωτή.

Μερικά παραδείγματα τέτοιων σημάτων είναι η ενέργεια που καταγράφεται από την κίνηση του ρομποτικού χεριού από τα δύο σεισμόμετρα με συχνότητες από 4 Hz και πάνω(**σχήμα 7**).Όπως και η ευρυζωνική συχνοτήτων ενέργεια η οποία εκλύεται λόγω των διαδικασιών συντήρησης και ελέγχου ποιότητας των αισθητήρων του SEIS και η οποία και αυτή καταγράφεται και από τα δύο σεισμόμετρα(**σχήμα 7**).Στους ελέγχους αυτούς περιλαμβάνεται και επανατοποθέτηση στο κέντρο (κεντράρισμα) και η βαθμονόμηση των αισθητήρων του SEIS .

Άλλη μια πηγή δημιουργίας αυτών των γεγονότων είναι τα θερμαντικά σώματα που περιλαμβάνει το SEIS.Τα σώματα αυτά διασφαλίζουν ότι οι θερμοκρασιακές συνθήκες στις οποίες καλούνται να λειτουργήσουν τα μηχανήματα του SEIS είναι λειτουργικές για αυτά και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενεργοποίησης τους όταν οι θερμοκρασίες σε οποιοδήποτε μηχανικό ή ηλεκτρονικό στοιχείο του πέσει κάτω από τους - 65 βαθμούς °C.Η ενέργεια που εκλύεται με αυτόν τον τρόπο λόγω της δράσης των θερμαντικών σωμάτων είναι ευρυζωνική και καταγράφεται και αυτή και από τα δύο σεισμόμετρα. Λόγω της ξαφνικής έκλυσής της και της πιο χρονοβόρας απόσβεσής της δημιουργούνται στις καταγραφές των σεισμογραμάτων χαρακτηριστικές μορφές που θυμίζουν κλειστό βαγόνι (**σχήμα 7**).



Σχήμα 7. Στο (a) φαίνεται η κίνηση του ρομποτικού χεριού στις καταγραφές, η διάρκεια αυτης της κίνησης οριοθετείται από τις διακεκομμένες κατακόρυφες γραμμές. Στο (b) η βαθμονόμηση του οργάνου και στο (c) η λειτουργία των θερμαντικών σωμάτων (Ceylan et al.,2020).

6. Εσωτερική δομή του Άρη

Ένας από τους κύριους στόχους της αποστολής InSight ήταν η μελέτη της εσωτερικής δομης του πλανήτη Άρη. Παρακάτω περιγράφονται τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης για κάθε ένα στρώμα του Άρη (φλοιός,μανδύας,πυρήνας) τα οποία προέκυψαν από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των σεισμικών μεθόδων με τα αποτελεσματα των γεωχημικών μετρήσεων και γεωδυναμικών παρατηρήσεων.

6.1. Φλοιός

Για την μελέτη του φλοιού χρησιμοποιούνται τα σεισμικά κύματα, που όταν συναντήσουν κατά τη διάδοσή τους μία ασυνέχεια ανακλώνται είτε ως κύματα του ιδίου τύπου (εγκάρσια ή επιμήκη) είτε ως κύματα του άλλου τύπου εξαιτίας της μετατροπής που υφίστανται π.χ. ένα εγκάρσιο κύμα στην επαφή με μία ασυνέχεια μπορεί να μετατραπεί σε επίμηκες και το αντίστροφο (S σε P και P σε S).

Από την επεξεργασία αυτών των φάσεων προκύπτουν δύο πιθανά μοντέλα για τον φλοιό.Το ένα προβλέπει δύο ασυνέχειες και το άλλο τρείς. Οι δύο πρώτες ασυνέχειες επιβεβαιώνονται από

όλες τις αναλύσεις ενώ η ύπαρξη της μεγαλύτερου βάθους τρίτης ασυνέχειας δεν είναι τόσο σίγουρη.

Πιο αναλυτικά η πρώτη ασυνέχεια συναντάται σε βάθος περίπου 9 Km, η δεύτερη σε βάθος περίπου 15 - 25 Km, εύρος στο οποίο η τιμή κυμαίνεται ανάλογα την παραμετροποίηση που έχει χρησιμοποιηθεί για το μοντέλο, ενώ η τρίτη (όταν υποστηρίζεται η ύπαρξή της από το μοντέλο που χρησιμοποιείται) σε βάθος περίπου 39 Km και πρόκειται για διεπαφή όπου η διαφορά των ταχυτήτων στην οποία οφείλεται η δημιουργία της είναι αρκετά μικρότερη από ότι στην μικρότερου βάθους δεύτερη διεπαφή.

Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση των σεισμικών δεδομένων επιτρέπουν αρχικά την εκτίμηση της δομής του φλοιού μόνο στην ευρύτερη περιοχή όπου βρίσκεται ο προσγειωτής.Έτσι στην περίπτωση του μοντέλου των δύο στρωμάτων για τον φλοιό όπου η δεύτερη διεπαφή αναγκαστικά θα είναι η ασυνέχεια moho, η οποία διαχωρίζει τον φλοιό από τον μανδύα, το πάχος του φλοιού κάτω από την θέση του προσγειωτή θα κυμαίνεται μεταξύ των 15 - 25 Km. Ενώ για την περίπτωση του μοντέλου των τριών διεπαφών το πάχος του φλοιού θα κυμαίνεται από 27 έως 47 Km, αφού η ασυνέχεια moho σε αυτήν την περίπτωση είναι η βάση του τρίτου στρώματος (Brigitte Knapmeyer-Endrun et. al., 2021)

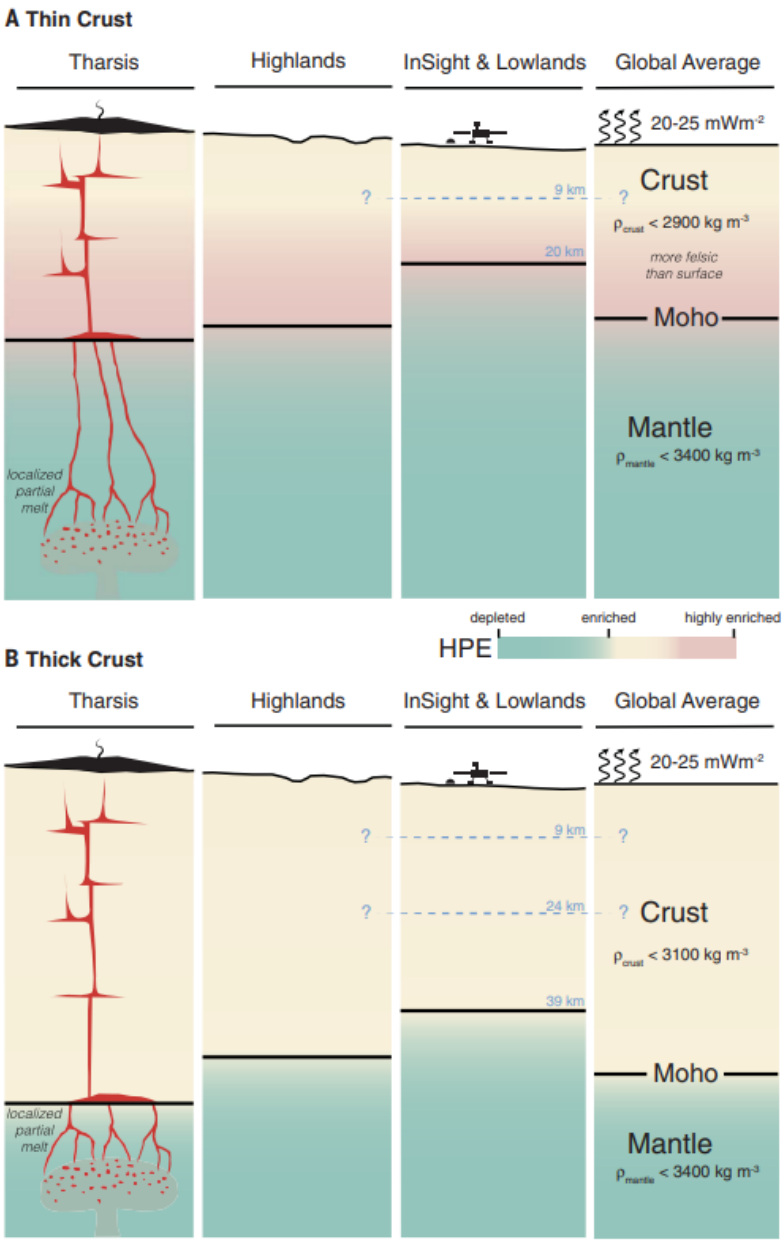
Μέσω της μεθόδου της αναστροφής στο αποτέλεσμα της δομής του φλοιού που ήταν περιορισμένο μόνο για την περιοχή του προσγειωτή σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που επιβάλλει το βαρυτικό πεδίο έγινε δυνατή η εκτίμηση του πάχους του φλοιού για όλο τον Άρη. Έτσι για το μοντέλο των δύο ασυνεχειών ή αλλιώς του μικρού πάχους φλοιού , το πάχος που περιγράφει τον φλοιό ολόκληρου του πλανήτη Άρη κυμαίνεται μεταξύ των 24 - 38 Km. Η μεγαλύτερη τιμή της πυκνότητας του φλοιού που υποστηρίζεται από αυτό το μοντέλο είναι 2.850 $\mathrm{Kg}\ m^{-3}$. Ενώ για το μοντέλο των τριών ασυνεχειών ή αλλιώς του μεγάλου πάχους φλοιού, το πάχος κυμαίνεται μεταξύ των 39 με 72 Km με μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας στα 3.100 $\mathrm{Kg}\ m^{-3}$ (**εικόνα 2**).

Τα δύο αυτά διαφορετικά μοντέλα του φλοιού παρά τις κύριες διαφορές τους, παρουσιάζουν και δύο ομοιότητες. Η μία είναι ότι και από τα δύο μοντέλα προβλέπονται τιμές πυκνότητας για τον φλοιό που αν και διαφέρουν μεταξύ τους είναι μικρότερες από αυτήν που εκτιμήθηκε λαμβάνοντας υπόψη μόνο την σύσταση των υλικών που απαντώνται στην επιφάνεια του Άρη

και η οποία υπολογίστηκε περίπου 3.300 Kg/m^3. Το άλλο σημείο συμφωνίας τους είναι στη ροή θερμότητας που συναντάται στις σημερινές συνθήκες που επικρατούν στον Άρη και η οποία και από τα δύο μοντέλα υπολογίζεται μεταξύ των 20 και 25 $\mathrm{mW}\ m^{-2}$.

Η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στον βαθμό εμπλουτισμού του φλοιού ως προς τον μανδύα σε στοιχεία που παράγουν θερμότητα κατά την διάσπασή τους (HPEs). Το μοντέλο του μεγάλου πάχους φλοιού εκτιμάει ότι ο συντελεστής εμπλουτισμού έχει τιμή 13. Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι από τη συνολική ποσότητα των HPEs στοιχείων του Άρη το 55 με 70% αυτών βρίσκονται απομονωμένα στον φλοιό. Ενώ για το μοντέλο του μικρού πάχους φλοιού ο συντελεστής αυτός είναι 21% και υποδεικνύει ότι ο εμπλουτισμός στα HPE πραγματοποιείται κάτω από το επιφανειακό στρώμα (Brigitte Knapmeyer-Endrun et. al.,2021).

Από τα δεδομένα που υπάρχουν μέχρι στιγμής κανένα από τα δύο μοντέλα δεν μπορεί να αποκλειστεί γιατί μπορεί το μοντέλο του μεγαλύτερου πάχους φλοιού να είναι πιο συμβατό με τις συνθήκες που επικρατούν σήμερα στον Άρη αλλά το μοντέλο του μικρού πάχους φλοιού είναι πιο συμβατό με τις σεισμικές παρατηρήσεις.



Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση και των δύο πιθανών μοντέλων της δομής του φλοιού του Άρη (Brigitte Knapmeyer-Endrun et. al.,2021).

6.2. Μανδύας

Για τη μελέτη του μανδύα χρησιμοποιούνται τα ανακλώμενα κύματα δηλαδή τα κύματα που πριν την καταγραφή τους ανακλώνται τουλάχιστον μια φορά στην επιφάνεια του πλανήτη. Ανάλογα με τις φορές που λαμβάνει χώρα η ανάκλαση και το είδος των κυμάτων (εγκάρσια ή επιμήκη)

συμβολίζονται με SS , PP , SSS κ.λ.π. Το σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των κυμάτων είναι η τουλάχιστον διπλή τους διάδοση στο μανδύα. Αυτό επιτρέπει την μεταφορά μέσω των κυματομορφών τους περισσότερων πληροφοριών για τον μανδύα, κάτι το οποίο αδυνατούν να κάνουν εξ ορισμού τους τα απευθείας κύματα.

Έτσι για τα ανακλώμενα αυτά κύματα δημιουργήθηκε το προφίλ των ταχυτήτων μέχρι το βάθος των 800 Km, από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων της γεωφυσικής και σεισμικής αναστροφής (**σχήμα 8**). Από το προφίλ αυτό γίνεται εμφανής η ύπαρξη ενός στρώματος χαμηλών ταχυτήτων, με ταχύτητες 2 - 3 Km/s και 3.5 - 5 Km/s για τα εγκάρσια και επιμήκη κύματα αντίστοιχα. Ακόμα γίνεται εμφανής η ύπαρξη δύο ασυνεχειών. Η μικρότερη από τις δύο αντιπροσωπεύει ένα στρώμα χαμηλών ταχυτήτων στο ανώτερο τμήμα του φλοιού με ταχύτητες από 2 - 3 Km/s και από 3.5 - 5 Km/s για τα εγκάρσια και επιμήκη κύματα αντίστοιχα και εντοπίζεται σε βάθος 5 - 10 Km. Η μεγαλύτερη εντοπίζεται σε βάθος 30 με 50 χιλιομέτρων και είναι πολύ πιθανό να αντιπροσωπεύει το όριο φλοιού - μανδύα (Khan et. al., 2021).

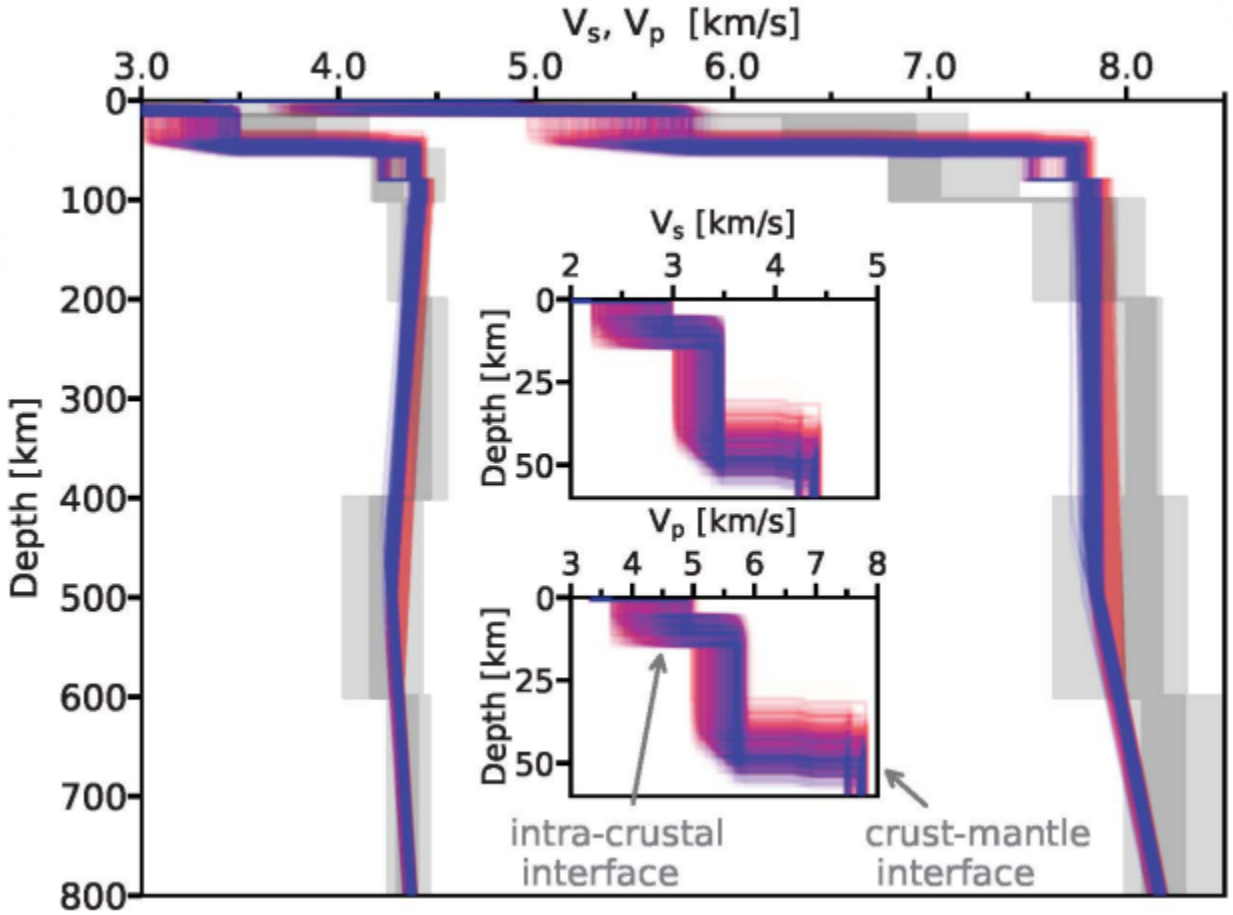
Επίσης από το προφίλ των ταχυτήτων μπορεί να φανεί η ύπαρξη μιας ζώνης χαμηλών ταχυτήτων για τα εγκάρσια κύματα (LVZ) στο βάθος των 400 - 600 Km. Οι παρατηρήσεις που υποστηρίζουν την παραπάνω πρόταση είναι η σταθερή μείωση της βαθμίδας (gradient) της ταχύτητας των S κυμάτων σε αυτό το διάστημα η οποία συνοδεύεται με μια σταθερή αύξηση αυτής από το βάθος των 600 Km και μετά ενώ η μεταβολή της βαθμίδας της ταχύτητας των επιμήκων κυμάτων στο διάστημα από 400 έως 600 Km κυμαίνεται από μηδενική έως θετική. Η ζώνη χαμηλών συχνοτήτων των εγκαρσίων κυμάτων στον Άρη μπορεί να εξηγηθεί από την μεγάλη θερμοκρασιακή βαθμίδα που προκύπτει από το καθεστώς που δημιουργείται από την ύπαρξη πάνω από τον θερμαγωγό μανδύα ενός σχετικά μεγάλου πάχους θερμικού αγώγιμου ορίου το οποίο είναι στάσιμο.

Εκτός από την μεταβολή των ταχυτήτων άλλο ένα αναγνωριστικό στοιχείο της ύπαρξης της LVZ, είναι η παρουσία ασθενής σκιερής ζώνης στην επικεντρική απόσταση των 40 - 60 μοιρών. Η σκιερή αυτή ζώνη αφορά μόνο τα εγκάρσια κύματα και όχι τα επιμήκη καθώς για τα δεύτερα η δημιουργία μιας τέτοιας ζώνης είναι αδύνατη εξαιτίας του μικρού βαθμού επηρεασμού τους από την θερμοκρασία.

Η χαμηλή ζώνη συχνοτήτων του Άρη, η οποία αντιπροσωπεύει στην ουσία την επικράτηση της μείωσης των σεισμικών ταχυτήτων με την αύξηση των θερμοκρασιών έναντι της αύξησης των

ταχυτήτων με την αύξηση του βάθους , επηρεάζει σημαντικά όχι μόνο τον μανδύα αλλά και τον φλοιό και την ροή θερμότητας στην επιφάνεια του Άρη.

Η επιρροή αυτή φαίνεται από την εύρεση μέσω του συνδυασμού των περιορισμών που προκύπτουν από τα σεισμικά δεδομένα και των γεωδυναμικών μοντέλων, σημαντικά μεγαλύτερης ποσότητας στοιχείων που παράγουν θερμότητα κατά την διάσπασή τους (HPEs) στον φλοιό από ότι στον αρχικό μανδύα.Ο εμπλουτισμός αυτός είναι 13 με 20 φορές μεγαλύτερος και ευθύνεται για την μέτρια έως υψηλή ροή θερμότητας στην επιφάνεια του πλανήτη (Khan et. al., 2021).



Σχήμα 8. Προφιλ ταχυτήτων των εγκαρσίων και επιμήκων κυμάτων μέχρι το βάθος των 800 km(Amir Khan et. al., 2021).

6.3. Πυρήνας

Η μελέτη του πυρήνα ενός πλανήτη είναι ένα πολύ σημαντικό στάδιο στην κατανόηση της εξέλιξης του και της γεωλογικής του ιστορίας καθώς αποτελεί τον πυρήνα μιας πληθώρας

διεργασιών οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις συνθήκες που παρατηρούμε σήμερα σε αυτόν. Τέτοιες διεργασίες είναι η δημιουργία του πλανητικού δυναμό, η μεταφορά θερμότητας από τα ρεύματα του μανδύα και άλλες, οι οποίες επηρεάζουν την επιφάνεια του πλανήτη μέσω της ηφαιστειακής και τεκτονικής του δράσης.

Λαμβάνοντας υπόψη την μάζα του Άρη, την ροπή αδράνειας του και άλλες γεωφυσικές παρατηρήσεις για αυτόν αλλά και γεωχημικά στοιχεία, διαπιστώθηκε πως πιθανώς βρίσκεται σε υγρή και όχι σε στερεή κατάσταση και το εύρος της ακτίνας του υπολογίστηκε μεταξύ των περίπου 1.700 με 1.900 Km. Οι τιμές αυτές δείχνουν έναν πολύ μεγάλο πυρήνα τόσο ως προς αυτόν της γης όπου η ακτίνα του έχει υπολογιστεί περίπου στα 1.220 km αλλά όσο και προς τις αρχικές εκτιμήσεις που κυμαίνονταν μεταξύ 1.600 - 1.810 km (Konoplin et al., 2006). Το εκτιμώμενο εύρος για την ακτίνα του Άρη είναι τόσο ευρύ που δεν μπορεί να αποκλειστεί κανένα από τα δύο μοντέλα για τη δομή του μανδύα, η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των δύο είναι η ύπαρξη ή όχι του κατώτερου στρώματος μανδύα.

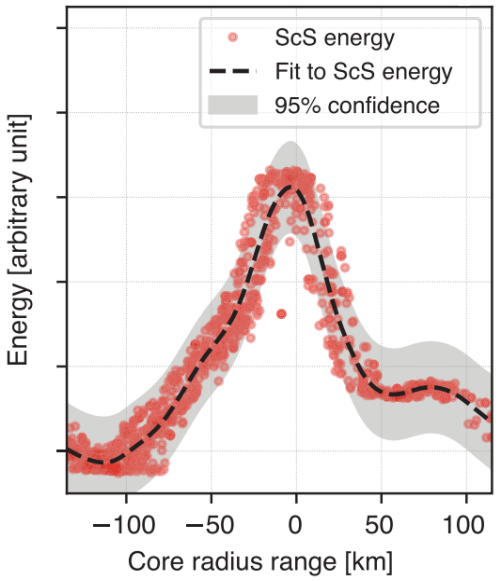
Έτσι όταν η ακτίνα βρίσκεται κοντά στο κατώτατο όριο των εκτιμήσεων το οποίο υποδηλώνει εκτός από μικρότερο μέγεθος πυρήνα και σύσταση αυτού με λιγοτερα ελαφριά στοιχεία, η ύπαρξη κατώτερου μανδύα παρόμοιου με της Γης είναι δυνατή. Αντίθετα όταν η ακτίνα βρίσκεται κοντά στο ανώτερο όριο των εκτιμήσεων, ο μεγάλου μεγέθους αυτός πυρήνας με σύσταση πλούσια σε ελαφριά στοιχεία καθιστά αδύνατη την ύπαρξή του.

Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η βελτίωση της παραπάνω εκτίμησης καθώς η ακτίνα του πυρήνα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη όχι μόνο με την σύστασή αυτού και με την ύπαρξη κατώτερου στρώματος μανδύα αλλά και με τα δυναμικά καθεστώτα που επιβάλλονται από τον πυρήνα στον μανδύα.

Η βελτίωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παρατήρησης σεισμικών κυμάτων τα οποία πριν την καταγραφή τους από τα σεισμόμετρα έχουν πρώτα αλληλεπιδράσει με τον πυρήνα.Τα σεισμικά αυτά κύματα προέρχονται από τον τύπο σεισμικών γεγονότων χαμηλών συχνοτήτων (LF) όπου όπως δείχνουν και οι χαμηλές συχνότητές τους, κάτω από 1 Hz, διαδίδονται εκτός από τον φλοιό και στον μανδύα, μεταφέροντας έτσι μέσω των κυματομορφών τους πληροφορίες για τα βαθύτερα στρώματα του Άρη.

Επειδή στην περίπτωση του Άρη ο πυρήνας βρίσκεται σε υγρή κατάσταση τα κύματα που θα βοηθήσουν στην μελέτη του είναι τα εγκάρσια,εξαιτίας της ιδιότητάς τους να μη διαδίδονται σε υγρά μέσα. Έτσι όταν κατά τη διάδοσή της η ακτίνα του εγκάρσιου κύματος έρθει σε επαφή με το όριο μανδύα - πυρήνα (στέρεος - υγρός) και είναι οριζόντια πολωμένη (SH) δε θα μπορέσει να το διαπεράσει και θα ανακλαστεί αναγκαστικά ξανά πίσω στον μανδύα,τα κύματα αυτά συμβολίζονται ως ScS. Η μόνη περίπτωση για τη διάδοση των εγκαρσίων κυμάτων στον υγρό πυρήνα είναι μέσω της μετατροπής των κάθετα πολωμένων κυμάτων (SV) σε επιμήκη κύματα (P) όπου όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται η θυσία ενός μέρους της ενέργειάς τους για την πραγματοποίηση της εν λόγω μετατροπής (Stähler et al., 2021).

