



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

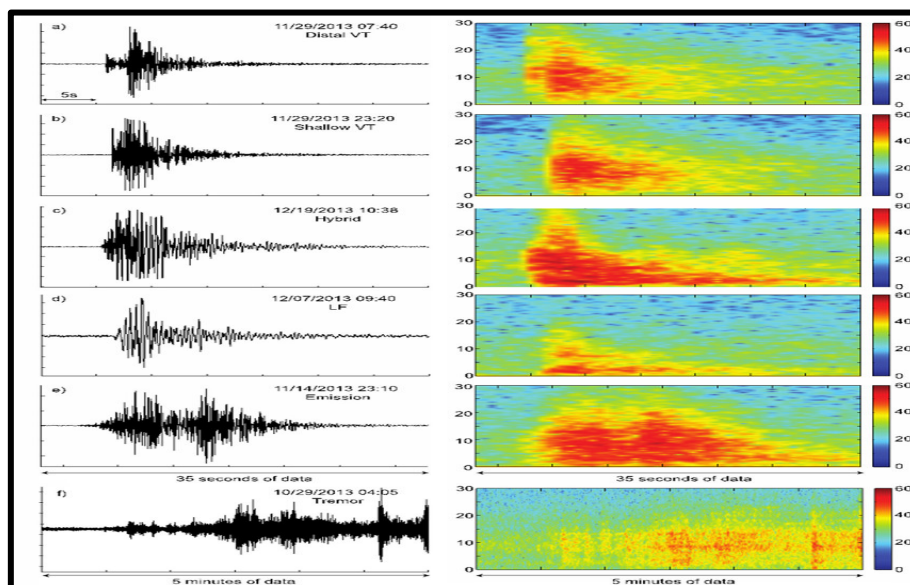
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση και επεξεργασία σεισμικών σημάτων πριν από την έκρηξη της 4^{ης} Φεβρουαρίου 2015 του ηφαιστείου Piton de la Fournaise»



Τσαφαράς Απόστολος

A.M.:1114201400151

Επόπτης: Καθηγητής Παπαδημητρίου Παναγιώτης

Αθήνα, 2020

~ 1 ~

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών με επιβλέποντα τον Καθηγητή Παναγιώτη Παπαδημητρίου τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλες τις φάσεις ολοκλήρωσής της, καθώς επίσης και τον υποψήφιο Διδάκτορα Σεισμολογίας Ανδρέα Καρακωνσταντή για την πολύτιμη βοήθειά του.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία χωρίζεται σε 4 κεφάλαια. Στο 1^ο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στο τι είναι ηφαιστεια, στις κατηγορίες ηφαιστείων και στον τρόπο λειτουργίας τους. Επίσης, στα ηφαιστειακά σήματα, στις κατηγορίες τους και θα δοθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα για κάθε μία κατηγορία. Στο 2^ο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, από που αντλήθηκαν, καθώς επίσης και στην ιστορία του ηφαιστείου Piton de la Fournaise. Ακόμα, θα παρουσιαστούν οι σεισμολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση των δεδομένων με την κατασκευή χάρτη. Στο 3^ο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην ανάλυση των δεδομένων μας και θα δοθούν διαγράμματα σεισμικότητας πριν την έκρηξη. Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο θα παρατεθούν τα συμπεράσματα από την εργασία αυτή.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Κεφάλαιο 1 ^ο : Ηφαίστεια	5
1.1 Ορισμός.....	5
1.2 Δομή Ηφαιστείου.....	5
1.3 Περιοχές Εντοπισμού.....	6
1.4 Τύποι Ηφαιστείων.....	7
1.4.1 Ασπιδικά Ηφαίστεια	7
1.4.2 Μικτά Ηφαίστεια ή Στρωματοηφαίστεια.....	8
1.4.3 Ηφαιστειακοί Δόμοι.....	8
1.5 Ηφαιστειακά Σήματα	9
1.5.1 Κατηγοριοποίηση Ηφαιστειακών Σημάτων.....	10
1.5.1.1 Υψίσυχνα σήματα ή ηφαιστειοτεκτονικοί σεισμοί (High frequency- HF, ή volcanotectonic-VT earthquakes)	10
1.5.1.2 Χαμηλόσυχνα σήματα ή μεγάλης περιόδου σήματα (LF-low frequency ή LP-long period volcanic earthquakes)	11
1.5.1.3 Υβριδικά σήματα (Hybrid events)	12
1.5.1.4 Χαμηλόσυχνα σήματα εκρήξεων ή σεισμοί έκρηξης (Explosion earthquakes) .	12
1.5.1.5 Πολύ μεγάλης περιόδου σεισμοί (VLP-very long period events)	13
1.5.1.6 Ηφαιστειακές δονήσεις (Volcanic tremors)	13
1.6 Επίπεδα Συναγερμού Ηφαιστείων.....	15
Κεφάλαιο 2 ^ο : Ηφαίστειο Piton de la Fournaise.....	16
2.1 Γεωλογία και Ηφαιστειακή Δραστηριότητα.....	16
2.2 Έκρηξη 4 ^{ης} Φεβρουαρίου 2015.....	23
2.3 Σεισμολογικοί Σταθμοί.....	28
Κεφάλαιο 3 ^ο : Δεδομένα και Επεξεργασία.....	29
3.1 Ανάλυση Δεδομένων.....	29
3.1.1 Κατηγορίες LF και Tremors σημάτων.....	30
3.1.2 Σεισμικότητα (1/11/2014-15/2/2015)	33
Κεφάλαιο 4ο: Συμπεράσματα	39
Βιβλιογραφία	42
Παράρτημα 1.....	43
Παράρτημα 2.....	48
Πίνακας Εικόνων	82
Πίνακας Εξισώσεων.....	84
Πίνακας Χαρτών	85

Κεφάλαιο 1^ο: Ηφαίστεια

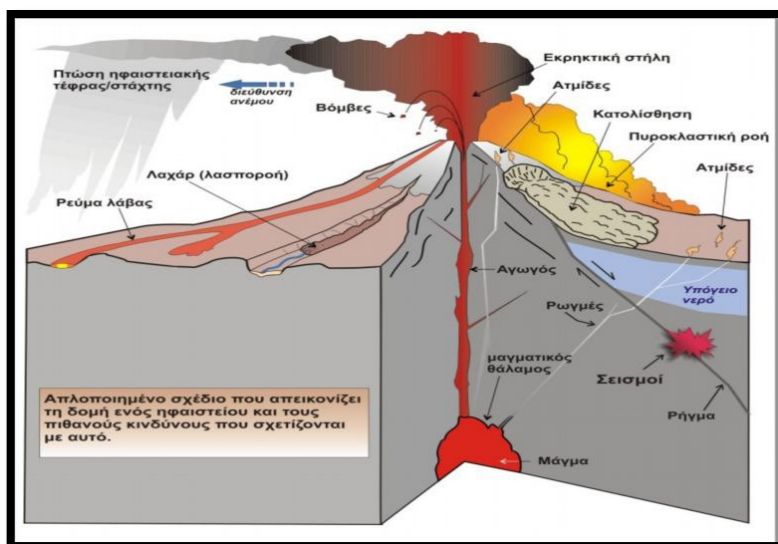
1.1 Ορισμός

Ως ηφαίστειο ορίζεται μια διέξοδος ή σχισμή στον φλοιό της Γης, μέσω της οποίας εκρέει και ξεσπά λάβα, στάχτη, πέτρες και αέρια. Ένα ηφαίστειο μπορεί επίσης να οριστεί και ως ένα βουνό που σχηματίζεται από τη συσσώρευση αυτών των εκρηκτικών προϊόντων.