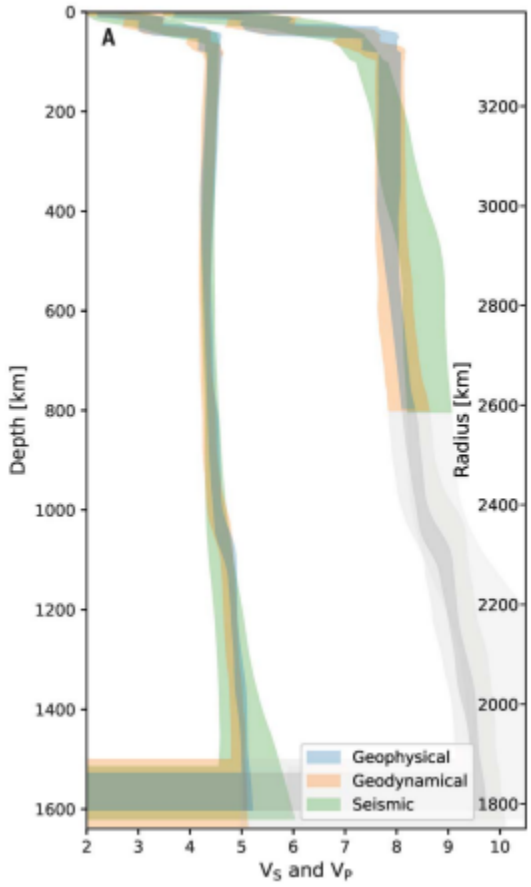
Οπότε εφαρμόζοντας τη μέθοδο Slant Stack στις ενέργειες των σημάτων για τα οποία ήταν δυνατή η αναγνώριση των ScS φάσεων χρησιμοποιώντας τους χρόνους διαδρομής των ScS που έχουν υπολογιστεί για 5.000 διαφορετικά μοντέλα μανδύα με γνωστή ακτίνα πυρήνα μπορεί να καθοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η ακτίνα του πυρήνα. Αυτό επιτυγχάνεται αντιστοιχώντας το παράθυρο που η ενέργεια του σήματος αυξάνεται (άξονας x) με την εκτιμώμενη ακτίνα του πυρήνα όπου πραγματοποιείται αυτή η αύξηση (άξονας y),όπως φαίνεται και στο **σχήμα 9.**



Σχήμα 9. Η Slant Stack μέθοδος με την οποία υπολογίστηκε η ακτίνα του πυρήνα.Όπου το 0 εύρος πυρήνα αντιστοιχεί σε πυρήνα με ακτίνα περίπου 1830 km(Stähler et al., 2021).

Ακόμα από τα προφίλ των ταχυτήτων που δημιουργήθηκαν για τα εγκάρσια και για τα επιμήκη κύματα από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων αναστροφής (σεισμικής, γεωδυναμικής, γεωφυσικής) παρατηρείται μια σαφής αύξηση της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων σε βάθος περίπου 1050 Km. Η αύξηση αυτή μπορεί να προσομοιαστεί με αυτήν που

παρατηρείται στην Γη σε βάθος 410Km, όπου βρίσκεται η σεισμική ασυνέχεια, η οποία σηματοδοτεί την αρχή της μεταβατικής ζώνης του μανδύα. Από το προφίλ των ταχυτήτων των επιμήκων κυμάτων για βάθος μεγαλύτερο των 800 Km δεν μπόρεσε να αντληθεί κάποια πληροφορία.



Σχήμα 10. Προφίλ των ταχυτήτων των εγκαρσίων και επιμήκων κυμάτων για βάθος έως και 1600 km. Το προφίλ αυτό δημιουργήθηκε βασιζόμενο στην γεωφυσική,σεισμική και γεωδυναμική μέθοδο αναστροφής. Η έλλειψη χρώματος μετα το βάθος των 800 km στα επιμήκη κύματα υποδηλώνει την έλλειψη πληροφορίας για αυτά τα βάθη απο τα συγκεκριμένα κύματα (Simon C. Stähler et al., 2021).

Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που βρέθηκαν ότι επικρατούν στο όριο μανδύα - πυρήνα (περίπου 1900 - 2000 K) το οποίο βρίσκεται σε βάθος περίπου 1520 - 1600 Km αποκλείεται η ύπαρξη ενός σχετικά πυκνού και θερμικά απομονωμένου κατώτερου μανδύα καθώς σε αυτές τις συνθήκες ο μπριγμανίτης (bridgmanite) δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί. Έτσι δεν υπάρχει στρώμα μπριγμανίτη στον κατώτερο μανδύα, όπως αυτού που παρατηρείται στην Γη και είναι υπεύθυνο για την ασυνέχεια των 660 Km βάθους, που να εμποδίζει την ροή θερμότητας από τα μεγαλύτερα βάθη προς την επιφάνεια (Stähler et al., 2021). .

Οι συνθήκες αυτές είναι ιδανικές για τη δημιουργία ενός δυναμό σχετικά νωρίς στην γεωλογική ιστορία του Άρη, η δράση του οποίου ελέγχεται από τη θερμοκρασία. Η ύπαρξη αυτού του δυναμό είναι συμβατή με τον παρατηρούμενο μαγνητισμό του φλοιού αφού το δυναμό είναι μια

ροή λιωμένων μετάλλων μέσα στο πυρήνα η κίνηση της οποίας δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα και τελικά το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη.

Το μεγάλο μέγεθος του πυρήνα του Άρη, η ακτίνα του υπολογίστηκε στο 1.820±40 km, καθιστά τη σύστασή του να περιλαμβάνει εκτός από βαριά πυκνά μέταλλα (όπως είναι ο σίδηρος) και πιο ελαφριά στοιχεία για να είναι συμβατή με τις εκτιμήσεις της μάζας του.Ετσι σύμφωνα με την σύσταση των μετεωριτών που προέρχονται από τον Άρη και της πυκνότητας του πυρήνα του (> 6 gr/cm) εκτός από το θείο που βρίσκεται σε μεγάλες αναλογίες στους S-- μετεωρίτες από τον Άρη, συμπεριλαμβάνονται στη σύσταση του και άλλα ελαφριά στοιχεία όπως C , O , H , N , S, κ.λ.π. καθώς και σίδηρος και νικέλιο από τα βαριά μέταλλα. Ωστόσο το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής των χημικών στοιχείων στον πυρήνα είναι αυτό του σιδήρου και του θείου.

7. Μεθοδολογία

Για τον ορισμό της διάρκειας και του συχνοτικού περιεχομένου των γεγονότων δημιουργήθηκαν μέσω του προγράμματος InSight SEIS GUI (Karakostas et al., 2023) τα σεισμογράμματα και τα φασματογράμματα των σεισμών A κατηγορίας που περιέχονται στον σεισμικό κατάλογο 12. Τα γεγονότα που επιλέχθηκαν για επεξεργασία σε αυτήν την εργασία είναι όλα A ποιότητας , εξαιτίας των ευδιάκριτων φάσεων των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων που χαρακτηρίζουν τα γεγονότα αυτής της ποιότητας.

Επειδή οι σεισμοί στον Άρη είναι κατά κύριο λόγο μικρού πλάτους η αρχική τους αναγνώριση δεν είναι το ίδιο εύκολο να να γίνει μέσω των σεισμογραμμάτων όπως γίνεται με τους σεισμούς στη Γη αλλά μόνο μέσω του φασματογραφήματος.

Το φασματογράφημα αποτελεί την δισδιάστατη οπτική απεικόνιση της μεταβολής των συχνοτήτων (άξονας y) από τις οποίες αποτελείται ένα σεισμόγραμμα με τον χρόνο (άξονας x).

Ωστόσο με την βοήθεια του χρώματος μπορεί να αποδοθεί στο σχήμα και μια τρίτη διάσταση, αυτή του πλάτους του σήματος για κάθε μια συχνότητα από την οποία αυτό απαρτίζεται. Η χρωματική κλίμακα κυμαίνεται μεταξύ διαφορετικών αποχρώσεων του μπλε, που αντιπροσωπεύει τα τμήματα του σήματος με χαμηλό πλάτος και του κίτρινου που αντιπροσωπεύει τα μεγάλου πλάτους τμήματα.

Το InSight SEIS GUI δημιουργεί για κάθε γεγονός το φασματογράφημα της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης και για τις τρεις (3) διευθύνσεις (BHZ , BHN , BHE). Από την ταυτόχρονη παρατήρηση των εννέα (9) αυτών φασματογραφημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί μια αρχική εκτίμηση για το χρονικό παράθυρο όπου παρατηρείται καταγραφόμενη ενέργεια μεγαλύτερου πλάτους από την ενέργεια που έχει καταγραφεί πριν και μετά από αυτό το ορισμένο χρονικό παράθυρο καθώς και για τις συχνότητες στις οποίες αυτή εκλύεται. Η ενέργεια αυτή απεικονίζεται με έντονο κίτρινο χρώμα και προϊδεάζει για την πιθανή καταγραφή σεισμικού γεγονότος σε αυτό το χρονικό διάστημα. Έτσι, από τα φασματογραφήματα καθίσταται δυνατός ο ορισμός του συχνοτικού περιεχομένου αλλά και μια πρώτη εκτίμηση της χρονικής διάρκειας αυτού.

Για το χρονικό παράθυρο και τις συχνότητες που έχουν επιλεχθεί από την παρατήρηση των φασματογραφημάτων δημιουργούνται τα αντίστοιχα σεισμογράμματα. Από αυτά μπορεί να οριστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια ο χρόνος της πρώτης καταγραφής των επιμήκων κυμάτων (P), των εγκαρσίων κυμάτων (S), σε όσα γεγονότα είναι εμφανής, και το τέλος των κυμάτων ουράς που συμβολίζει την τελευταία καταγραφή σεισμικού κύματος από τον σταθμό για τον σεισμό που μελετάμε. Οι χρόνοι που έχουν επιλεγεί για τα προαναφερθέντα στοιχεία για τους σεισμούς Α ποιότητας που μελετήθηκαν φαίνονται στον **πίνακα 1** μαζί με το συχνοτικό περιεχόμενο του κάθε γεγονότος καθώς και τον συνολικό χρόνο καταγραφής αυτών και το χρονικό διάστημα που προκύπτει από την διαφορά του χρόνου της πρώτης άφιξης των επιμήκων κυμάτων απο τον εγκαρσίων. Οι δύο χρόνοι που αναφέρθηκαν τελευταίοι είναι και οι χρόνοι στους οποίους θα βασιστεί η δημιουργία των σχημάτων που θα αναλυθούν στην συνέχεια. Ακόμα στο παράρτημα παρατίθενται τα φασματογραφήματα και σεισμογράμματα που δημιουργήθηκαν και για τα 12 γεγονότα Α ποιότητας που μελετήθηκαν.

Η επιλογή της κορυφής για την φάση των επιμήκων κυμάτων γίνεται στον χρόνο όπου το πλάτος της ενέργειας που απεικονίζεται στο σεισμόγραμμα είναι εμφανώς μεγαλύτερο από το πλάτος του καταγραφόμενου θορύβου.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για τα εγκάρσια κύματα μόνο που η πρώτη άφιξη των κυμάτων σημειώνεται την χρονική στιγμή που το πλάτος της αναγραφόμενης ενέργειας στο σεισμόγραμμα είναι μεγαλύτερο από το πλάτος των επιμήκων κυμάτων , όπου είναι και τα κύματα που αναγράφονται πρώτα σε ένα σταθμό λόγω της μεγαλύτερης τους ταχύτητας.

Ωστόσο πολλές φορές ακόμα και σε γεγονότα που έχουν χαρακτηριστεί ως ποιότητα Α δεν είναι εμφανής στο σεισμόγραμμα η πρώτη άφιξη των εγκαρσίων κυμάτων με αποτέλεσμα να μην μπορεί να οριστεί με ακρίβεια η πρώτη χρονική άφιξη αυτών.

Ως τέλος των κυμάτων ουράς ορίζεται η χρονική στιγμή όπου η αναγραφόμενη ενέργεια στο σεισμόγραμμα έχει το ίδιο πλάτος με την ενέργεια που έχει αναγραφεί πριν από την πρώτη άφιξη των επιμήκων κυμάτων, δηλαδή όταν η ενέργεια έχει το ίδιο πλάτος με το πλάτος του θορύβου που υπήρχε πριν από το σεισμικό γεγονός. Από τη διαφορά του χρόνου που έχει επιλεγεί για την πρώτη άφιξη των επιμήκων κυμάτων και του τέλους των κυμάτων ουράς ορίζεται η διάρκεια καταγραφής του σεισμικού γεγονότος.

Επειδή όμως το πλάτος των σεισμών στον Άρη είναι σχετικά μικρό, πολλές φορές χρειάστηκε κατά την επεξεργασία των σεισμογραμμάτων να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη επιλογή του εύρους, είτε στα φασματογραφήματα, είτε τα σεισμογράμματα, έτσι ώστε να γίνουν ευδιάκριτες οι χρονικές στιγμές που πρέπει να επιλεχθούν για τον ορισμό των στοιχείων που προαναφέρθηκαν.

Ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όλες οι ενέργειες μεγαλύτερου πλάτους που απεικονίζονται στα φασματογραφήματα δεν είναι σεισμικής προέλευσης και για αυτόν τον λόγο η επιλογή του αρχικού χρονικού παραθύρου θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή.

Μερικές πιθανές αιτίες δημιουργίας των μη συσχετιζόμενων με σεισμικά αίτια ενεργειών είναι ο αέρας ο οποίος θέτει σε κίνηση τα συστήματα και όργανα του προσγειωτή καθώς επίσης και η λειτουργία των ίδιων οργάνων του προσγειωτή όπως συμβαίνει με το 1 Hz mode. Οι αιτίες αυτές έχουν περιγραφεί λεπτομερώς σε προγενέστερο τμήμα αυτής της εργασίας.

Γεγονός	Επικεντρική απόσταση	Ποιότητα	Τύπος συχνότητας	min freq (Hz)	max freq (Hz)	Άφιξη P	Άφιξη S	Τέλος κυμάτων ουράς	Διάρκεια	S-P	mean freq (Hz)
S0235b	28.75	A	Broadband	0.2	1	384	0	860	476		0.6
S0864a	28.75	A	Broadband	2	9.2	1809	2050	2876	1067	241	5.6
S1000a	128.29	A	Broadband	0.5	5.3	885	0	3700	2815		2.9
S1094b	59.65	A	Broadband	0.3	5	416	769	2243	1827	353	2.65
S1102a	73.31	A	Broadband	0.3	5	505	938	2088	1583	433	2.65
S1133c	30.19	A	Broadband	0.2	4	230	403	812	582	173	2.1
S1222a	37.01	A	Broadband	0.3	9.7	280	0	5400	5120		5
S0173a	30.01	A	Low Frequency	0.2	1	224	408	1872	1648	184	0.6
S0809a	29.83	A	Low Frequency	0.2	1	405	545	1200	795	140	0.6
S0820a	30.19	A	Low Frequency	0.2	1	405	0	1103	698		0.6
S1022a	30.73	A	Low Frequency	0.3	1	854	0	1009	155		0.65
S1048d	30.19	A	Low Frequency	0.2	0.7	410	0	1260	850		0.45

Πίνακας 1.Σε αυτόν τον πίνακα φαίνεται για κάθε σεισμικό γεγονός Α ποιότητας που μελετήθηκε η χρονική άφιξη των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων του, η μικρότερη και η μεγαλύτερη συχνότητα του, το τέλος του κύματος ουράς καθώς και η διάρκεια του, η μέση τιμή της συχνότητας του και η χρονική διαφορά του χρόνου άφιξης των εγκαρσίων από τον χρόνο άφιξης των επιμήκων κυμάτων του όπως έχουν οριστεί κατά το στάδιο της επεξεργασίας.

8. Αποτελέσματα

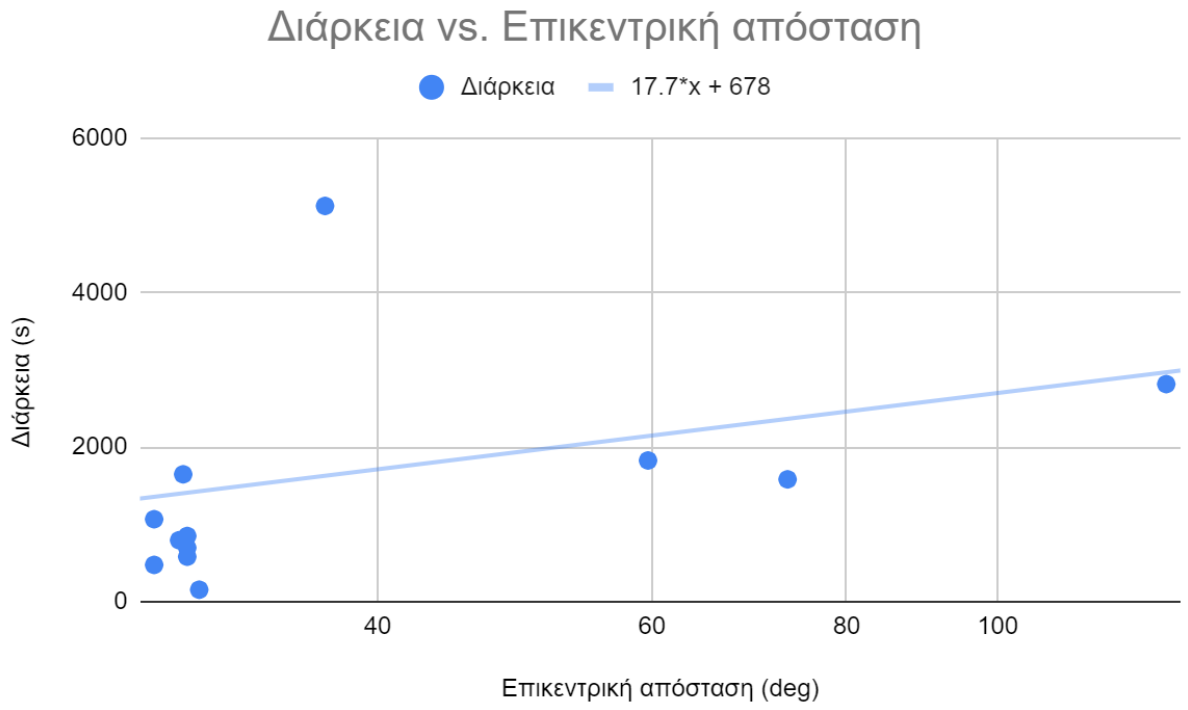
Εξαιτίας του ότι στην φύση δεν υπάρχει ένα τέλεια ομογενές μέσο, η ενέργεια που εκλύεται στην εστία του σεισμού δε διαδίδεται προς μία κατεύθυνση αλλά προς πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε ένα σεισμόγραμμα τελικά να απεικονίζονται οι αφίξεις των σεισμικών ακτίνων του ιδίου γεγονότος, οι οποίες όμως καταγράφονται σε διαφορετικούς χρόνους καθώς αυτές οι ακτίνες ακολούθησαν διαφορετικές διαδρομές για την κάλυψη της απόστασης μεταξύ της εστίας και του σταθμού.

Έτσι η πρώτη άφιξη αντιστοιχεί στην ακτίνα που ακολούθησε την μικρότερη διαδρομή τόσο προς την απόσταση όσο και άρα ως προς τον χρόνο διαδρομής και η τελευταία την μεγαλύτερη.Η διαφορά του χρόνου καταγραφής της τελευταίας άφιξης από τον χρόνο της πρώτης ισοδυναμεί με αυτό που ορίζουμε ως χρονική διάρκεια του γεγονότος.Ο βαθμός διασκορπισμού των σεισμικών κυμάτων εξαρτάται από δύο (2) παράγοντες (Karakostas et al., 2021): Ο πρώτος είναι η αντίθεση μεταξύ των υλικών από τα οποία αποτελείται το μέσο στο οποίο διαδίδονται τα ελαστικά κύματα. Οι αντιθέσεις αυτές προκύπτουν από τις αλλαγές στην πυκνότητα, στον όγκο και στην διατμητική αντοχή αυτών των υλικών και γίνονται εμφανείς από την αλλαγή των σεισμικών ταχυτήτων καθώς η σεισμική ακτίνα διέρχεται από τα διαφορετικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες (χαρακτηριστικά).

Ο δεύτερος είναι το μέγεθος των ετερογενειών του μέσου διαδρομής σε σχέση με το μήκος των σεισμικών κυμάτων. Αν λοιπόν οι ετερογένειες χαρακτηρίζονται ως μεγάλες ή μικρές σε σχέση με το μήκος των σεισμικών κυμάτων οι επιδράσεις του διασκορπισμού στην διάδοση αυτών κυμαίνονται από αμελητέες έως μηδαμινές αντιστοίχως. Στην τελευταία περίπτωση το ανομοιογενές μέσο μπορεί να παρουσιαστεί ως ένα ομογενές μέσο χωρίς κανέναν περιορισμό. Ωστόσο αν το μέγεθος των ετερογενειών και το μήκος των σεισμικών κυμάτων είναι παρόμοιο τότε η επίδραση του διασκορπισμού στην διάδοση των σεισμικών κυμάτων είναι έκδηλη.

Την μεγαλύτερη όμως επίδραση του διασκορπισμού την παρατηρούμε σε μέσα που χαρακτηρίζονται από την συνύπαρξη και των δύο προαναφερθέντων παραγόντων, των αντιθέσεων στις ιδιότητες των υλικών που ισοδυναμεί με αντιθέσεις στις ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων και στο παρόμοιο μέγεθος ετερογενειών και σεισμικών ακτίνων.

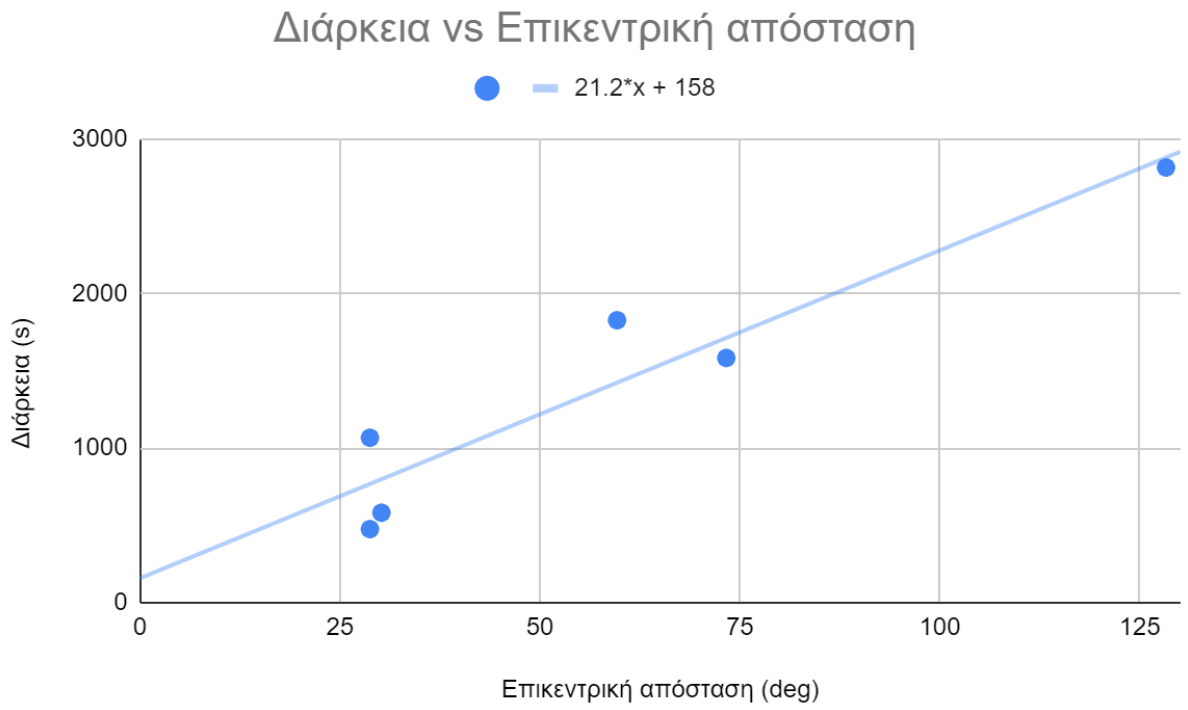
Έτσι για την εύρεση ή όχι της ύπαρξης συσχέτισης μεταξύ της χρονικής διάρκειας των σεισμικών γεγονότων η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τα χρονικά παράθυρα που έχουν οριστεί για κάθε γεγονός σε προγενέστερο βήμα και της επικεντρικής απόστασης αυτών χρησιμοποιείται το σχήμα στο οποίο χαρτογραφείται η διάρκεια του σεισμικού γεγονότος στον άξονα x και η επικεντρική απόσταση των γεγονότων στον άξονα y (**σχήμα 11**).



Σχήμα 11. Σχηματική απεικόνιση της χρονικής διάρκειας (άξονας y) και της επικεντρικής απόστασης (άξονας x) των 11 γεγονότων A κατηγορίας που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία. Η κατανομή των σημείων δείχνει ότι η χρονική διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος επειδή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το μέγεθός του δηλαδή την ενέργεια που αυτό έχει, εισάγει μεγάλη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα εμποδίζοντας έτσι να φανεί γραφικά η συσχέτιση μεταξύ αυτής και της επικεντρικής απόστασης. Εδώ αυτό φαίνεται από το γεγονός S1222a που είναι πολύ μεγαλύτερης ενέργειας από τα υπόλοιπα και για αυτό βρίσκεται σε τόσο μεγάλη απόσταση από την ευθεία που δημιουργείται.

Σε αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι η κατανομή σχεδόν όλων των γεγονότων βρίσκεται σε μικρή σχετικά απόσταση από την ευθεία που δημιουργείται. Η παρατήρηση αυτή όμως δεν ισχύει για το γεγονός S1222a, του οποίου η θέση βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από την ευθεία. Αυτό συμβαίνει διότι το S1222a είναι γεγονός πολύ μεγαλύτερης ενέργειας σε σχέση με τα υπόλοιπα. Αυτό επιτρέπει στο σεισμικό σήμα να ξεπερνάει το σεισμικό θόρυβο για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι στα υπόλοιπα γεγονότα με αποτέλεσμα και η χρονική του διάρκεια να

εμφανίζεται πολύ μεγαλύτερη, ορίζοντας τη χρονική διάρκεια ενός γεγονότος ως τη διαφορά της πρώτης άφιξης από την τελευταία άφιξη, από το τελευταίο δηλαδή σημείο του σήματος που είναι ορατό πάνω από το θόρυβο που δημιουργείται από το περιβάλλον. Ωστόσο η μεγαλύτερη του ενέργεια αποτρέπει την κατηγοριοποίηση του με τον ίδιο τρόπο που κατηγοροποιούνται τα υπόλοιπα γεγονότα αυτού του σχήματος τα οποία έχουν παρόμοια ενέργεια μεταξύ τους. Για αυτό κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί ξανά το ίδιο σχήμα στο οποίο όμως δε θα συμπεριληφθεί το σεισμικό γεγονός S1222a (**σχήμα 12**)



Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση της χρονικής διάρκειας(άξονας y) και της επικεντρικής απόστασης(άξονας x) όλων των γεγονότων A κατηγορίας εκτός από το γεγονός S1222a.Σε αυτό το σχήμα στο οποίο έχουν συμπεριληφθεί μόνο γεγονότα με παρόμοιο μέγεθος(ενέργεια) είναι πιο εμφανής γραφικά η συσχέτιση μεταξύ της χρονικής διάρκειας και της επικεντρικής απόστασης από το **σχήμα 11** χωρίς αυτό όμως να αναιρεί την ύπαρξη αβεβαιοτήτων , οι οποίες οφείλονται στο ότι το μέγεθος των γεγονότων μπορεί να είναι παρόμοιο όμως δεν είναι ακριβώς ίδιο.