1.2 Δομή Ηφαιστείου

Κάθε ηφαίστειο διαθέτει έναν κεντρικό αγωγό όπου στο ανώτερο άκρο του ανοίγει και παίρνει τη μορφή χοανοειδούς σχήματος το οποίο ονομάζεται κρατήρας του ηφαιστείου. Από τον κεντρικό αγωγό διέρχεται το μαγματικό τήγμα και απελευθερώνεται στην επιφάνεια.

Συνήθως το ηφαιστειακό οικοδόμημα έχει σχήμα κώνου και δομείται από συμμετρική περίπου συσσώρευση λάβας ή/και πυροκλαστικού υλικού γύρω από τον κεντρικό αγωγό. Οι πλευρές του ηφαιστείου είναι συνήθως ασταθείς και περιέχουν κατακόρυφα ρήγματα που επικοινωνούν με τον κύριο μαγματικό θάλαμο ή με κάποιο δευτερεύοντα σε μικρότερο βάθος ή μέσω παρακλαδιών με τον κεντρικό αγωγό. Ο κεντρικός αγωγός συνδέεται στο βάθος με τον μαγματικό θάλαμο που είναι η θέση όπου αποθηκεύεται το ηφαιστειακό υλικό.

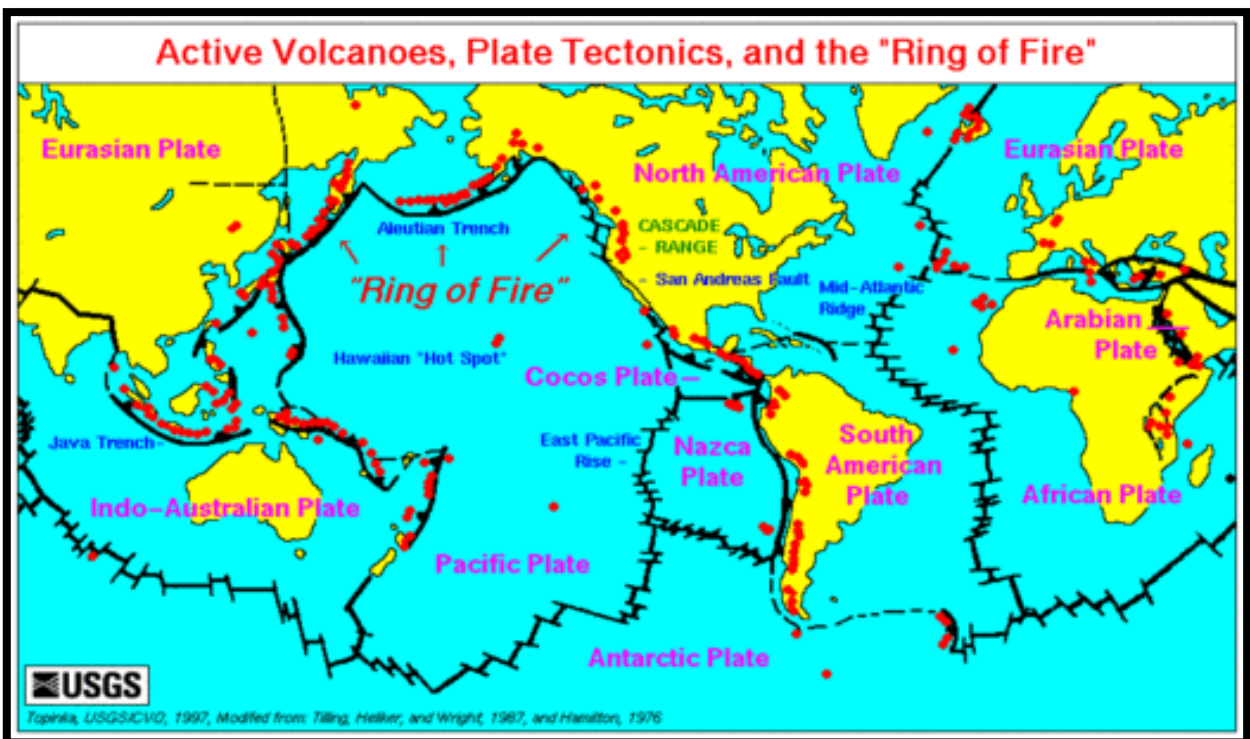


Εικόνα 1. Δομή Ηφαιστείου και πιθανοί κίνδυνοι (Πηγή: <http://history-pages.blogspot.gr/2012/08/blog-post.html>)

1.3 Περιοχές Εντοπισμού

Οι περιοχές όπου εντοπίζονται τα ηφαίστεια είναι στις ζώνες σύγκλισης των λιθосφαιρικών πλακών, στις ζώνες απόκλισης καθώς και στις κεντρικές περιοχές αυτών.

Στην πρώτη περιοχή εντοπισμού των ηφαιστειών η μία πλάκα υποβυθίζεται και καταστρέφεται κάτω από μια άλλη, και είναι η περίπτωση όπου εμφανίζεται το 80% των ενεργών ηφαιστειών σε παγκόσμια κλίμακα. Στη δεύτερη, τα αποκλίνοντα όρια των λιθосφαιρικών πλακών, γνωστά και ως μεσσοκεάνιες ράχες, κατά μήκος των οποίων συντελείται συνεχής άνοδος μαγματικού υλικού και δημιουργία νέου φλοιού στους ωκεάνιους πυθμένες. Τα ηφαίστεια των μεσσοκεάνιων ράχων είναι υποθαλάσσια και σε ελάχιστες περιπτώσεις φτάνουν σε ύψη που υπερβαίνουν το επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης. Στην τελευταία, εντοπίζονται ηφαίστεια στις κεντρικές περιοχές των (ωκεάνιων ή ηπειρωτικών) τεκτονικών πλακών, περιοχές γνωστές και ως θερμές κηλίδες (hotspots), όπου κάποια ασυνέχεια του φλοιού επιτρέπει τη διόδο τηγμένου υλικού μέσα από το εσωτερικό της γης και προκαλεί την εμφάνιση ηφαιστειών. Τα νησιά της Χαβάης στο κέντρο του Ειρηνικού ωκεανού αποτελούν αντιπροσωπευτικό παράδειγμα.



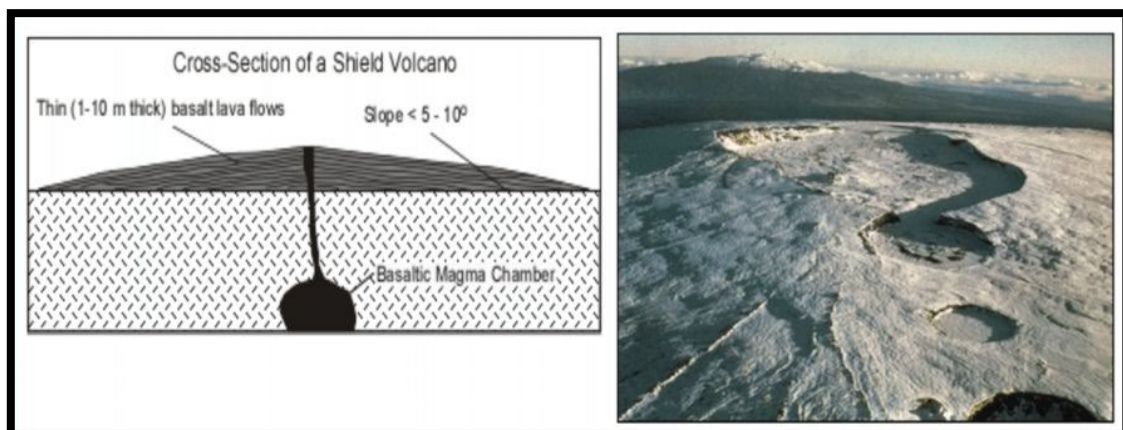
Εικόνα 2. Ενεργά Ηφαίστεια (Πηγή:USGS).