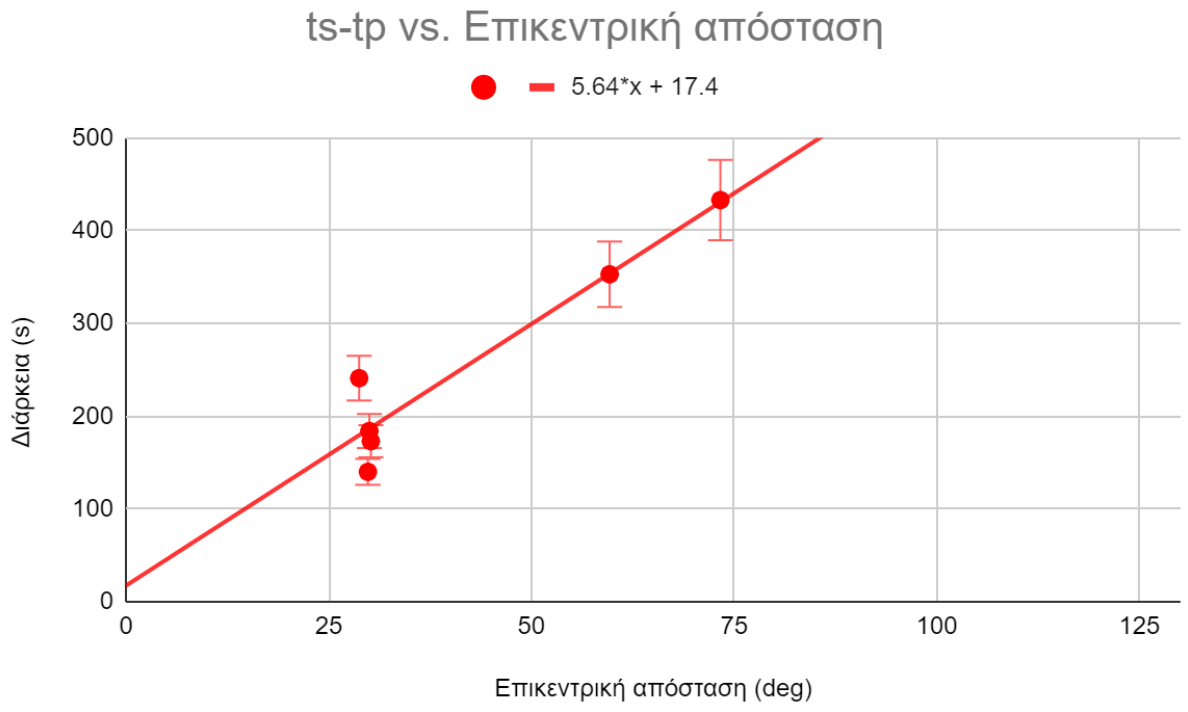
Εδώ παρατηρούμε ότι η κατανομή όλων των σημείων είναι πολύ κοντά στην ευθεία που δημιουργείται, γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχει προφανής συσχέτιση μεταξύ της διάρκειας και της επικεντρικής απόστασης.

Παρόλα αυτά στην σχηματική αυτή απεικόνιση υπάρχει ένα ποσοστό αβεβαιότητας το οποίο προέρχεται από ότι τα γεγονότα βρίσκονται κοντά και όχι πάνω στην ευθεία. Αυτή η αβεβαιότητα

οφείλεται στην διαφορά των μεγεθών των σεισμικών γεγονότων που αν και παραπλήσια (με εξαίρεση το μέγεθος του S1222a που είναι αρκετά μεγαλύτερο από τα υπόλοιπα) δεν είναι ίδια.

Έτσι ακόμα και αν ο ανομοιογενής ρηγόλιθος, υλικό που χαρακτηρίζει τη δομή των επιφανειακών στρωμάτων του Άρη όπου διαδίδονται τα ελαστικά κύματα και επιτρέπει τη διάχυση των σεισμικών κυμάτων, ήταν ένα τέλεια ομοιόμορφο μέσο πάλι η θέση των σημείων δε θα βρίσκονταν ακριβώς πάνω στην ευθεία εξαιτίας της ανομοιομορφίας στις τιμές των μεγεθών των γεγονότων.

Οπότε για να υπάρξει μια πιο ευκρινής εικόνα για την συσχέτιση του χρόνου καταγραφής των σεισμικών κυμάτων με την επικεντρική απόσταση θα πρέπει να εξαλειφθούν οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από την χρήση της συνολικής διάρκειας η οποία εξαρτάται από την ενέργεια (το μέγεθος) του κάθε γεγονότος και την απόσβεση αυτής μέχρι τα επίπεδα του θορύβου, όπου γίνεται η καταγραφή της τελευταίας ευδιάκριτης άφιξης στο σεισμόγραμμα, έτσι δημιουργήθηκε το σχήμα όπου στον άξονα του x χαρτογραφείται η διαφορά του χρόνου άφιξης των επιμήκων κυμάτων από τον χρόνο άφιξης των εγκαρσίων κυμάτων και στον άξονα του y η επικεντρική απόσταση (**σχήμα 13**)



Σχήμα 13.Σχηματική απεικόνιση της διαφοράς των χρόνων καταγραφής των επιμήκων κυμάτων από των εγκαρσίων κυμάτων(άξονας y) , με την επικεντρική απόσταση (άξονας x) όλων των γεγονότων A κατηγορίας . Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφονται οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με την ανομοιότητα στις τιμές των μεγεθών των γεγονότων και έτσι η γραφική αναπαράσταση της συσχέτισης μεταξύ της επικεντρικής απόστασης και του χρόνου καταγραφής των πρώτων αφίξεων των P και S κυμάτων γίνεται πιο ευκρινής.Οι μικρές αποκλίσεις των σημείων από την ευθεία οφείλονται στο ανομοιογενές μέσο διάδοσης των κυμάτων.

Παρατηρούμε ότι στο σχήμα αυτό η κατανομή των γεγονότων είναι πολύ πιο ακριβής, τα σημεία βρίσκονται πολύ πιο κοντά ή ακόμα και πάνω στην ευθεία που δημιουργείται σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα που λάμβανε υπόψη την διάρκεια των γεγονότων.

Αυτό ισχύει ακόμα και για το γεγονός S1222a όπου στο προηγούμενο σχήμα χρειάστηκε να εξαιρεθεί λόγω της αλλοίωσης που προκαλούσε στα αποτελέσματα το τόσο μεγάλο μέγεθος του, σε σχέση πάντα με τα μεγέθη των υπολοίπων σεισμικών γεγονότων.

Ωστόσο ούτε και σε αυτό το σχήμα με την σαφώς πιο ακριβή κατανομή των σημείων δεν επιτεύχθηκε η πλήρης εξάλειψη των αβεβαιοτήτων καθώς δεν βρίσκονταν όλα τα σημεία πάνω στην ευθεία.

Αυτή η αβεβαιότητα οφείλεται στο γεγονός ότι στη φύση δεν υπάρχει ένα τέλειο ομοιογενές μέσο και στο ότι οι ετερογένειες που βρίσκονται μέσα σε αυτό δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο χώρο με αποτέλεσμα και η διάχυση των σεισμικών ακτίνων να μην είναι ομοιόμορφη στον χώρο.

Η επικεντρική απόσταση, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στα τρια προαναφερόμενα σχήματα, είναι η απόσταση μεταξύ της εστίας ενός σεισμικού γεγονότος και του σεισμολογικού σταθμού στον οποίο καταγράφεται. Ο υπολογισμός της στον πλανήτη Άρη γίνεται ακριβώς όπως και στον πλανήτη Γη, με την χρήση δηλαδή των καμπυλών χρόνων διαδρομής των εγκάρσιων και επιμήκων κυμάτων. Η γραφική απεικόνιση αυτών των καμπυλών μας δείχνει την σχέση που υπάρχει μεταξύ των αναμενόμενων χρόνων καταγραφής των σεισμικών κυμάτων (άξονας y) στα οποία αυτές αναφέρονται σε ένα σεισμολογικό σταθμό σε συνάρτηση με την επικεντρική απόσταση του σεισμικού γεγονότος (άξονας x).

Έτσι με την εύρεση της τεταγμένης του σημείου τομής της καμπύλης με την προέκταση της νοητής γραμμής από το σημείο στον άξονα του y, ο οποίος και αντιπροσωπεύει τον χρόνο

άφιξης του ανάλογου κύματος στο οποίο αναφέρεται η καμπύλη,γίνεται δυνατή η εύρεση της επικεντρικής απόστασης μέσω των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων. Ακόμα από το ίδιο σχεδιάγραμμα μπορεί να βρεθεί ο χρόνος γένεσης του σεισμικού γεγονότος αν αφαιρέσουμε την τετμημένη του σημείου τομής από τον χρόνο άφιξης του κύματος. Οι καμπύλες των χρόνων διαδρομής των εγκάρσιων και επιμήκων κυμάτων για τον πλανήτη Άρη υπολογίστηκαν βάσει 2.500 πιθανών μοντέλων μιας διάστασης για την εσωτερική δομή του ανωτέρω αναφερόμενου πλανήτη. Τα μοντέλα αυτά βασίστηκαν αποκλειστικά στην γνώση και κυρίως στις θεωρήσεις που προϋπήρχαν (Smrekar et. al., 2019) καθότι δημιουργήθηκαν πριν από την προσγείωση του InSight στην επιφάνεια του Άρη και άρα πριν λάβει χώρα οποιαδήποτε συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.

Ωστόσο ο τόσο μεγάλος αριθμός των πιθανών μοντέλων κρίθηκε ως πιθανή αιτία δημιουργίας λειτουργικών προβλημάτων για αυτό με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου επιλέχθηκαν μόνο 250 από τα 2.500 μοντέλα. Η επιλογή των μοντέλων έγινε με τέτοιο τρόπο που παρόλο τον υποδεκαπλασιασμό του αριθμού τους, διατηρήθηκε το ίδιο μεγάλο εύρος στις προβλέψεις που αυτά αντιπροσώπευαν (Clinton et al.,2020).

Σε αυτά τα 250 μοντέλα βασίστηκε η δημιουργία όλων των σεισμικών καταλόγων που υπάρχουν μέχρι στιγμής όπως και του συγκεκριμένου καταλόγου που χρησιμοποιήθηκε για την άντληση δεδομένων στην παρούσα εργασία.

9. Συμπεράσματα

Από την αποστολή InSight αποδείχθηκε πως ο Άρης είναι σεισμικά ενεργός. Οι σεισμοί που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν χωρίζονται σε 2 μεγάλες οικογένειες, σε αυτήν των χαμηλών και σε αυτήν των υψηλών συχνοτήτων. Μέσω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν οι σεισμοί των 2 οικογενειών καθώς και από τον συνδυασμό και άλλων γεωχημικών,γεωφυσικών και γεωδυναμικών δεδομένων βρέθηκε πως ο Άρης αποτελείται από 3 στρώματα, τον φλοιό, τον μανδύα και τον πυρήνα. Για τον φλοιό υπάρχουν 2 επικρατέστερα μοντέλα όπου το ένα αποτελείται από 2 ασυνέχειες και για το οποίο το πάχος φλοιού έχει υπολογιστεί σε 24 με 38 km και το άλλο έχει 3 ασυνέχειες με το πάχος του φλοιού να υπολογίζεται από 39 με 72 km. Ακόμη βρέθηκε πως το όριο φλοιού - μανδύα βρίσκεται πιθανότερα σε βάθος 30 με 50 km και πως ο φλοιός είναι κατά 13 φορές περισσότερο εμπλουτισμένος σε στοιχεία που παράγουν θερμότητα κατά την διάσπασή τους (HPEs) από τον μανδύα. Τέλος η ακτίνα του υγρού πυρήνα υπολογίστηκε στα 1.820±40 km και η σύστασή του καθορίστηκε ότι αποτελείται κυρίως από σίδηρο και θείο. Όσον αφορά το πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας μελετήθηκαν 12

γεγονότα Α ποιότητας και αποδείχθηκε η συσχέτιση του χρόνου καταγραφής των σεισμικών ακτίνων με την επικεντρική απόσταση.

Βιβλιογραφία

Anderson, D.L., Duennebier, F.K., Latham, G.V., Toksöz, M.F., Kovach, R.L., Knight, T.C., Lazarewicz, A.R., Miller, W.F., Nakamura, Y. and Sutton, G., 1976. The Viking seismic experiment. Science, 194(4271), pp.1318-1321

Savas Ceylan, John F. Clinton, Domenico Giardini, Maren Böse, Constantinos Charalambous, Martin van Driel, Anna Horleston, Taichi Kawamura, Amir Khan, Guenolé Orhand-Mainsant, John-Robert Scholz, Simon C. Stähler, Fabian Euchner, William B. Banerdt, Philippe Lognonné, Don Banfield, Eric Beucler, Raphaël F. Garcia, Sharon Kedar, Mark P. Panning, William T. Pike, Suzanne E. Smrekar, Aymeric Spiga, Nikolaj L. Dahmen, Kenneth Hurst, Alexander E. Stott, Ralph D. Lorenz, Martin Schimmel, Eléonore Stutzmann, Jan ten Pierick, Vincent Conejero, Constanza Pardo, Clément Perrin,2021,Companion guide to the marsquake catalog from InSight, Sols 0–478: Data content and non-seismic events,Physics of the Earth and Planetary Interiors,310,https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920120302752

John F. Clinton, Savas Ceylan, Martin van Driel, Domenico Giardini, Simon C. Stähler, Maren Böse, Constantinos Charalambous, Nikolaj L. Dahmen, Anna Horleston, Taichi Kawamura, Amir Khan, Guenolé Orhand-Mainsant, John-Robert Scholz, Fabian Euchner, William B. Banerdt, Philippe Lognonné, Don Banfield, Eric Beucler, Raphaël F. Garcia, Sharon Kedar, Mark P. Panning, Clement Perrin, William T. Pike, Suzanne E. Smrekar, Aymeric Spiga, Alexander E. Stott,2021,The Marsquake catalogue from InSight, sols 0–478,Physics of the Earth and Planetary Interiors,310

Compaire, N., Margerin, L., Garcia, R., Pinot, B., Calvet, M., Orhand-Mainsant, G., . . . Banerdt, W. B. (2021, March), Autocorrelation of the ground vibrations recorded by the SEIS-InSight seismometer on mars. Journal of Geophysical Research: Planets, https://doi.org/10.1029/2020je006498

Dahmen, N. L., Clinton, J. F., Ceylan, S., van Driel, M., Giardini, D., Khan, A., et al. (2021). Super high frequency events: A new class of events recorded by the InSight seismometers on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006599. https://doi.org/10.1029/2020JE006599

Nikolaj L. Dahmen, Géraldine Zenhäusern, John F. Clinton, Domenico Giardini, Simon C. Stähler, Savas Ceylan, Constantinos Charalambous, Martin van Driel, Kenneth J. Hurst, Sharon Kedar, Philippe Lognonné, Naomi Murdoch, Robert Myhill, Mark P. Panning, William T. Pike, Martin Schimmel, Cédric Schmelzbach, John‐Robert Scholz, Alexander E. Stott, Eleonore Stutzmann, William B. Banerdt; Resonances and Lander Modes Observed by InSight on Mars (1–9 Hz). *Bulletin of the Seismological Society of America* 2021;; 111 (6): 2924–2950. doi: https://doi.org/10.1785/0120210056

van Driel, M., Ceylan, S., Clinton, J. F., Giardini, D., Horleston, A., Margerin, L., et al. (2021). High-frequency seismic events on Mars observed by InSight. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006670. https://doi.org/10.1029/2020JE006670

Golombek, M., Warner, N.H., Grant, J.A. *et al.* Geology of the InSight landing site on Mars. *Nat Commun* 11, 1014 (2020). https://doi.org/10.1038/s41467-020-14679-1

Scholz, J.-R., Widmer-Schnidrig, R., Davis, P., Lognonné, P., Pinot, B., Garcia, R. F., et al. (2020). Detection, analysis, and removal of glitches from InSight's seismic data from Mars. *Earth and Space Science*, 7, e2020EA001317. https://doi.org/10.1029/2020EA001317

Foivos Karakostas, Nicholas Schmerr, Ross Maguire, Quancheng Huang, Doyeon Kim, Vedran Lekic, Ludovic Margerin, Ceri Nunn, Sabrina Menina, Taichi Kawamura, Philippe Lognonné, Domenico Giardini, Bruce Banerdt; Scattering Attenuation of the Martian Interior through Coda‐Wave Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2021;; 111 (6): 3035–3054. doi: https://doi.org/10.1785/0120210253

Foivos Karakostas et al. (2023). UMD-InSight/InSightSEISgui: InSightSEISgui 1.2 (1.2). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7525587

Amir Khan and Savas Ceylan and Martin van Driel and Domenico Giardini and Philippe Lognonné and Henri Samuel and Nicholas C. Schmerr and Simon C. Stähler and Andrea C. Duran and Quancheng Huang and Doyeon Kim and Adrien Broquet and Constantinos Charalambous and John F. Clinton and Paul M. Davis and Mélanie Drilleau and Foivos Karakostas and Vedran Lekic and Scott M. McLennan and Ross R. Maguire and Chloé Michaut and Mark P. Panning and William T. Pike and Baptiste Pinot and Matthieu Plasman

and John-Robert Scholz and Rudolf Widmer-Schnidrig and Tilman Spohn and Suzanne E. Smrekar and William B. Banerdt,2021,Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data,Science,373,6553,434-438,https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abf2966

Brigitte Knapmeyer-Endrun and Mark P. Panning and Felix Bissig and Rakshit Joshi and Amir Khan and Doyeon Kim and Vedran Lekić and Benoit Tauzin and Saikiran Tharimena and Matthieu Plasman and Nicolas Compaire and Raphael F. Garcia and Ludovic Margerin and Martin Schimmel and Éléonore Stutzmann and Nicholas Schmerr and Ebru Bozdağ and Ana-Catalina Plesa and Mark A. Wieczorek and Adrien Broquet and Daniele Antonangeli and Scott M. McLennan and Henri Samuel and Chloé Michaut and Lu Pan and Suzanne E. Smrekar and Catherine L. Johnson and Nienke Brinkman and Anna Mittelholz and Attilio Rivoldini and Paul M. Davis and Philippe Lognonné and Baptiste Pinot and John-Robert Scholz and Simon Stähler and Martin Knapmeyer and Martin van Driel and Domenico Giardini and W. Bruce Banerdt,2021,Thickness and structure of the martian crust from InSight seismic data,Science,373,6553,43

Alex S. Konopliv, Charles F. Yoder, E. Myles Standish, Dah-Ning Yuan, William L. Sjogren, A global solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos masses, and Mars ephemeris,2006,Icarus,182, 1,23-50, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103506000297

Lognonné, P., Banerdt, W.B., Giardini, D. *et al.* SEIS: Insight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars. *Space Sci Rev* 215, 12 (2019). https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6

Simon C. Stähler and Amir Khan and W. Bruce Banerdt and Philippe Lognonné and Domenico Giardini and Savas Ceylan and Mélanie Drilleau and A. Cecilia Duran and Raphaël F. Garcia and Quancheng Huang and Doyeon Kim and Vedran Lekic and Henri Samuel and Martin Schimmel and Nicholas Schmerr and David Sollberger and Éléonore Stutzmann and Zongbo Xu and Daniele Antonangeli and Constantinos Charalambous and Paul M. Davis and Jessica C. E. Irving and Taichi Kawamura and Martin Knapmeyer and Ross Maguire and Angela G. Marusiak and Mark P. Panning and Clément Perrin and Ana-Catalina Plesa and Attilio Rivoldini and Cédric Schmelzbach and Géraldine Zenhäusern and Éric Beucler and John Clinton and Nikolaj Dahmen and Martin van Driel and Tamara Gudkova and Anna Horleston and W. Thomas Pike and Matthieu Plasman and Suzanne E. Smrekar , 2021,Seismic detection of the martian core,Science,373,6553,443-448, https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abi7730

Smrekar, S.E., Lognonné, P., Spohn, T. *et al.* Pre-mission InSights on the Interior of Mars. *Space Sci Rev* 215, 3 (2019). https://doi.org/10.1007/s11214-018-0563-9

Διαδικτυακές Πηγές

Insight fact sheet -https://mars.nasa.gov/resources/22071/insight-fact-sheet/?site=insight

Ιστοσελίδα SEIS -https://www.seis-insight.eu/en/

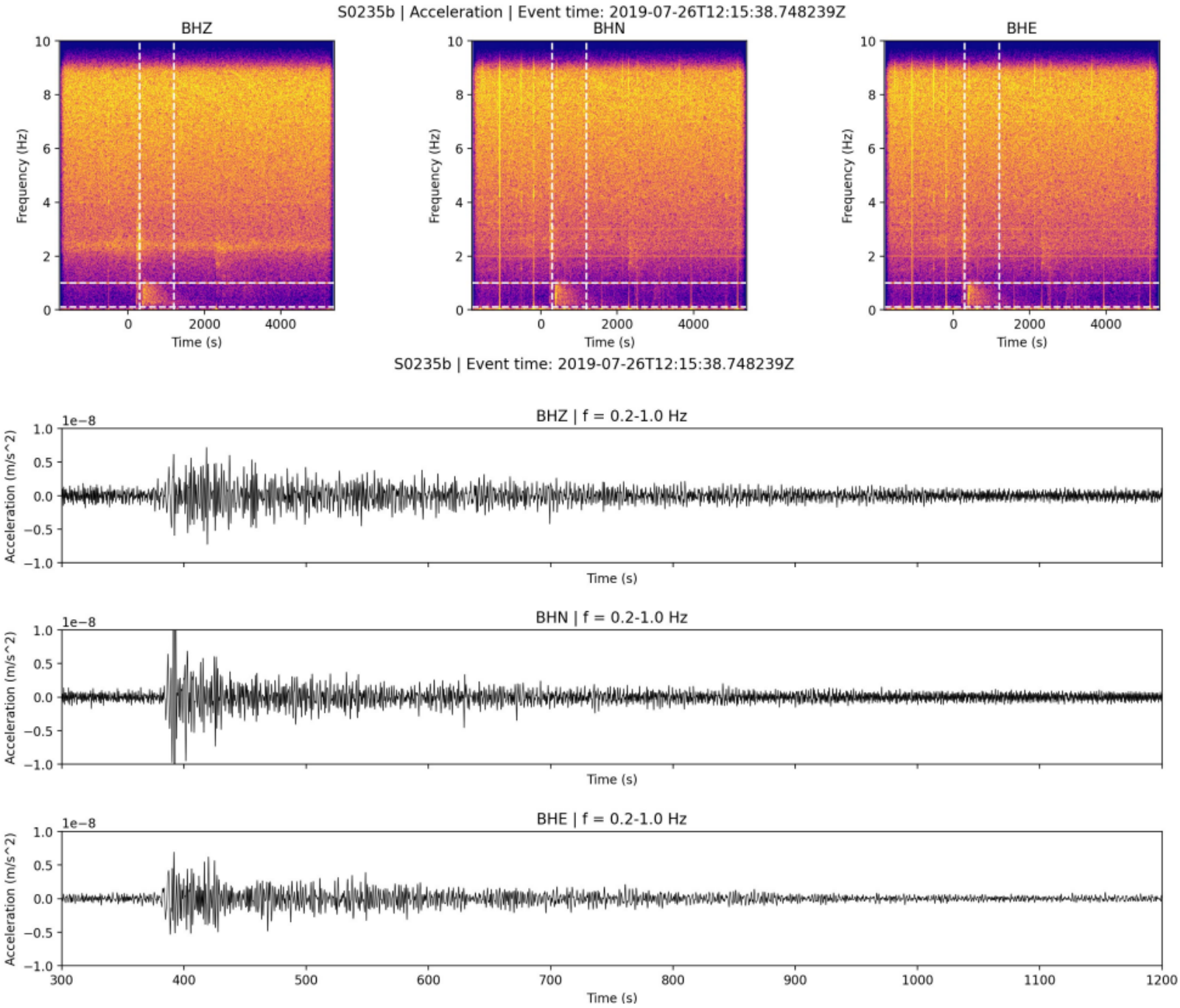
Σεισμικός Κατάλογος

InSight Mars SEIS Data Service. (2019). SEIS raw data, Insight Mission. IPGP, JPL, CNES, ETHZ, ICL, MPS, ISAE-Supaero, LPG, MFSC.