1.4 Τύποι Ηφαιστείων

Οι κυριότεροι επομένως ηφαιστειακοί τύποι με βάση την σύσταση του μάγματος είναι α) τα Ασπιδικά ηφαίστεια, β) τα Μικτά ηφαίστεια ή στρωματοηφαίστεια και γ) οι Ηφαιστειακοί δόμοι.

1.4.1 Ασπιδικά Ηφαίστεια

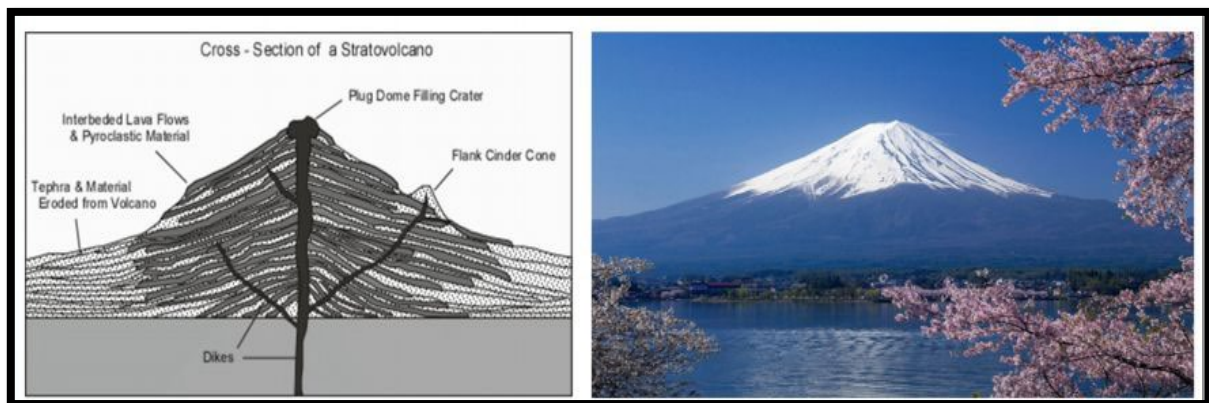
Τα ασπιδικά (ή ασπιδόμορφα) ηφαίστεια χαρακτηρίζονται από μη εκρηκτική δραστηριότητα που είναι αποτέλεσμα της μικρής περιεκτικότητας του μάγματος σε πυρίτιο (περίπου 50%). Είναι πολύ μεγάλα σε έκταση και αποτελούνται αποκλειστικά σχεδόν από πολυάριθμες ροές λαβών. Αποτελούν τον πλέον συνηθισμένο τύπο ηφαιστείων. Επίσης, τα τυπικά ηφαίστεια της κατηγορίας αυτής είναι αυτά που αναπτύσσονται σε ωκεάνιες περιοχές και συγκεκριμένα σε αυτές των νήσων της Χαβάης, το Kilauea και το MaunaLoa είναι δύο από τα πιο γνωστά ενεργά ηφαίστεια στον κόσμο. Συγκεκριμένα το MaunaLoa, το οποίο είναι το μεγαλύτερο του είδους του και το πιο ενεργό ηφαίστειο στον κόσμο, προεξέχει 4.170 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η κορυφή του βρίσκεται 9090 μέτρα από τον ωκεάνιο πυθμένα.



Εικόνα 3. Αριστερά-Κάθετη τομή Ασπιδόμορφου ηφαιστείου. Δεξιά-Ηφαίστειο MaunaLoa, Χαβάη.