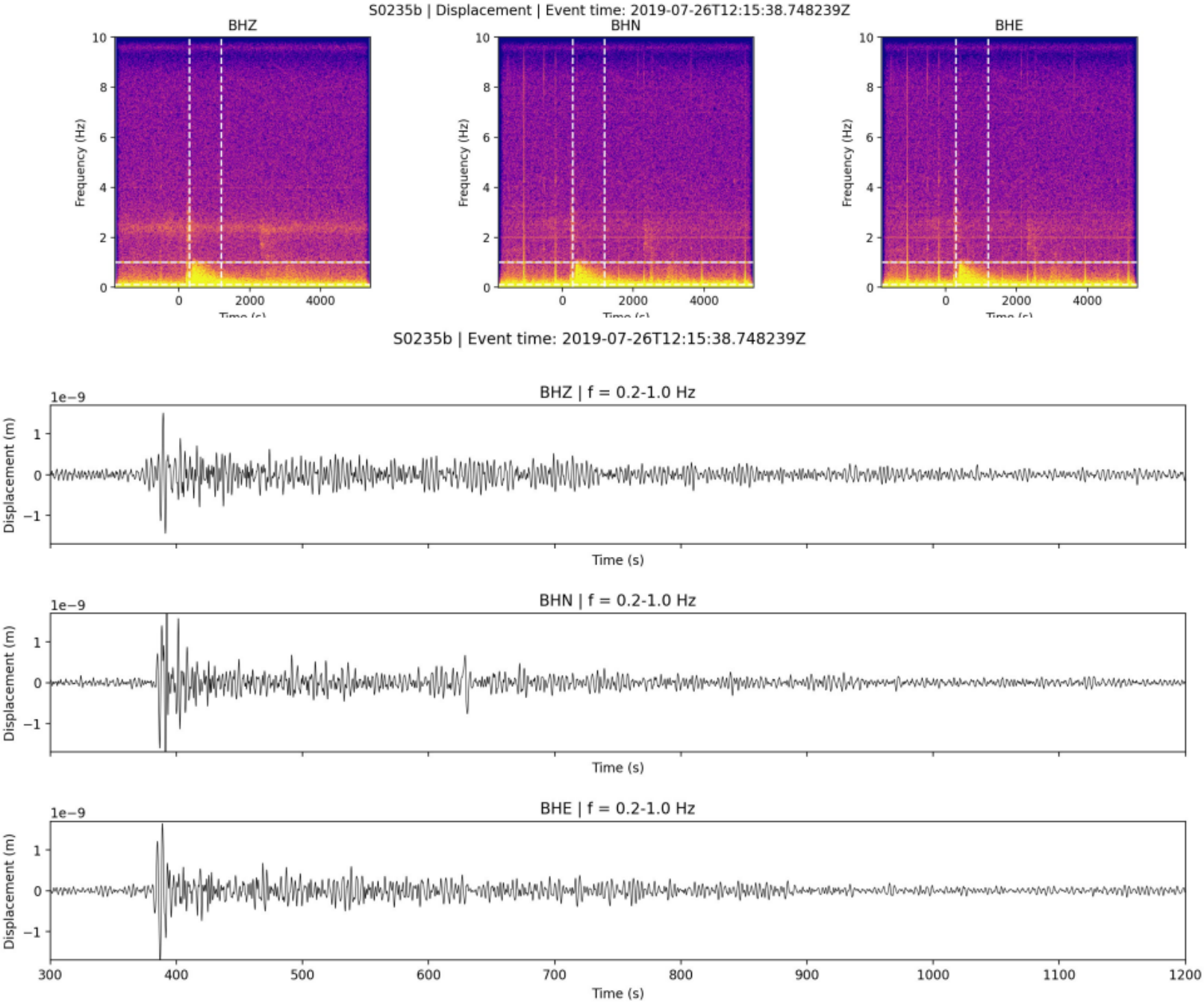
https://doi.org/10.18715/SEIS.INSIGHT.XB_2016

"We acknowledge NASA, CNES, their partner agencies and Institutions (UKSA, SSO, DLR, JPL, IPGP-CNRS, ETHZ, IC, MPS-MPG) and the flight operations team at JPL, SISMOC, MSDS, IRIS-DMC and PDS for providing SEED SEIS data."

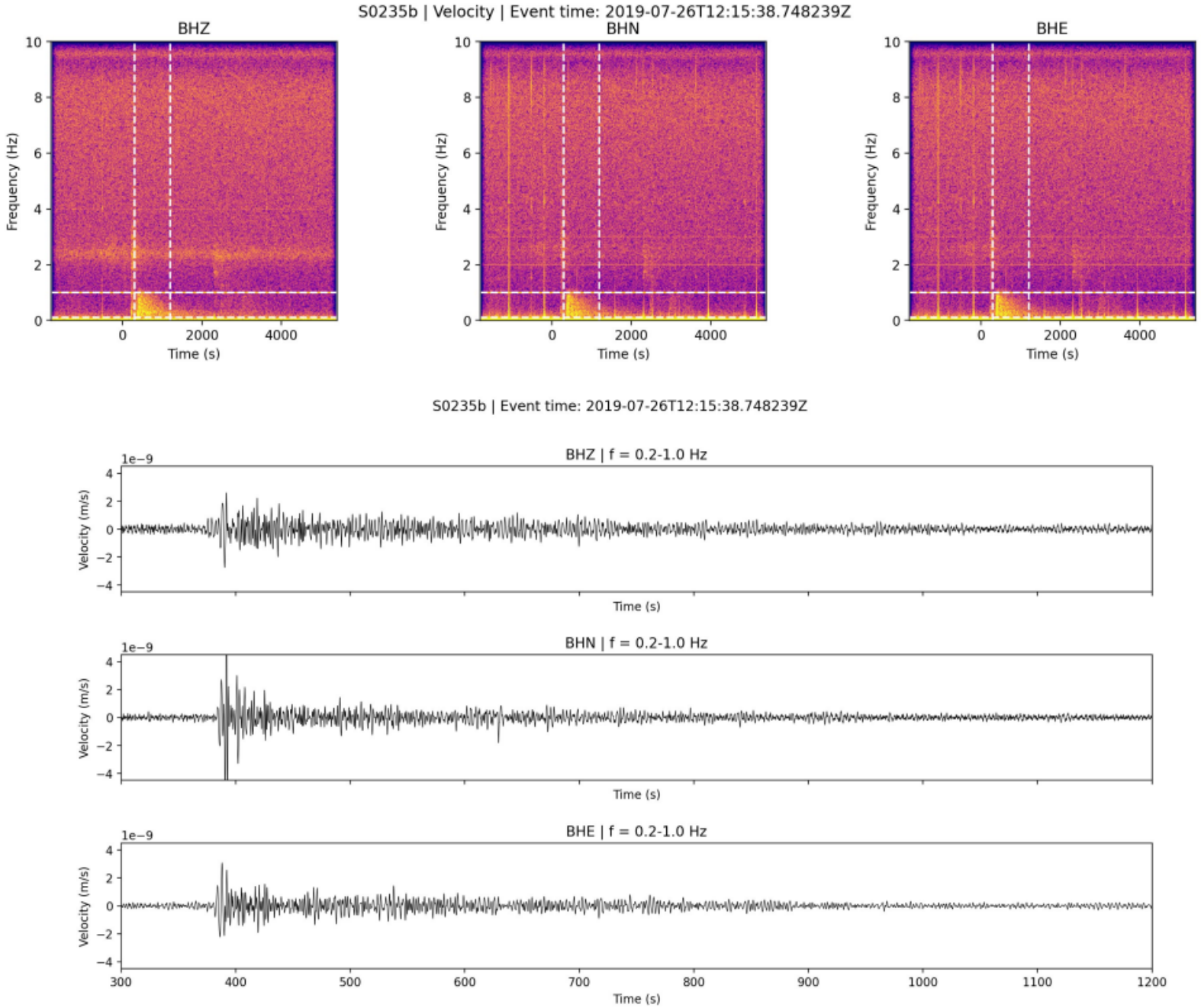
Παράρτημα



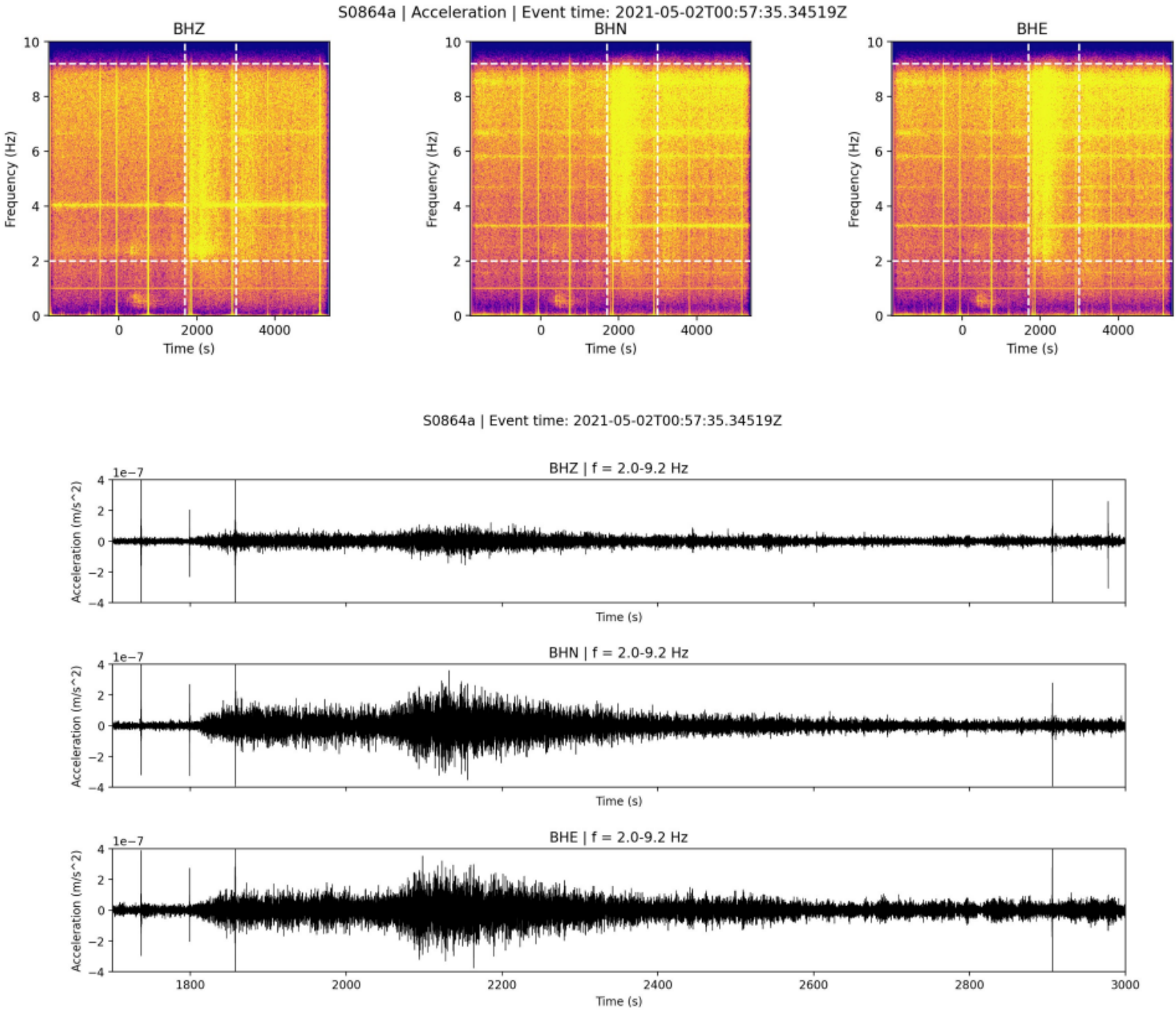
Σχήμα 14. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S0235b.



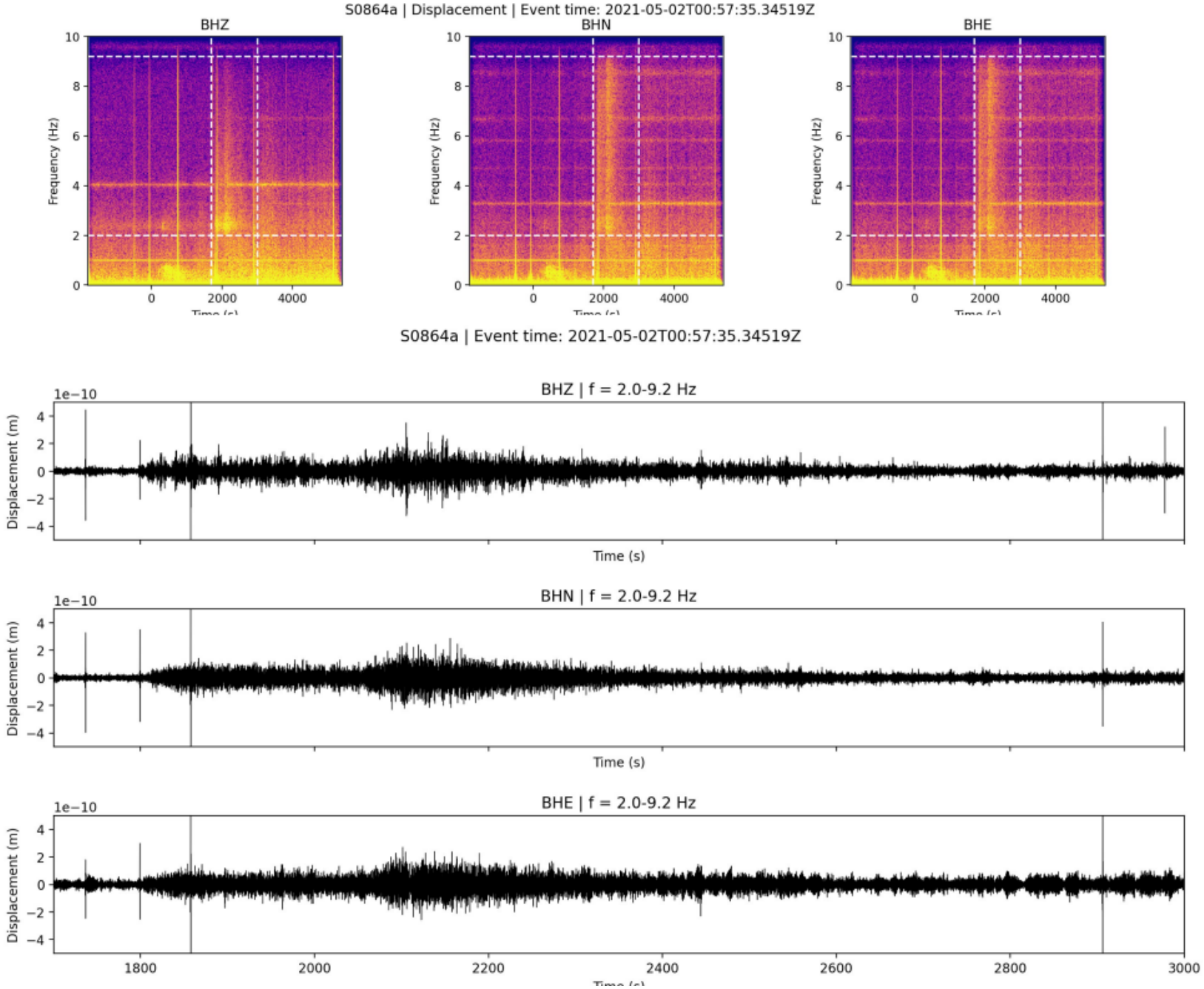
Σχήμα 15. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S0235b.



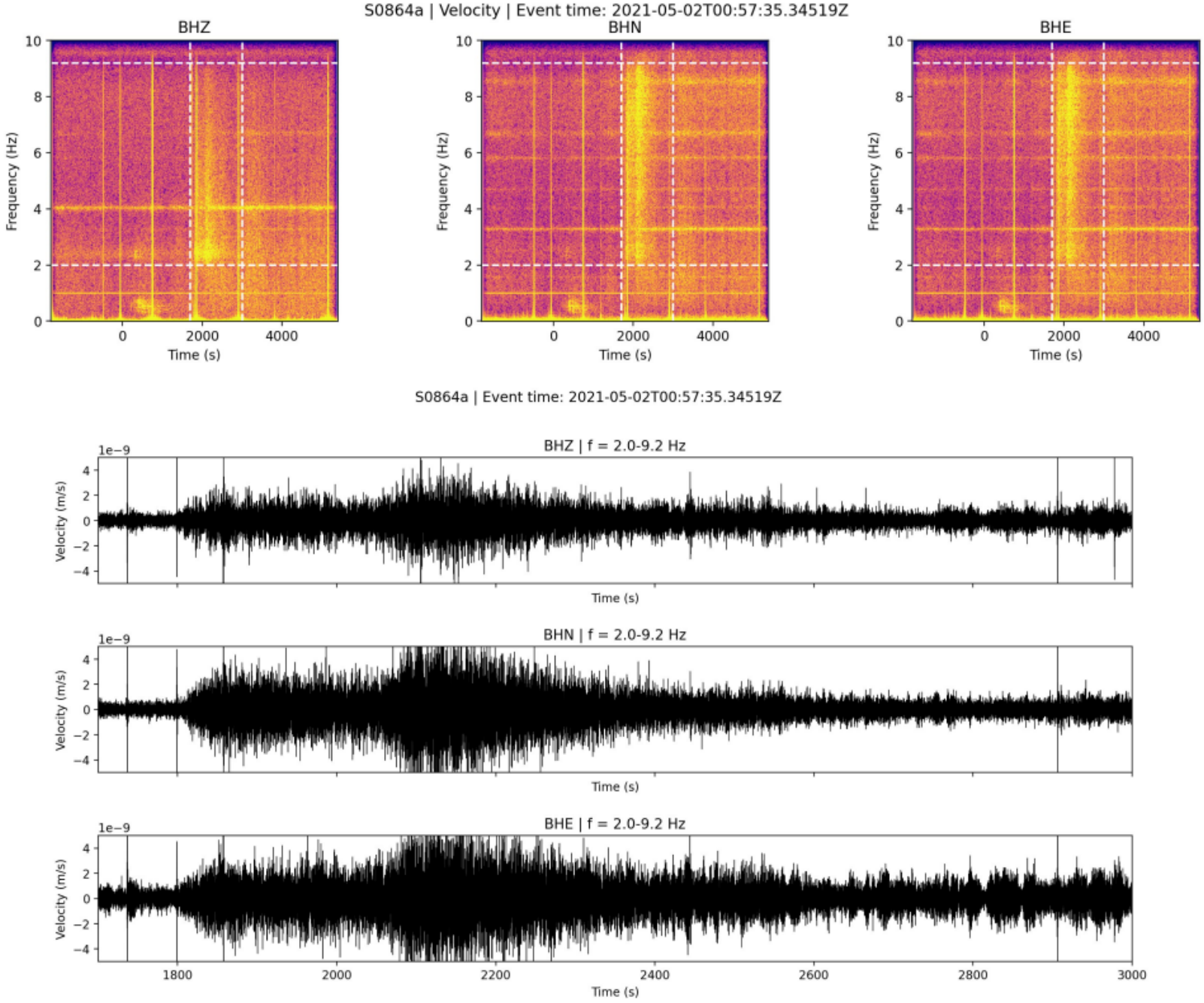
Σχήμα 16. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S0235b.



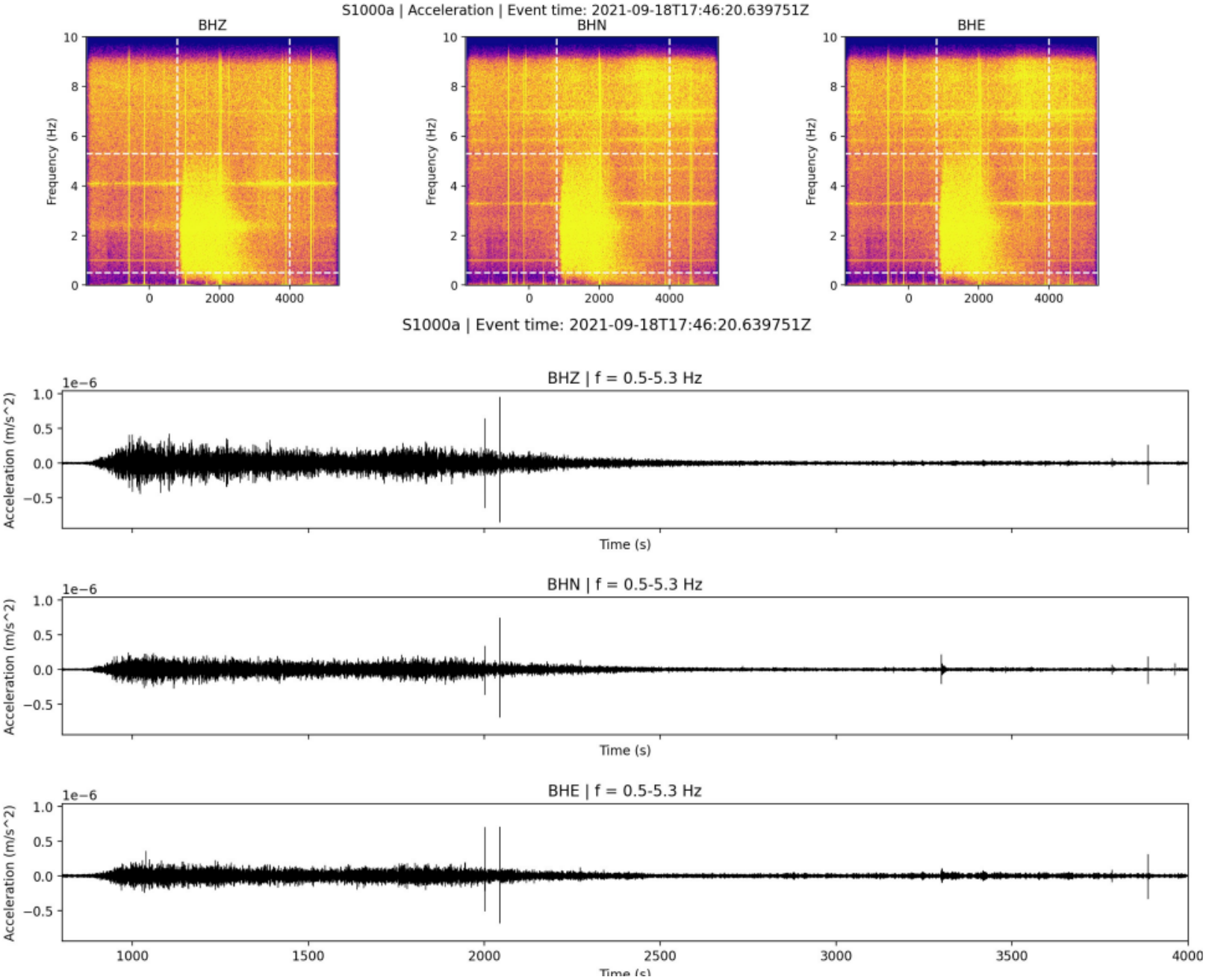
Σχήμα 17. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S0864a.



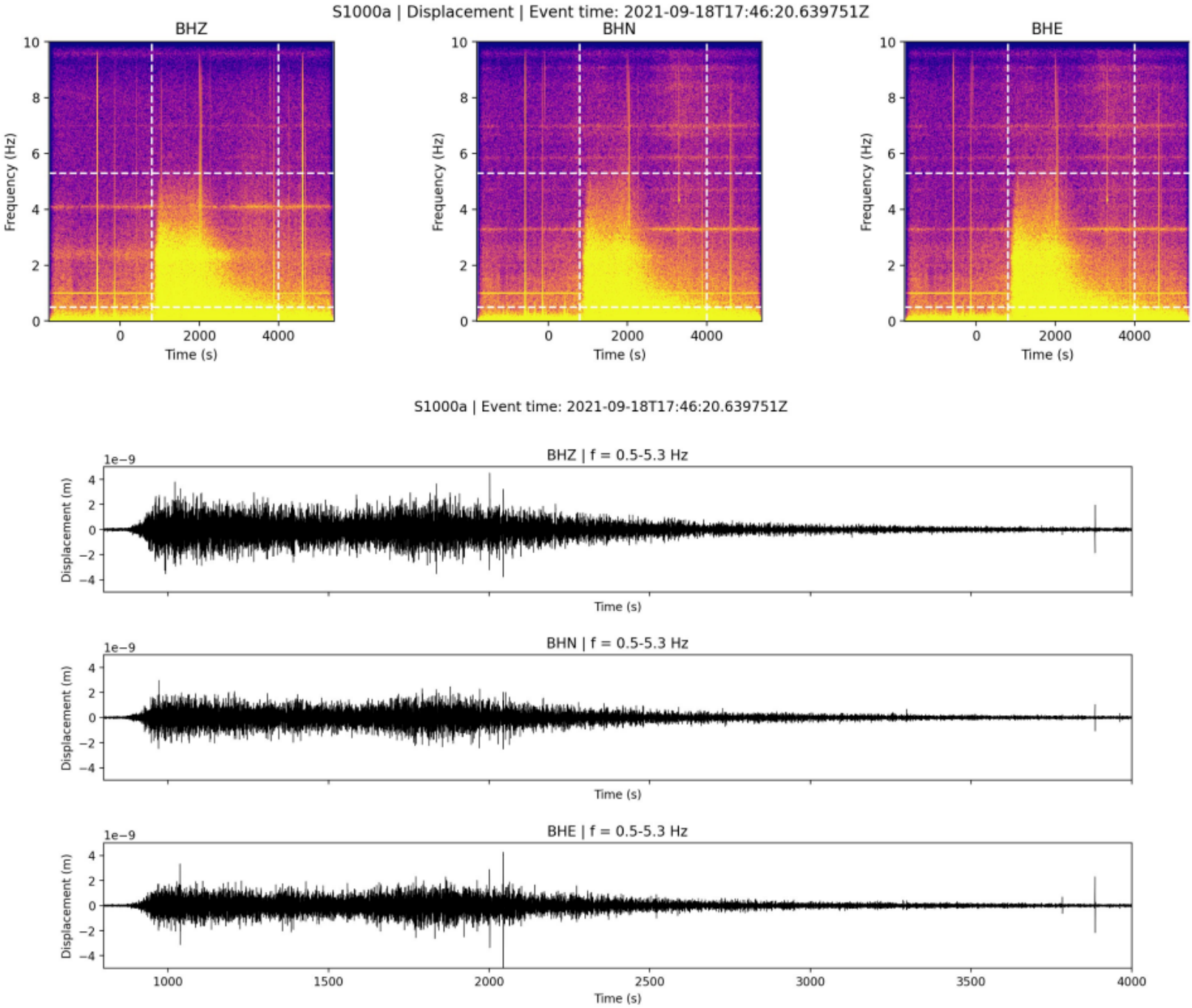
Σχήμα 18. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S0864a.



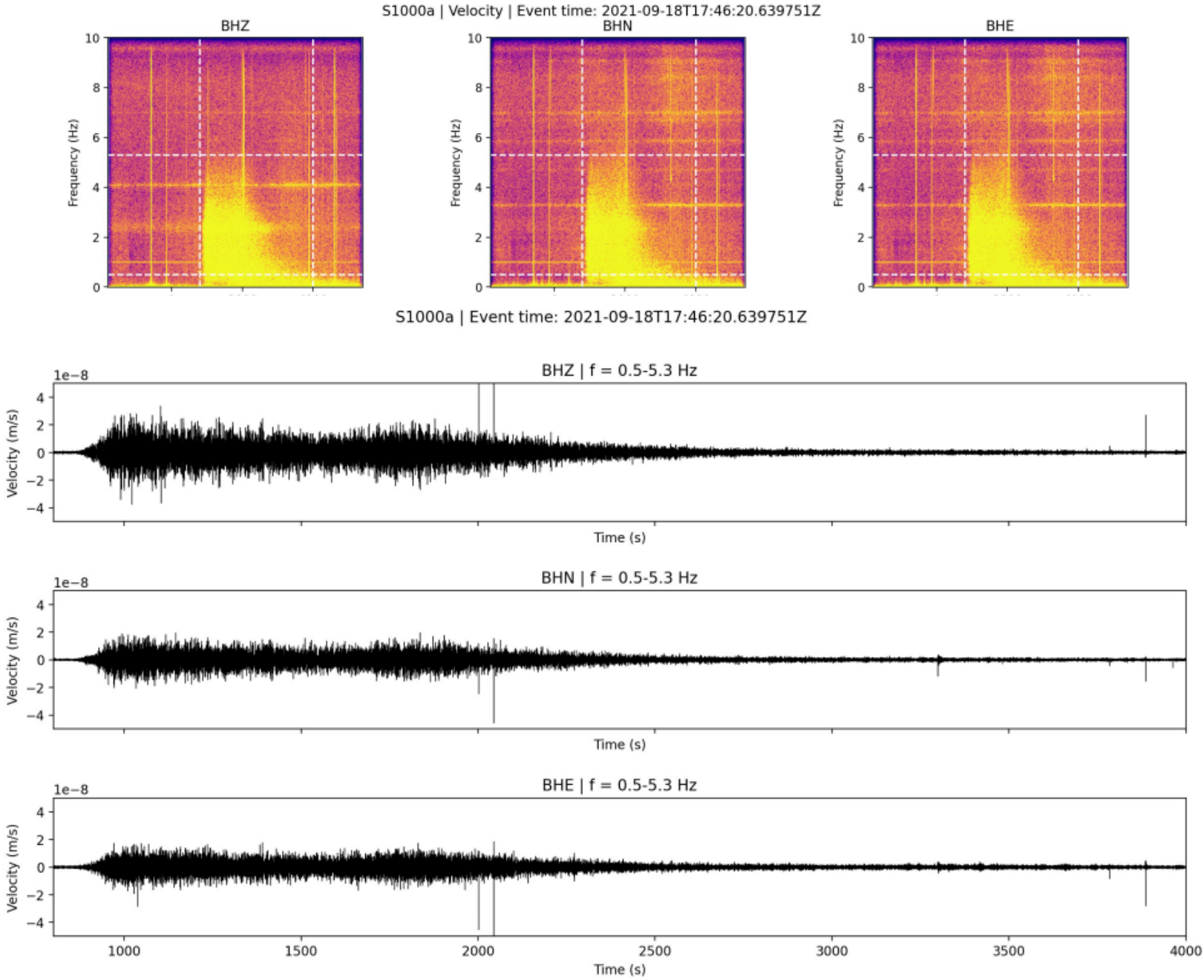
Σχήμα 19. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S0864a.



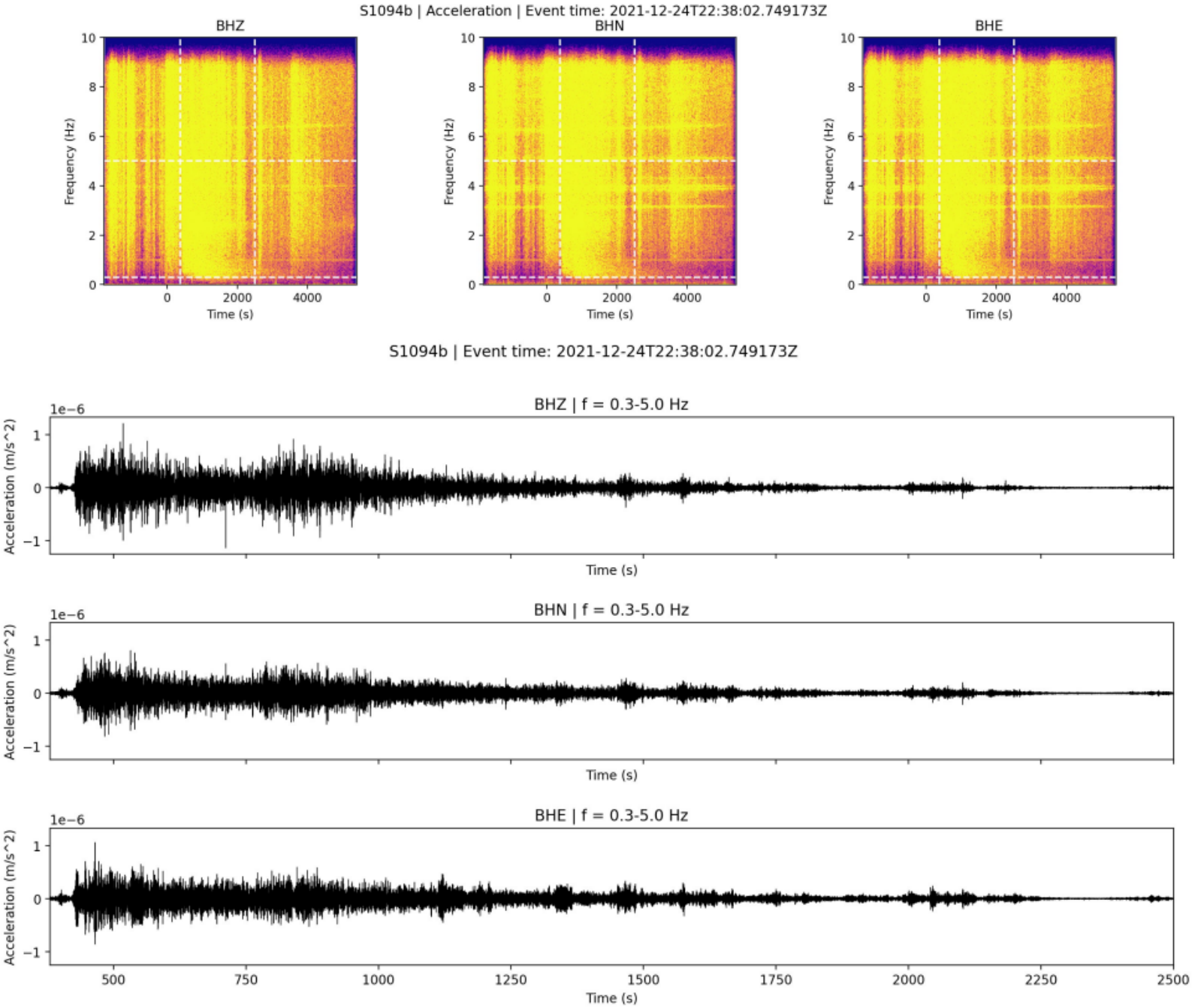
Σχήμα 20. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1000a..



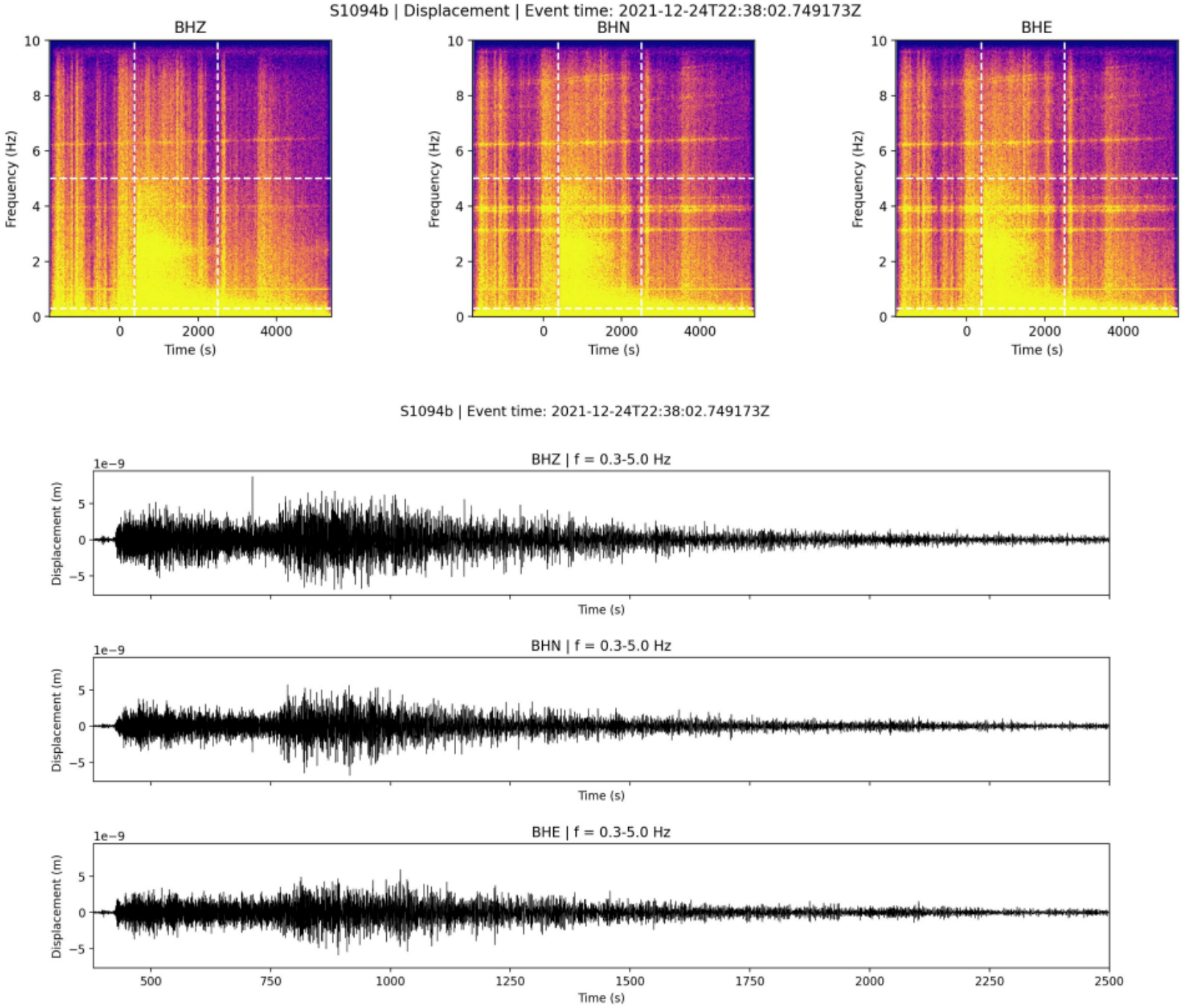
Σχήμα 21. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1000a..



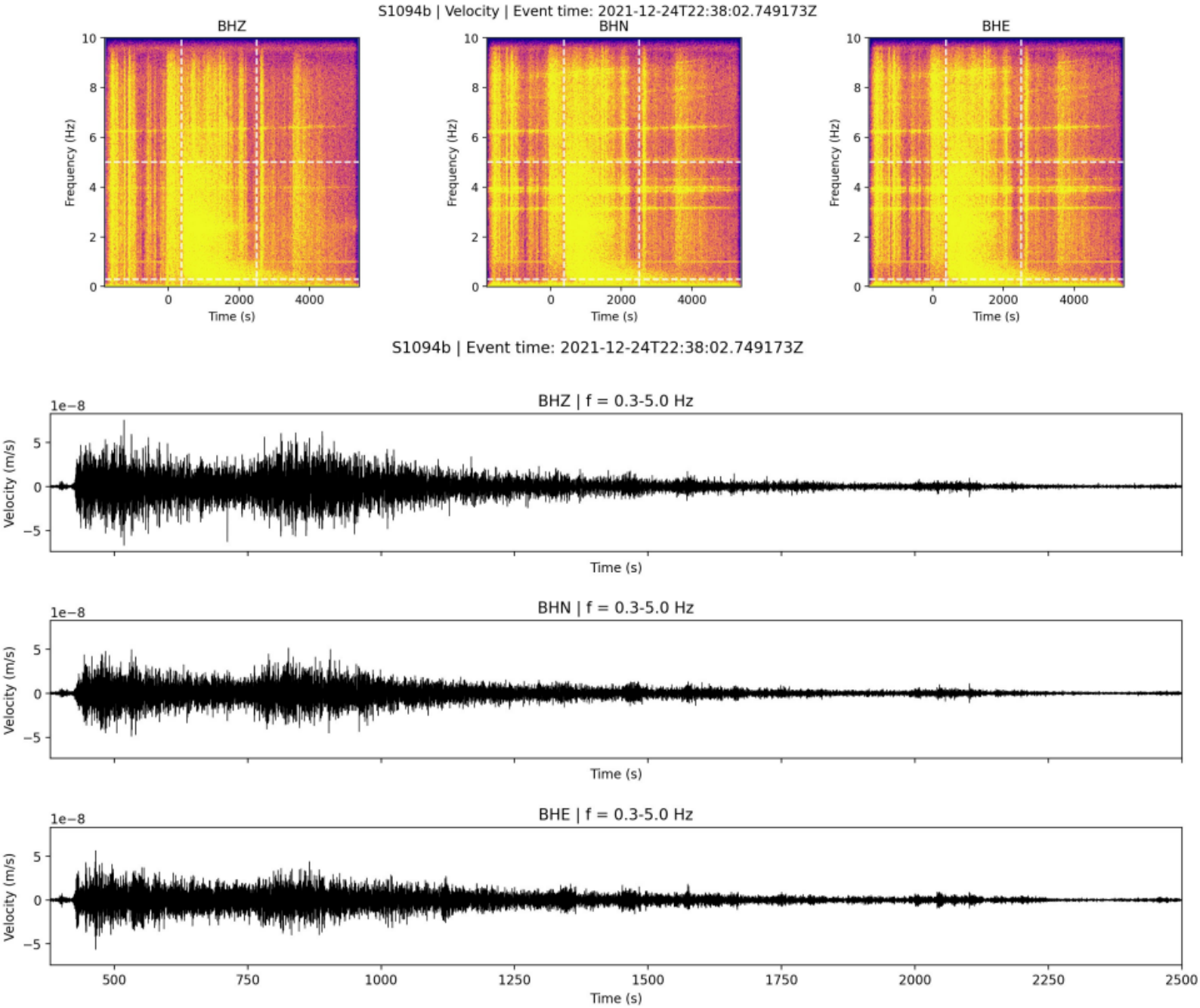
Σχήμα 22. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1000a.



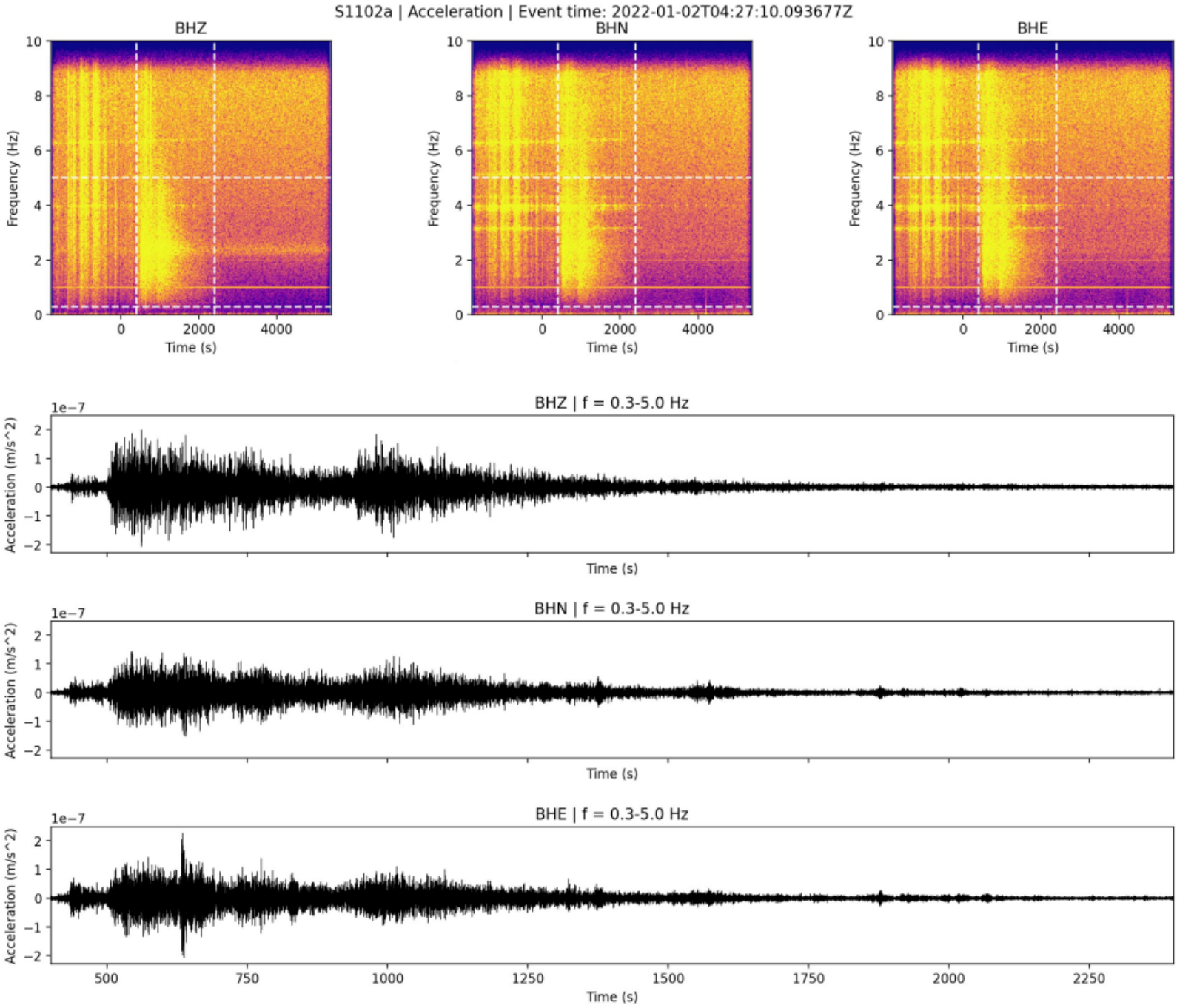
Σχήμα 23. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1094b.



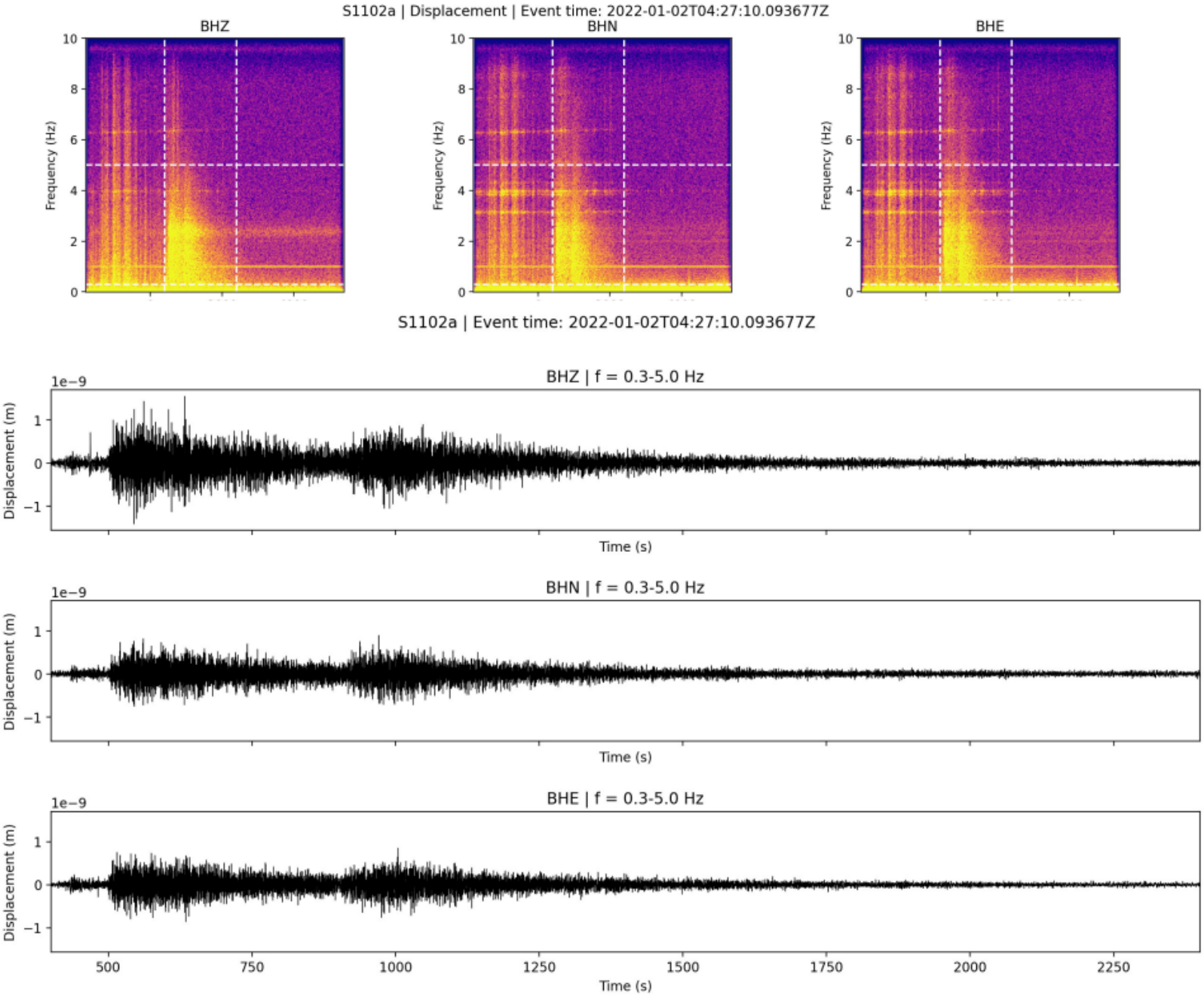
Σχήμα 24. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1094b.



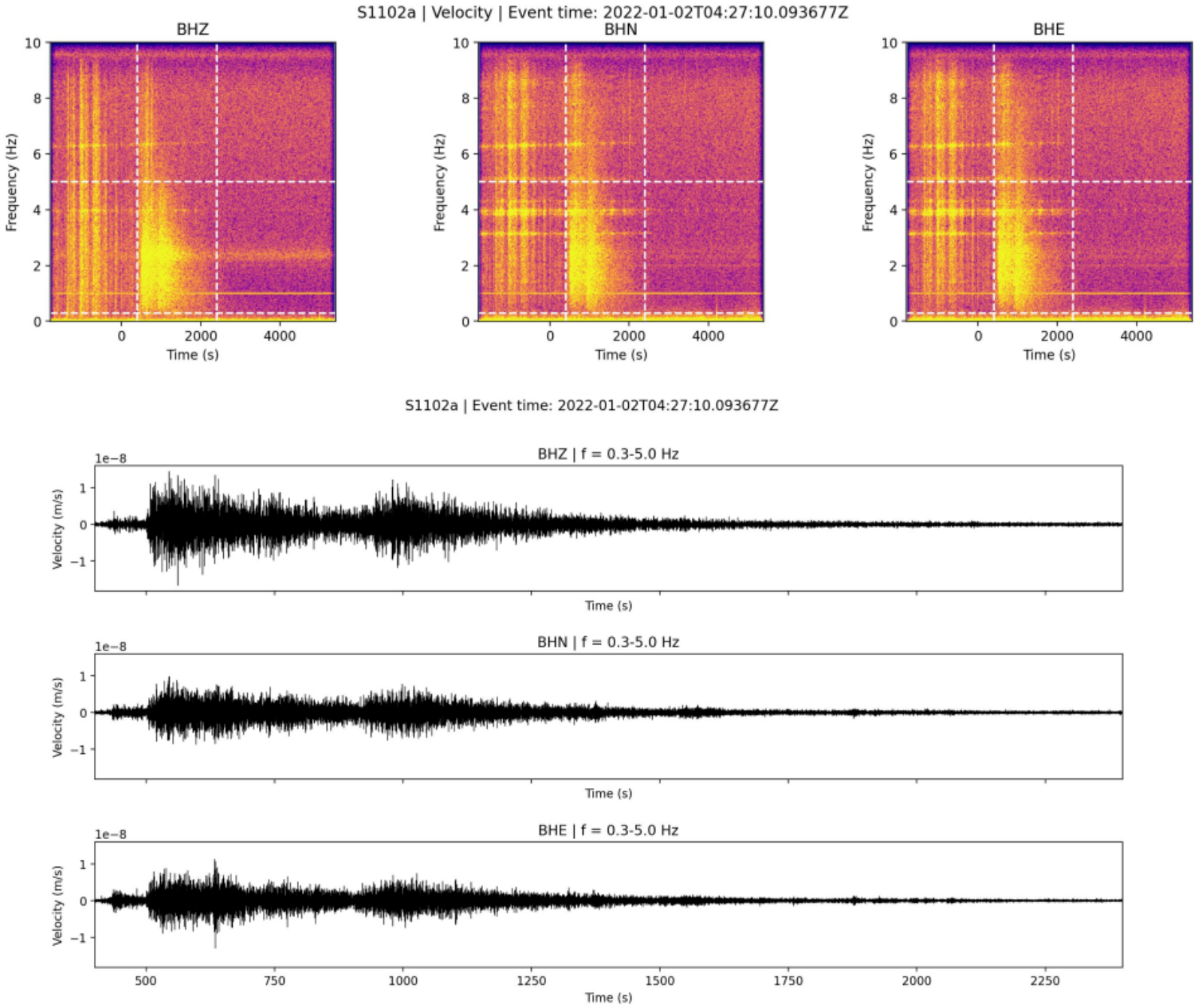
Σχήμα 25. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1094b.



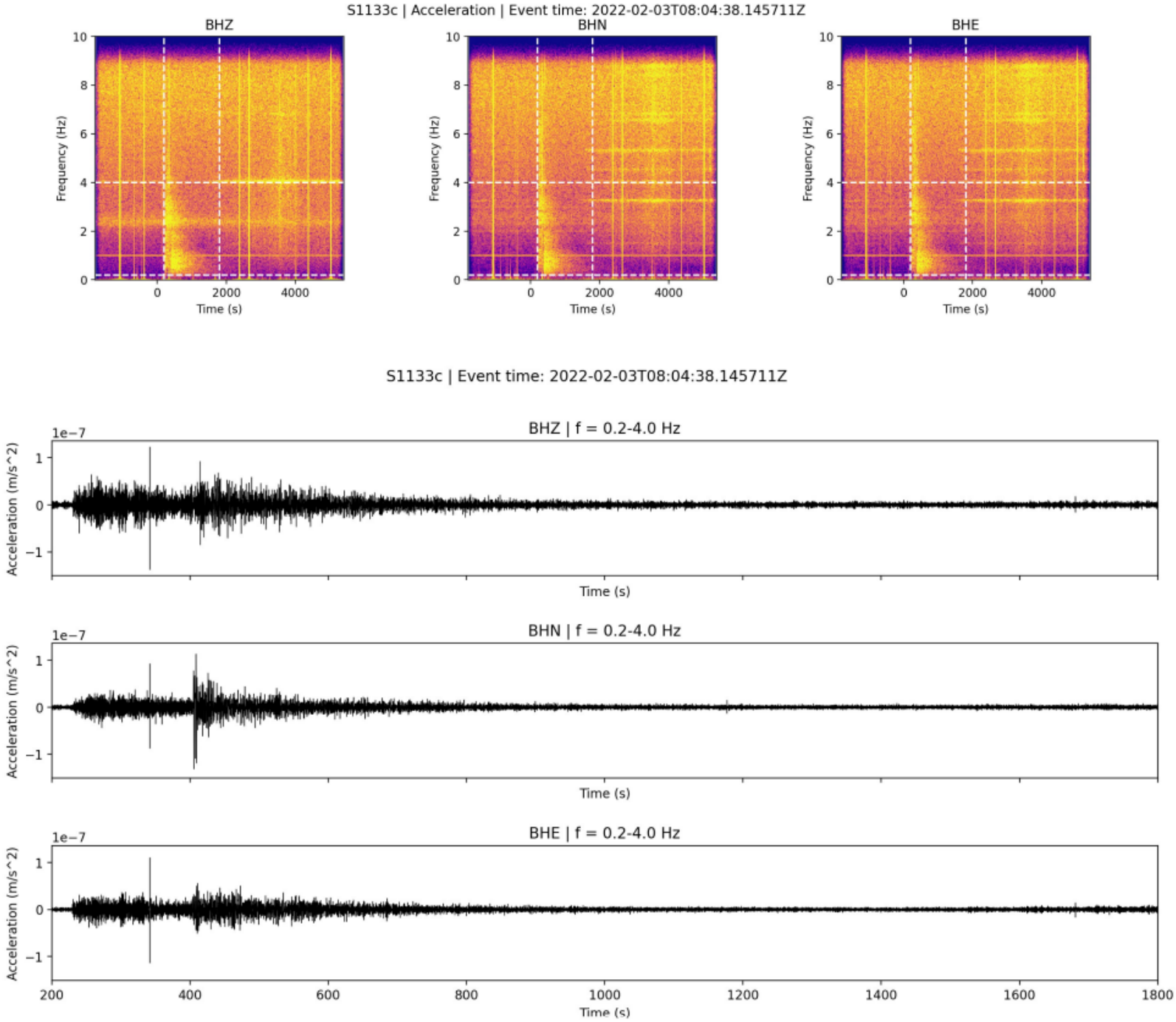
Σχήμα 26. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1102a.



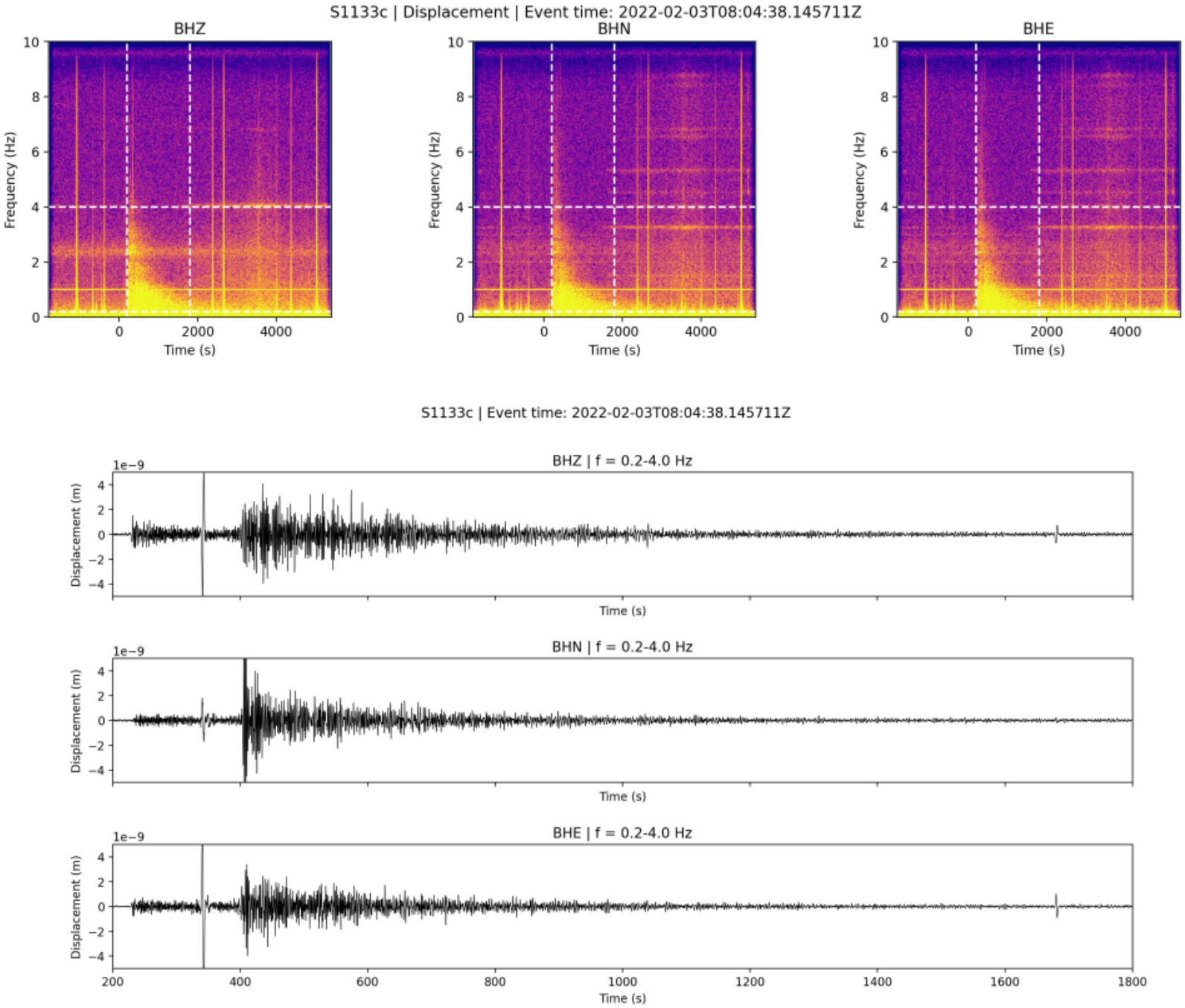
Σχήμα 27. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1102a.



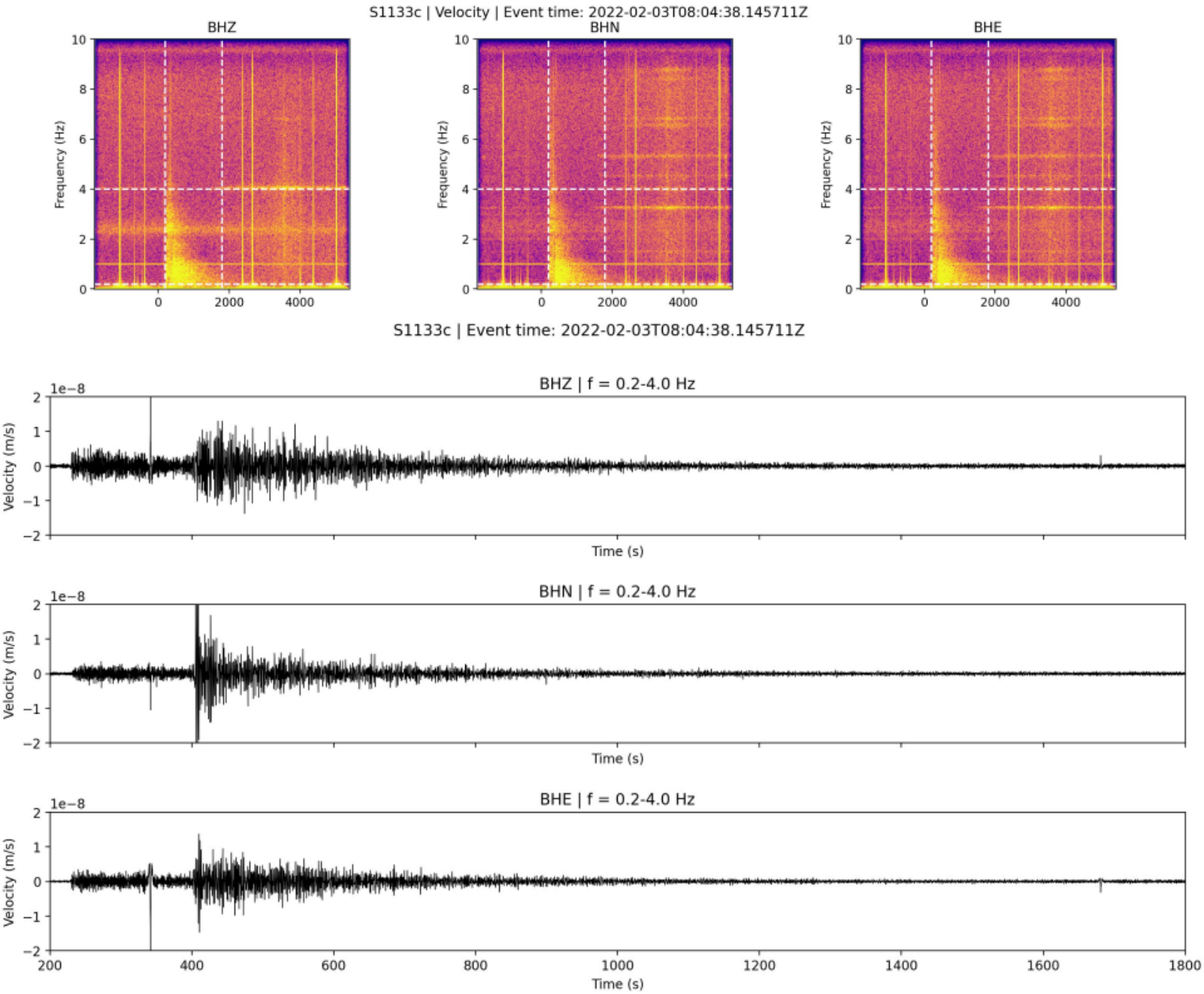
Σχήμα 28. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1102a.



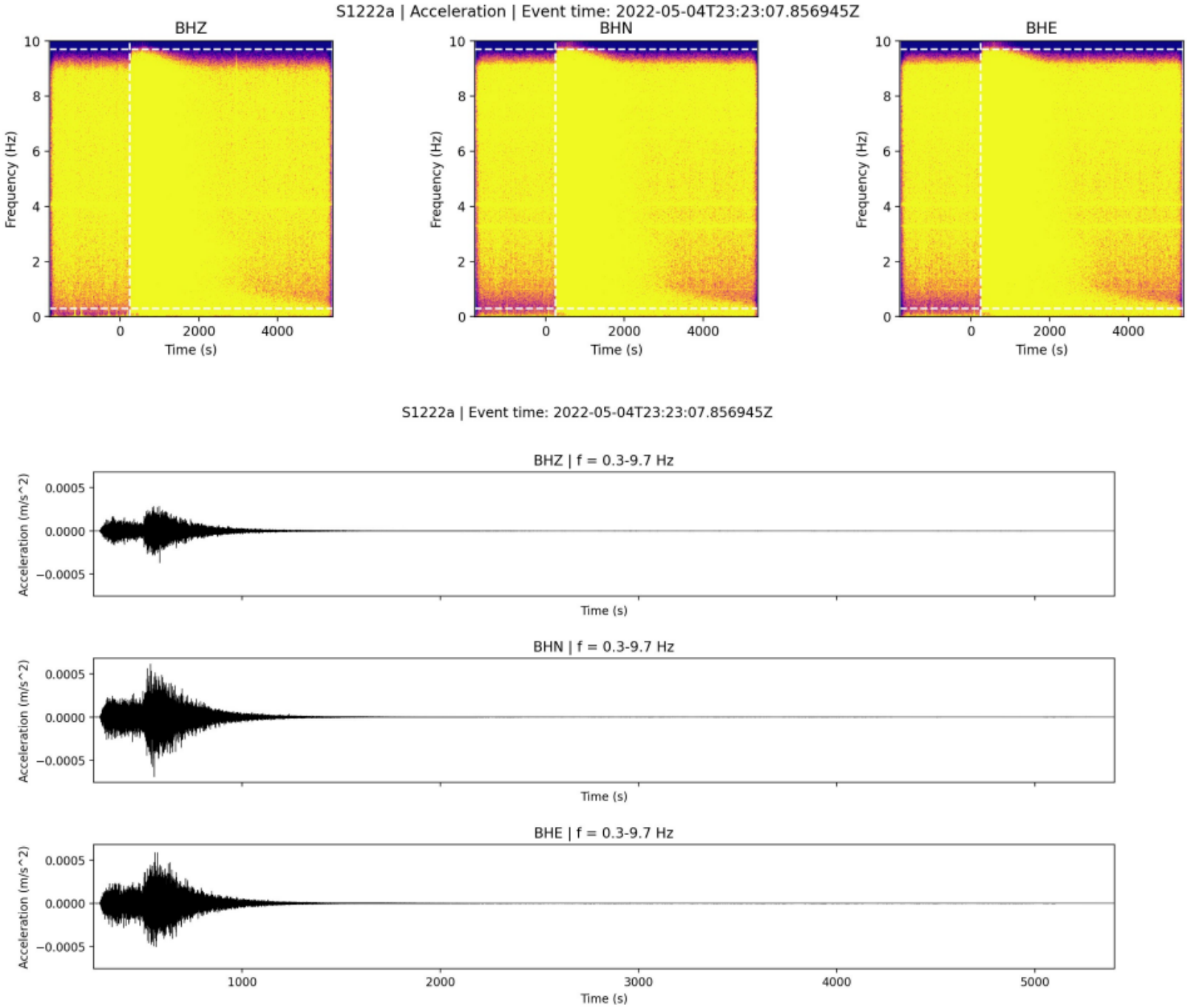
Σχήμα 29. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1133c.



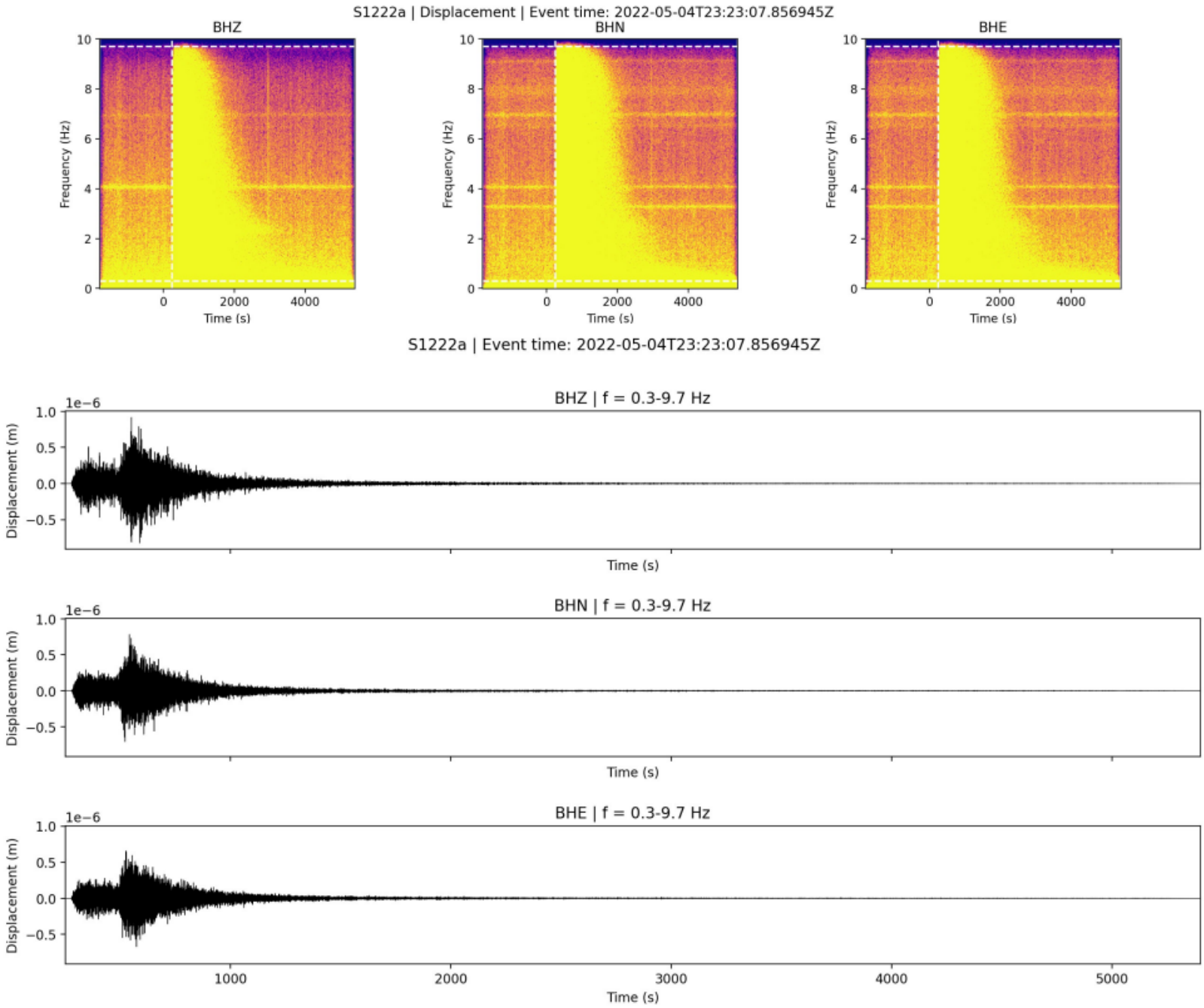
Σχήμα 30. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1133c.



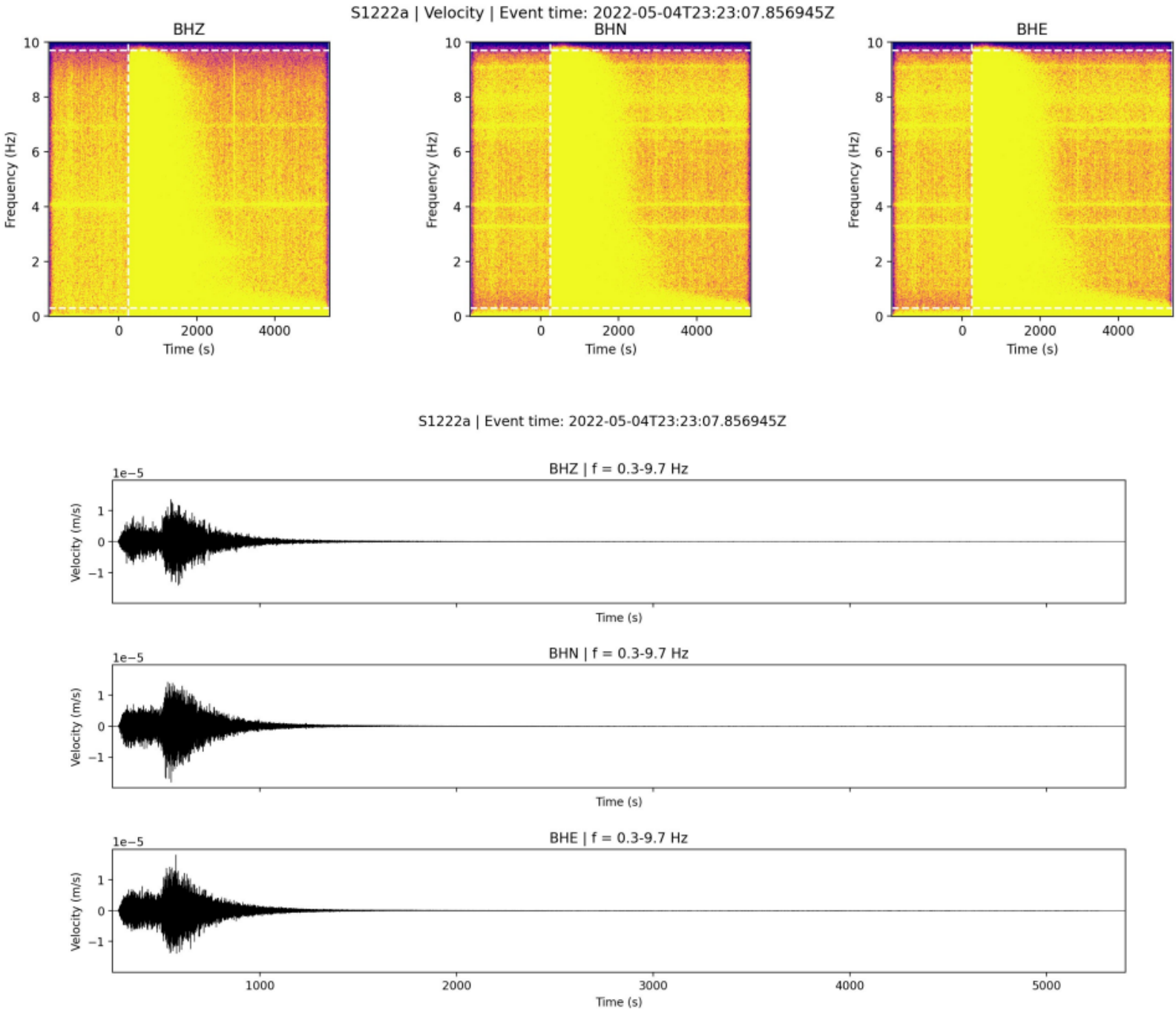
Σχήμα 31. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1133c



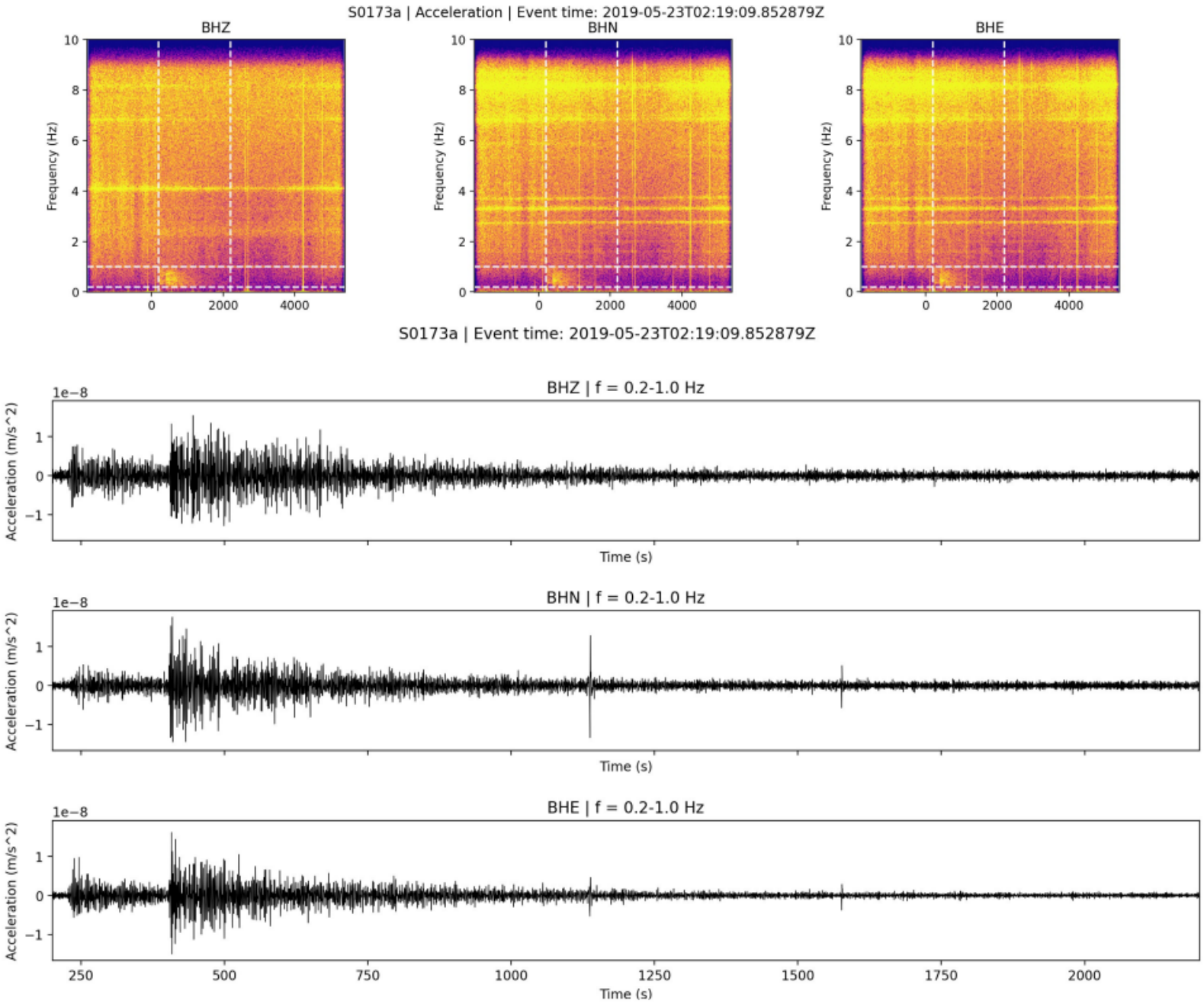
Σχήμα 32. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1222a.



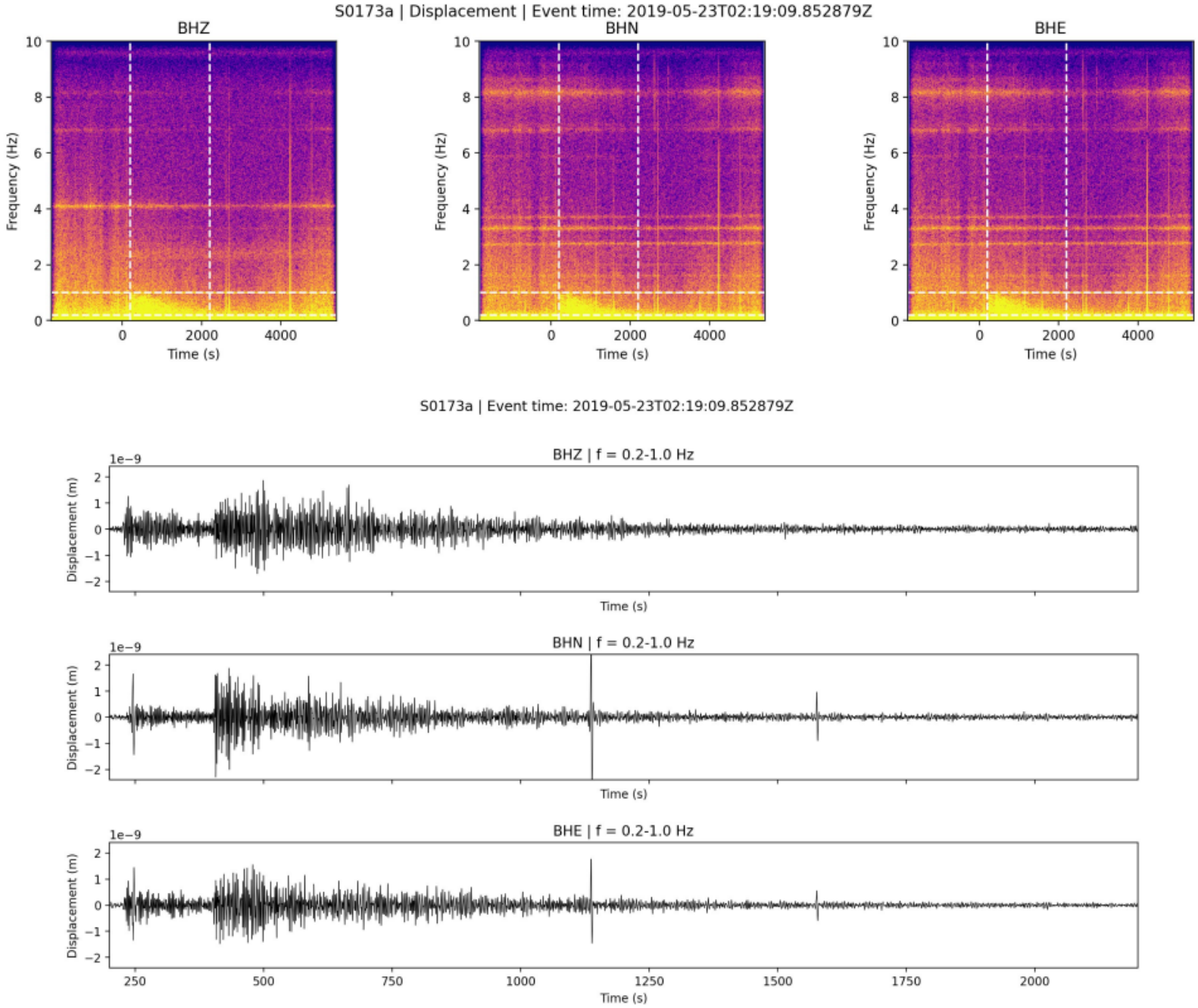
Σχήμα 33. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1222a.



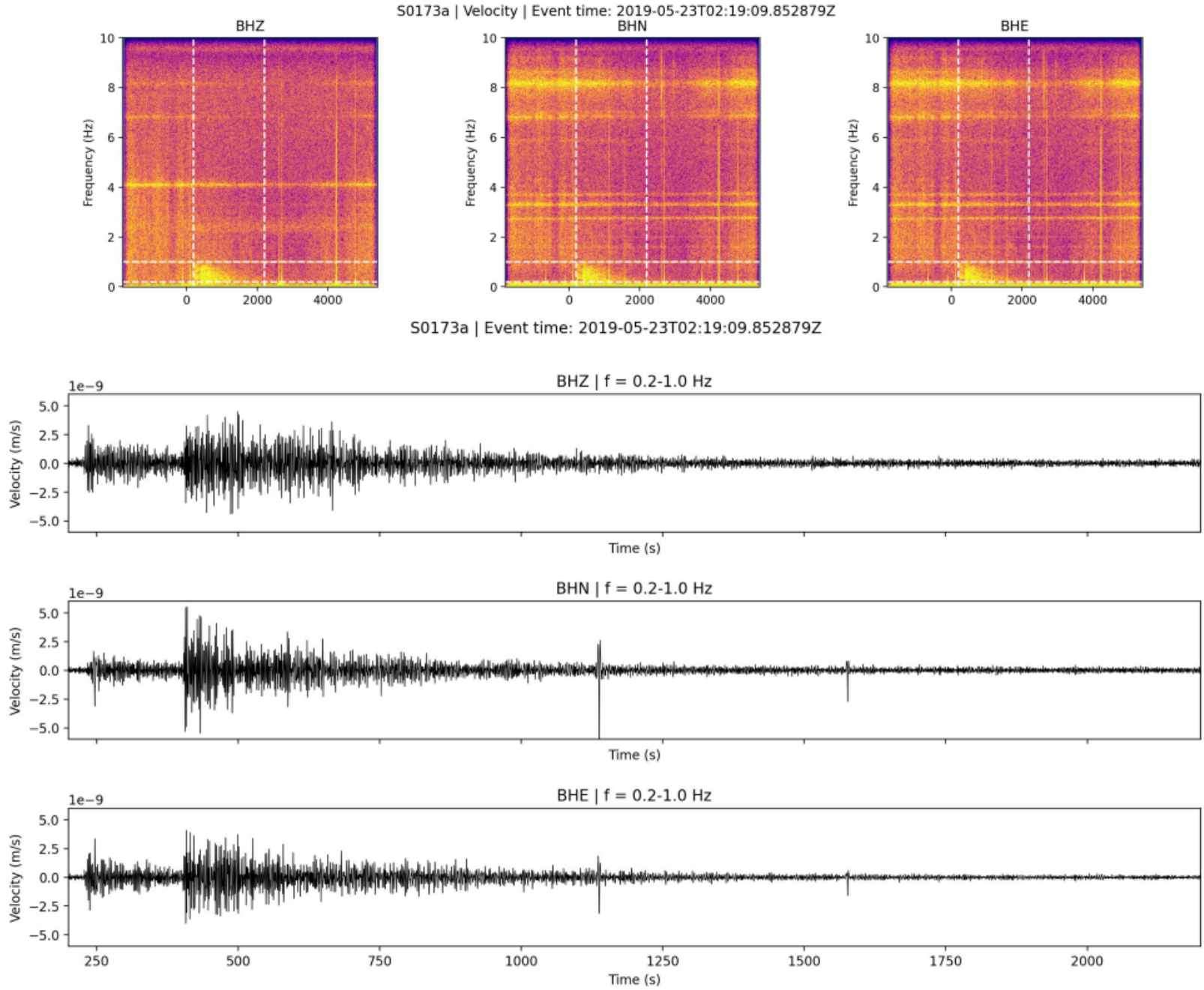
Σχήμα 34. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1222a.



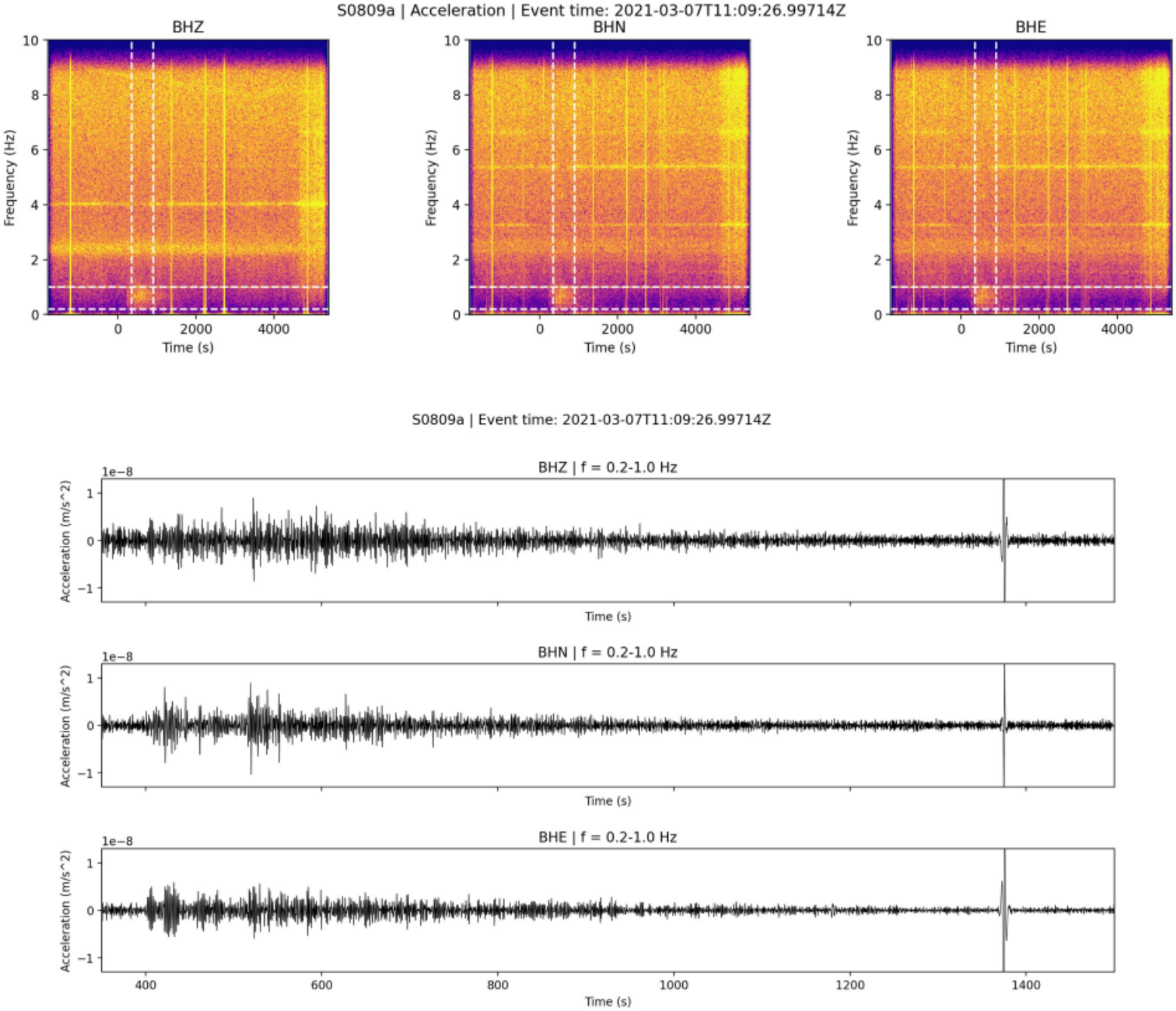
Σχήμα 35. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S0173a.



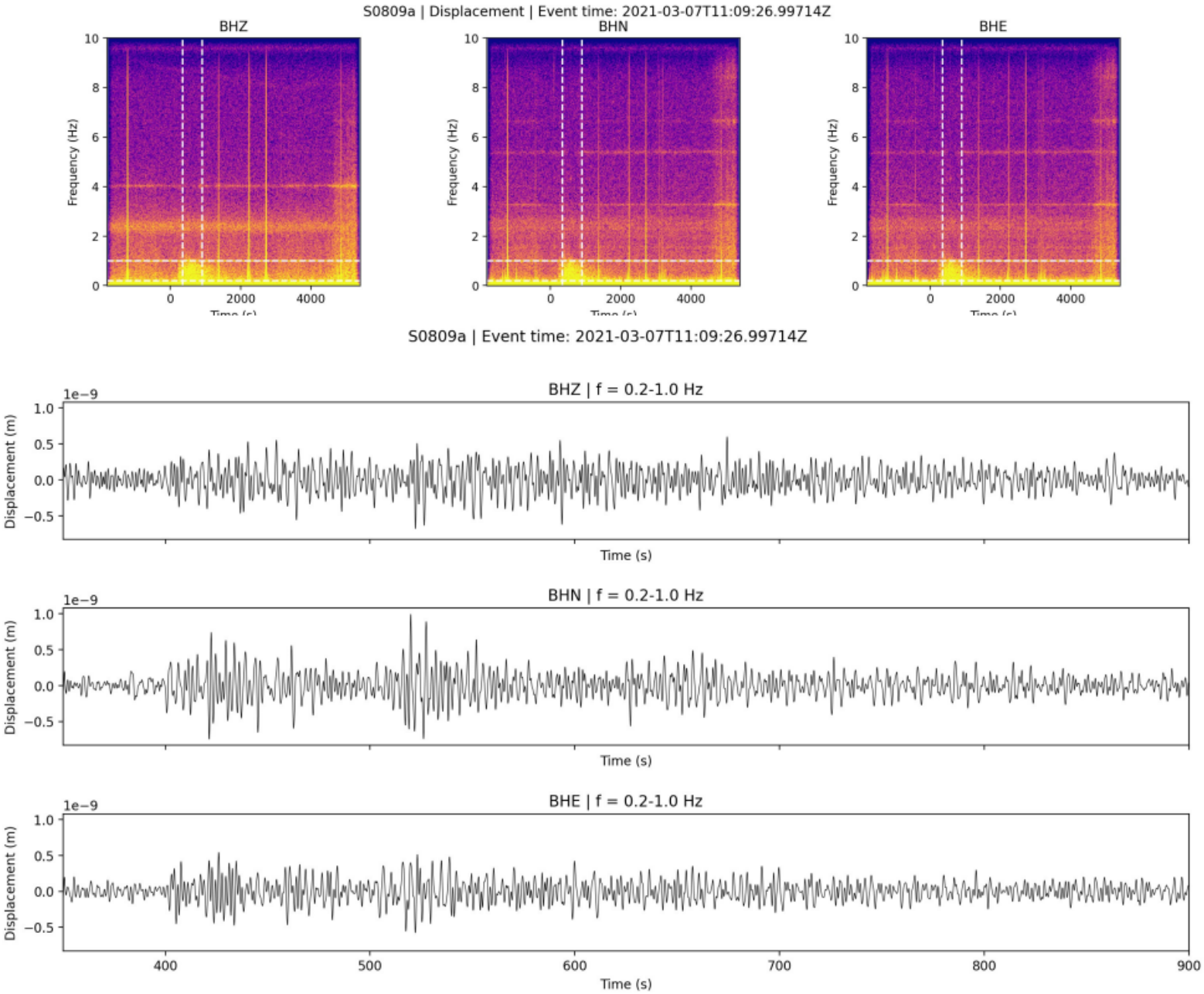
Σχήμα 36. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S0173a.



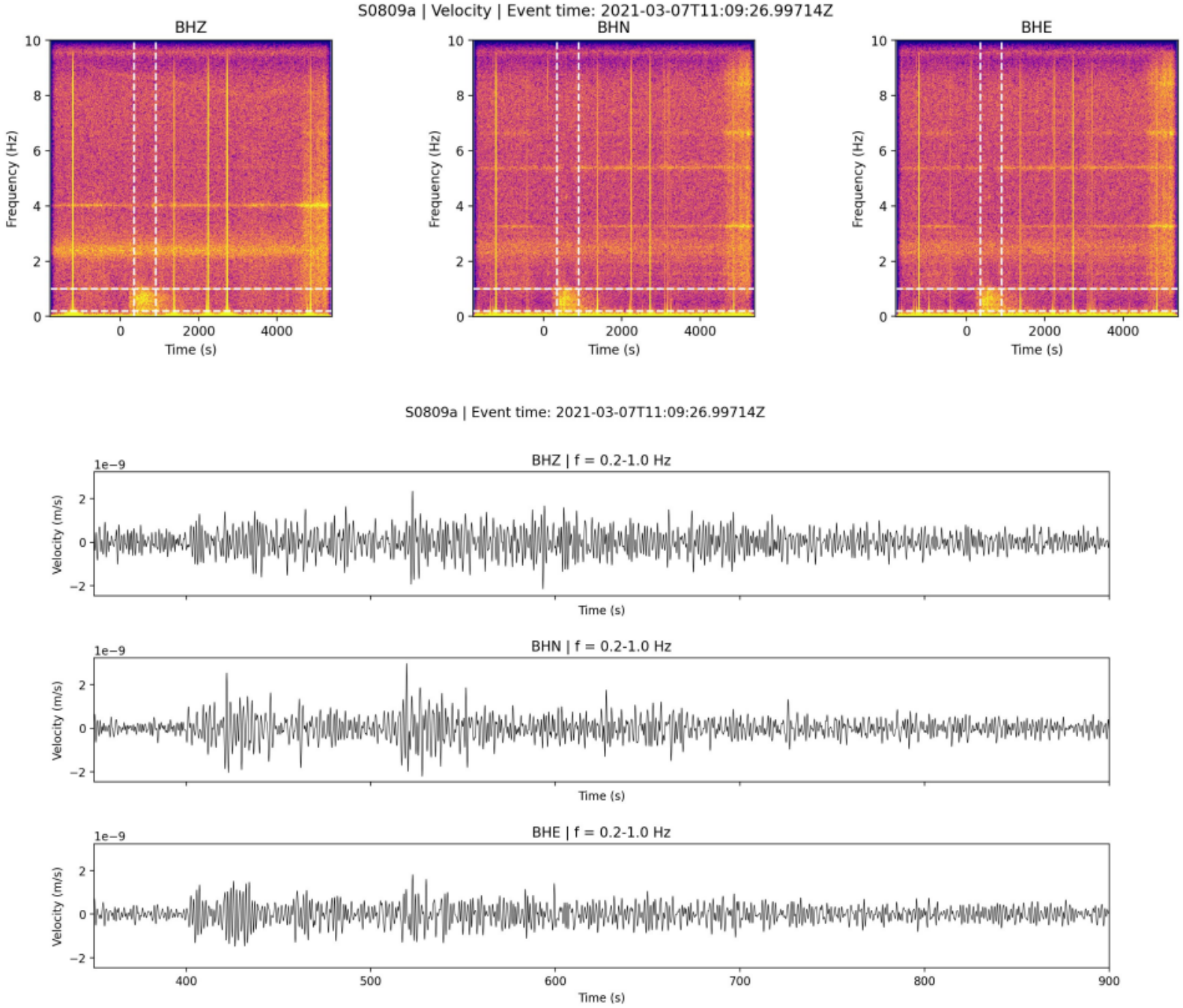
Σχήμα 37. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S0173a.



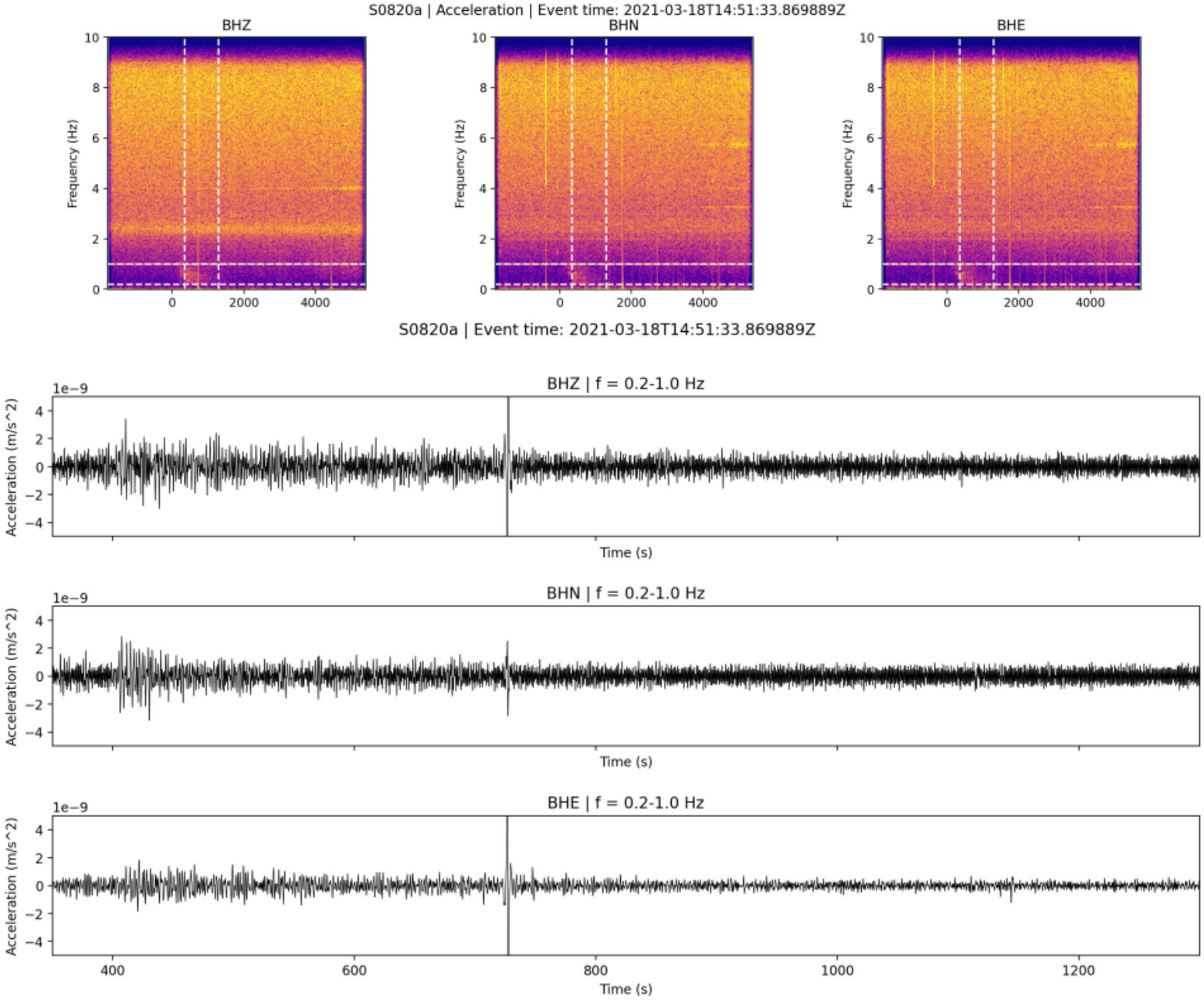
Σχήμα 38. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S0809a.



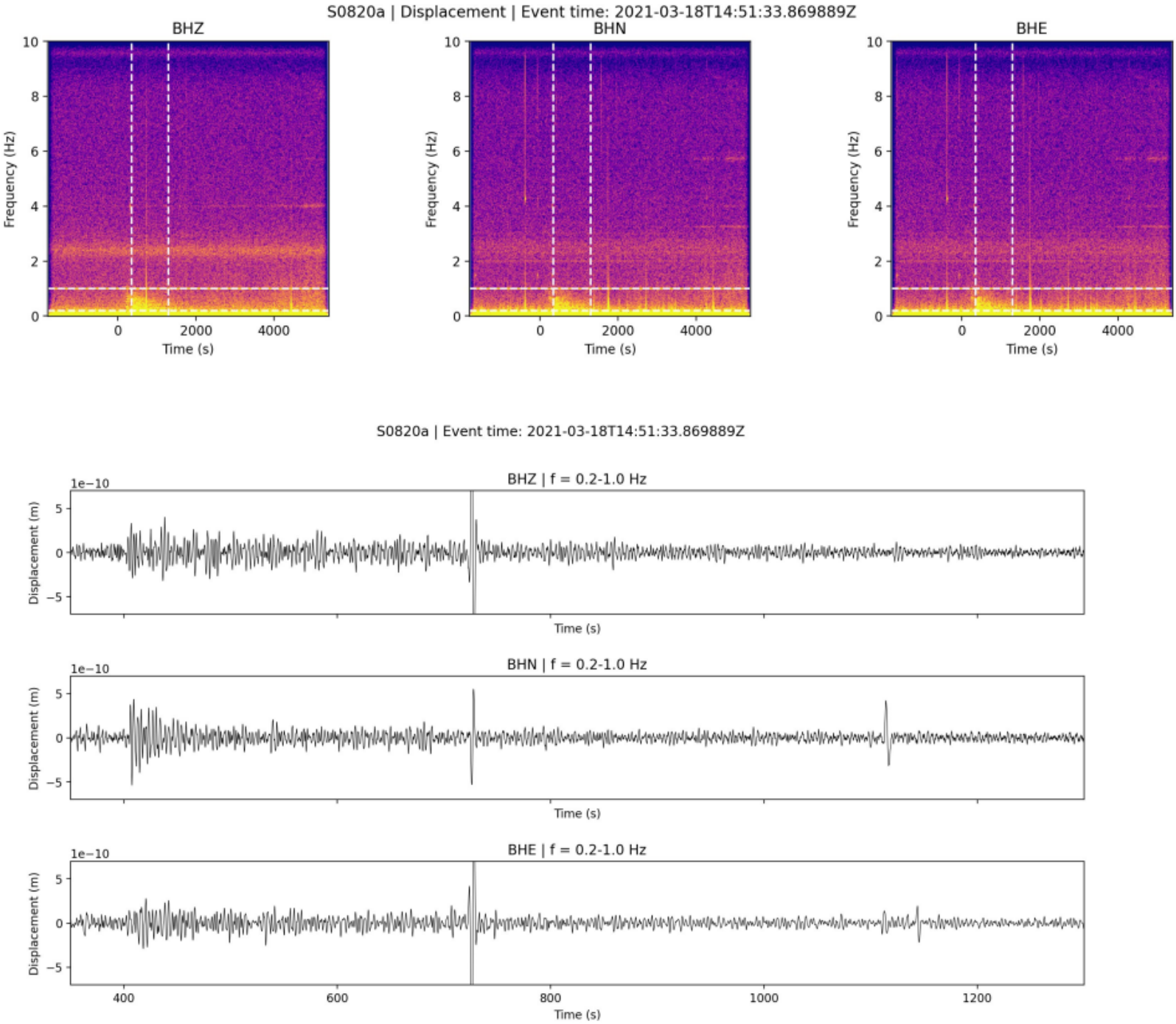
Σχήμα 39. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S0809a.



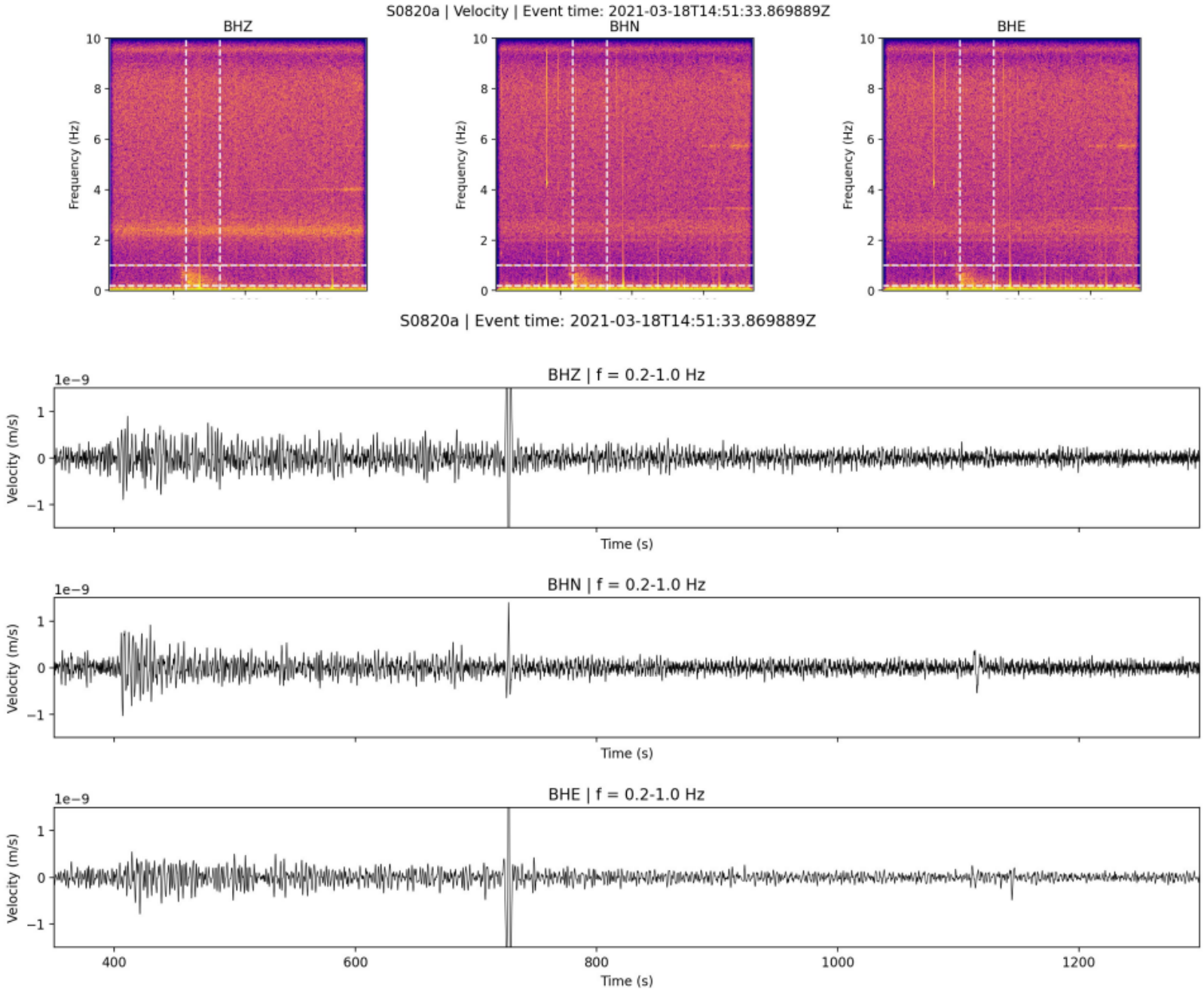
Σχήμα 40. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S0809a.



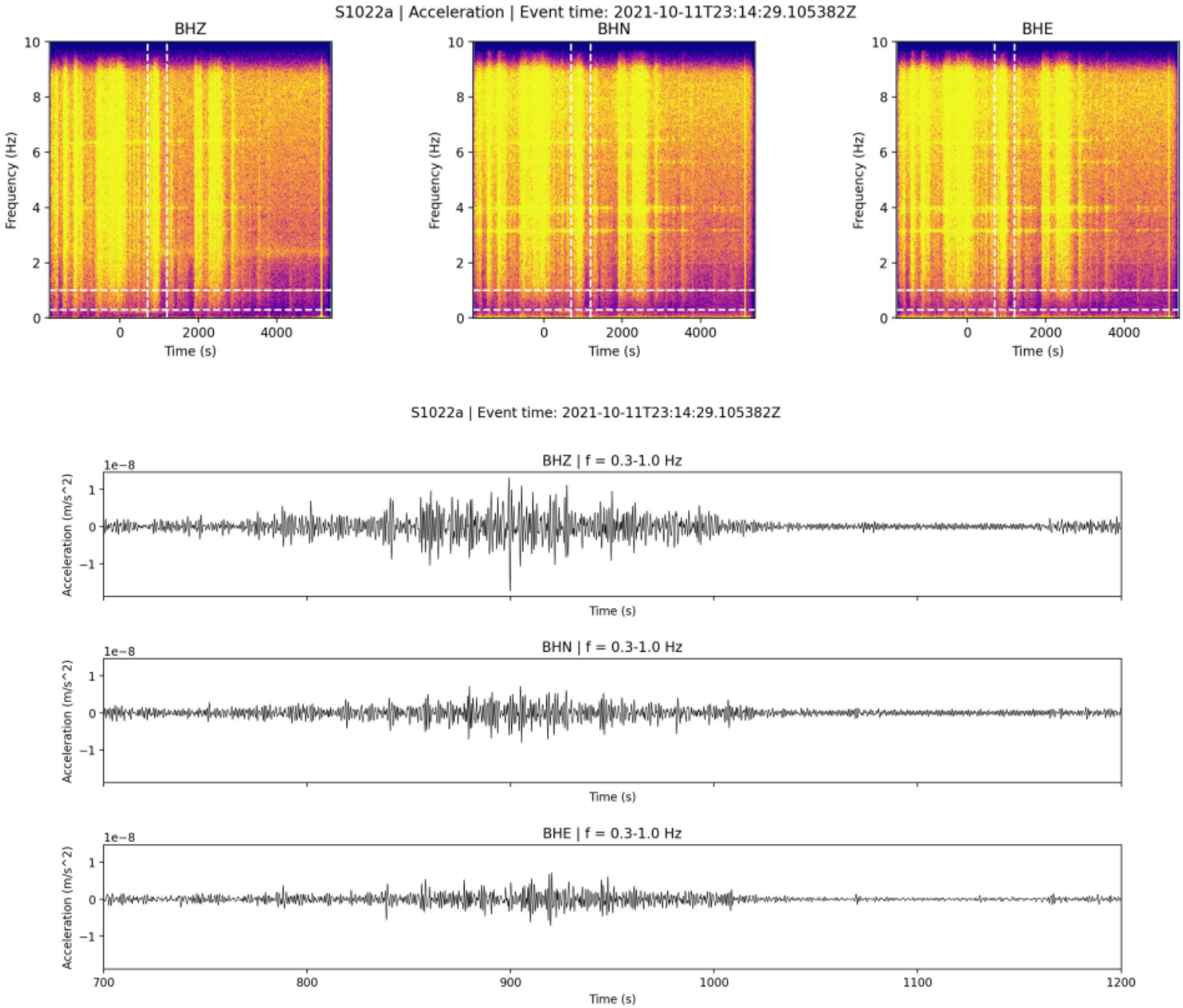
Σχήμα 41. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S0820a.



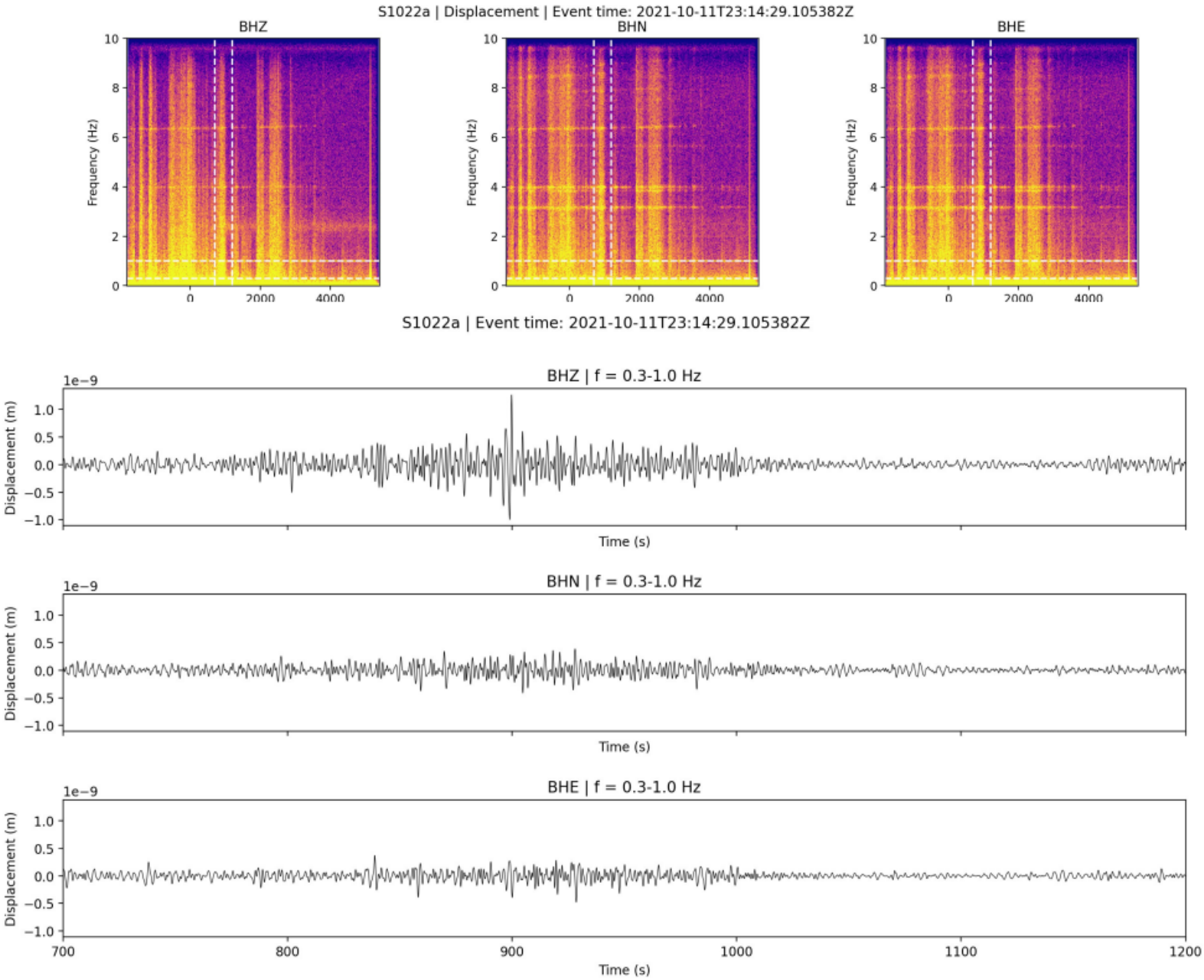
Σχήμα 42. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S0820a.



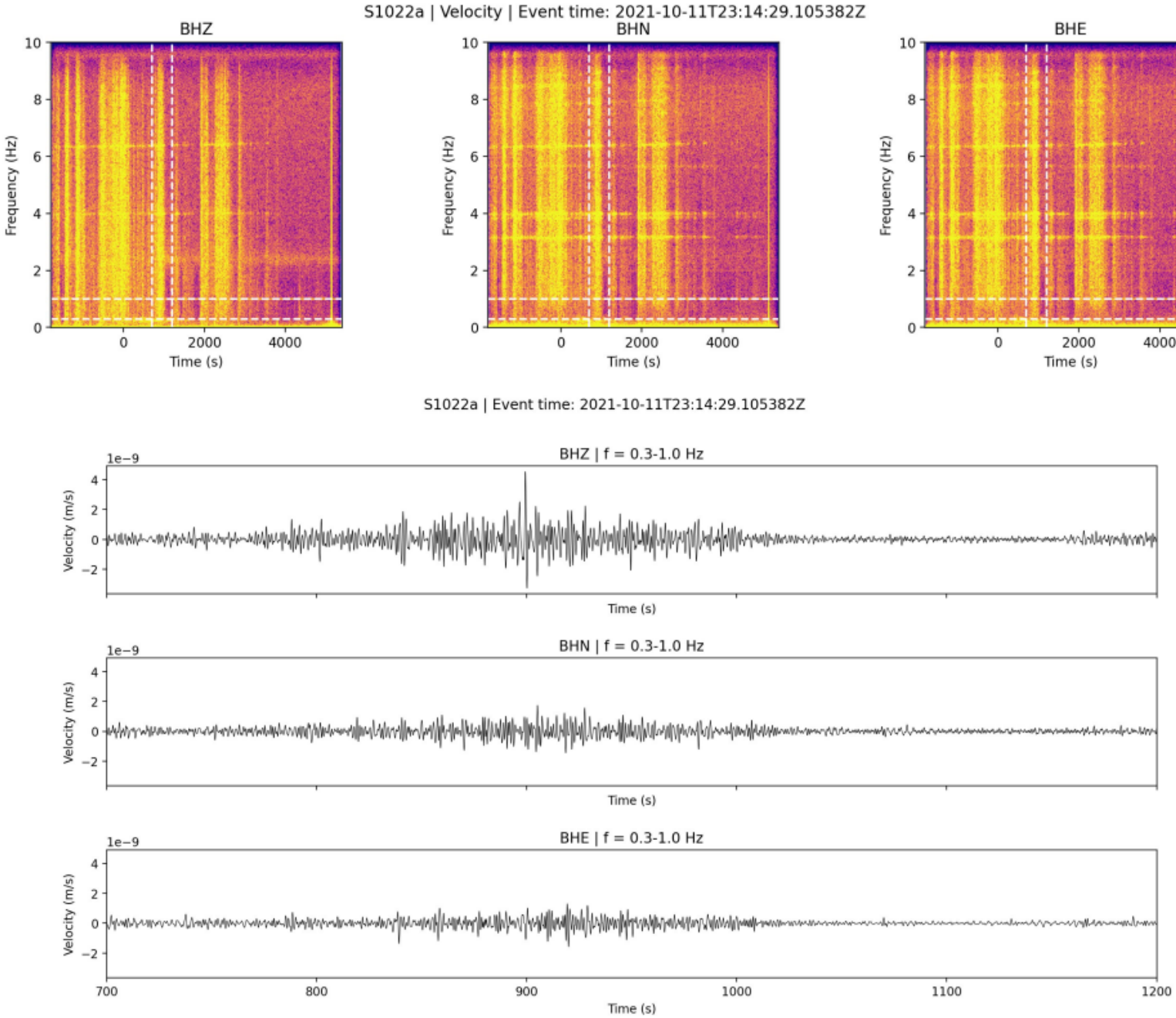
Σχήμα 43. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S0820a.



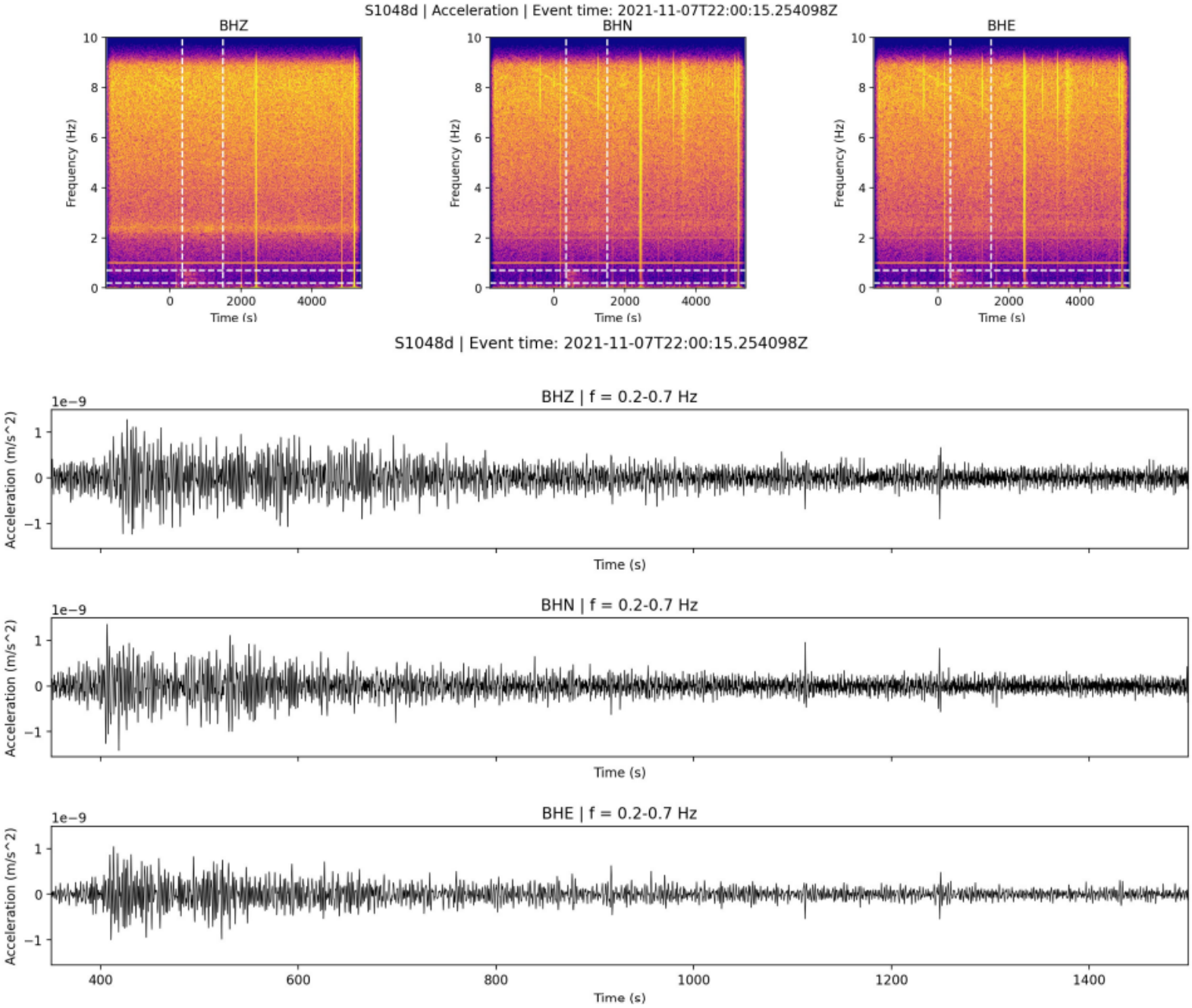
Σχήμα 44. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1022a.



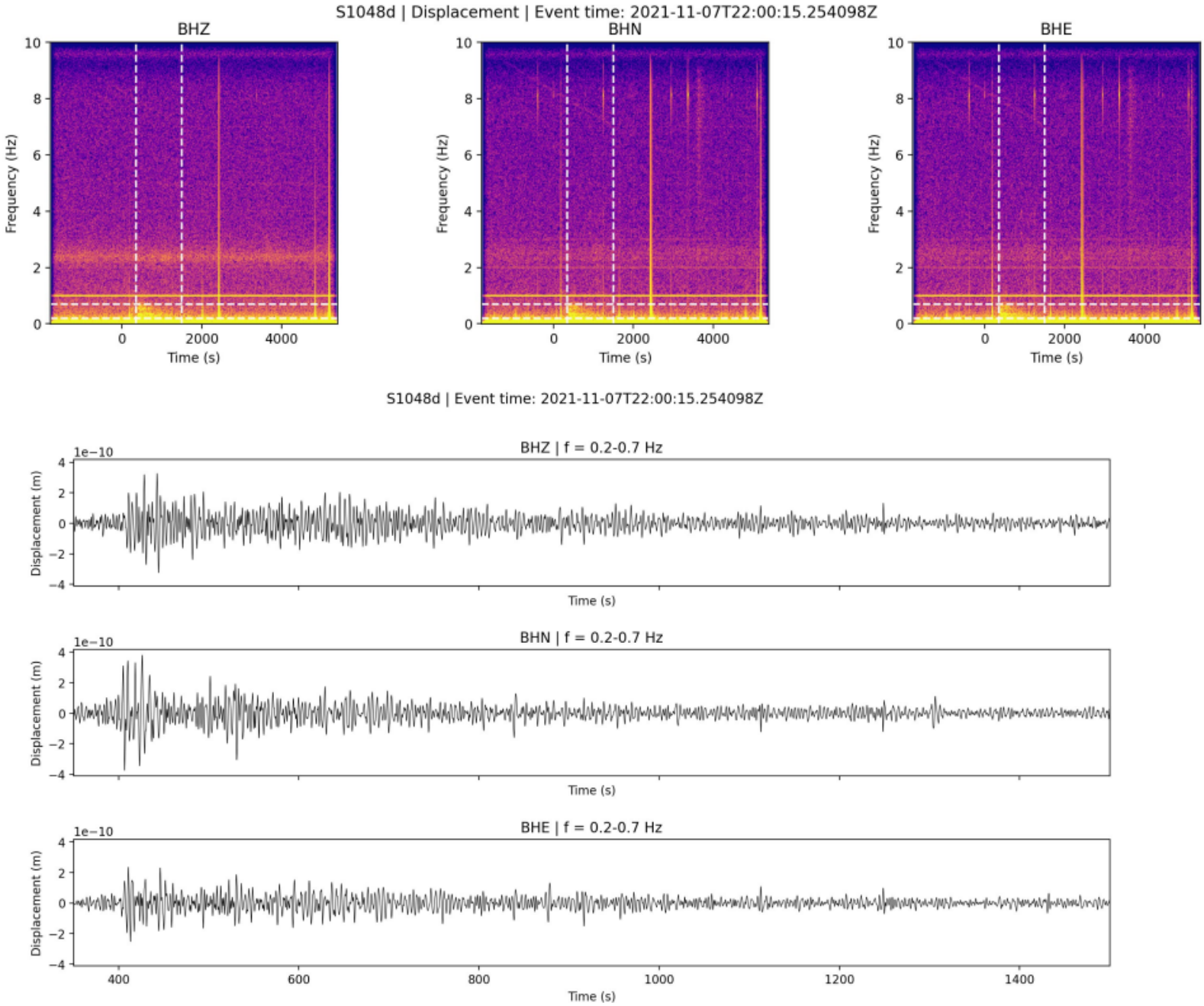
Σχήμα 45. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1022a.



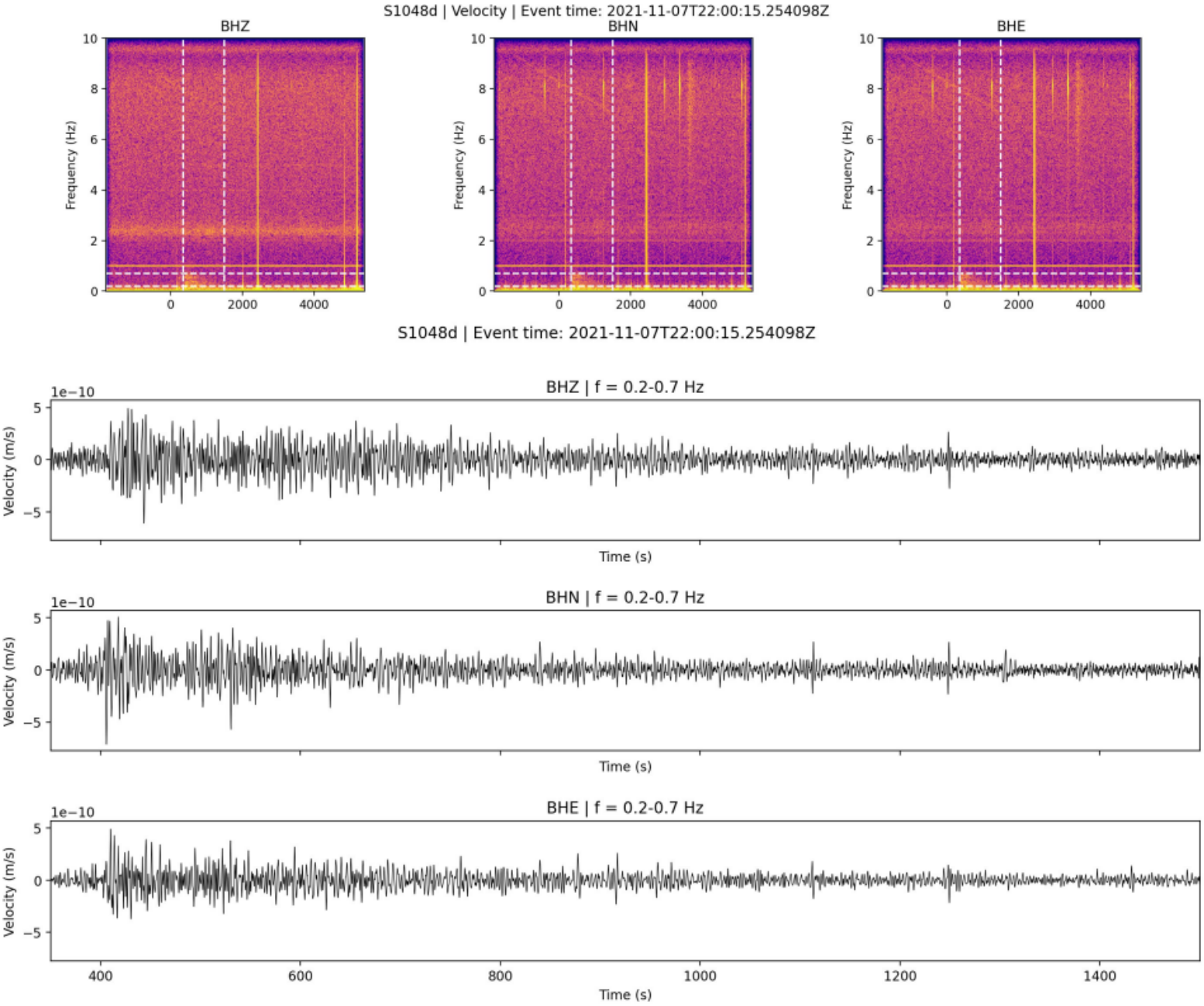
Σχήμα 46. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1022a.



Σχήμα 47. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της επιτάχυνσης για το γεγονός S1048d.



Σχήμα 48. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της μετατόπισης για το γεγονός S1048d.



Σχήμα 49. Τα σεισμογράμματα των 3 συνιστωσών, της μιας κάθετης και των 2 οριζόντιων, και το φασματογράφημα της ταχύτητας για το γεγονός S1048d.