1.4.2 Μικτά Ηφαίστεια ή Στρωματοηφαίστεια

Τα μικτά ηφαίστεια ή στρωματοηφαίστεια είναι γνωστά για το κωνοειδές σχήμα τους, χαρακτηρίζονται από μάγμα με ενδιάμεση περιεκτικότητα σε πυρίτιο (περίπου 60%), πιο παχύρρευστο από το μάγμα των ασπιδικών ηφαιστείων. Η δραστηριότητά τους χαρακτηρίζεται από αλλεπάλληλες εκρήξεις ροών λάβας και αερίων. Τα ηφαίστεια του τύπου αυτού απαντούν σε πολλές περιοχές του κόσμου. Τα στρωματοηφαίστεια εντοπίζονται στις περιοχές που οι τεκτονικές πλάκες συγκλίνουν, στις οποίες η μια πλάκα υποβυθίζεται κάτω από μια άλλη. Χαρακτηριστικά ηφαίστεια της κατηγορίας αυτής είναι το όρος Fuji στην Ιαπωνία, το όρος Cotopaxi στο Εκουαδόρ, το όρος Shasta στην Καλιφόρνια, το όρος Hood στο Όρεγκον, το όρος St. Helens, το όρος Rainier στην Ουάσιγκτον και το όρος Vesuvius στην Ιταλία.



Εικόνα 4. Αριστερά-Κάθετη τομή στρωματοηφαίστειου. Δεξιά-Mount Fuji, Ιαπωνία.

1.4.3 Ηφαιστειακοί Δόμοι

Οι ηφαιστειακοί δόμοι χαρακτηρίζονται από παχύρρευστο μάγμα με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο (>70%). Η δραστηριότητά τους είναι γενικά πολύ μεγάλη, καθιστώντας τους πολύ επικίνδυνους.



Εικόνα 5. Ηφαιστειακοί Δόμοι στο εσωτερικό κρατήρα (Πηγή: USGS).

1.5 Ηφαιστειακά Σήματα

Από αρχαιότατων χρόνων οι ηφαιστειακές εκρήξεις συσχετιζόντουσαν με τους σεισμούς. Για αρκετά χρόνια οι άνθρωποι θεωρούσαν τα ηφαίστεια ως την κύρια πηγή των σεισμών. Το ηφαίστειο του Βεζούβιου κατέχει ειδική θέση στην ιστορία της μελέτης των σεισμικών σημάτων τα οποία σχετιζόντουσαν με ηφαιστειακή δραστηριότητα. Ήταν το πρώτο ηφαίστειο το οποίο απέκτησε ηφαιστειακό παρατηρητήριο το 1847 καθώς και το πρώτο όπου παρακολουθήθηκε η δραστηριότητά του χρησιμοποιώντας ενόργανες μετρήσεις.

Ως επιστήμη, η Ηφαιστειακή Σεισμολογία γεννήθηκε όταν ο Fusakichi Omori, ένας Ιάπωνας σεισμολόγος ξεκίνησε τις παρατηρήσεις των σεισμικών σημάτων τα οποία καταγράφηκαν κατά τις εκρήξεις το 1910 των ηφαιστίων Usu-san και Asama και το 1914 του ηφαιστίου Sakurajima.

Μεταξύ των κυριότερων σταθμών εξέλιξης της Ηφαιστειακής Σεισμολογίας μπορούμε να παραθέσουμε τις σεισμικές παρατηρήσεις του παρατηρητηρίου του ηφαιστίου Asama στο νησί Honshu της Ιαπωνίας το 1934, καθώς και του ηφαιστειακού παρατηρητηρίου της Kamchatka στο Klyuchi, στην πρώην Ε.Σ.Σ.Δ. το 1946.

1.5.1 Κατηγοριοποίηση Ηφαιστειακών Σημάτων

Οι πρώτες παρατηρήσεις ηφαιστειακών σεισμών έδειξαν ότι τα σεισμικά σήματα που δημιουργούνται από ηφαιστειακή δράση είχαν διαφορετικές μορφές. Η πρώτη και ακόμη παγκοσμίως αποδεκτή ταξινόμηση των ηφαιστειακών σεισμών βάσει της μορφής των κυματομορφών τους έγινε από τον Minakami, ο οποίος τους χώρισε στις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες

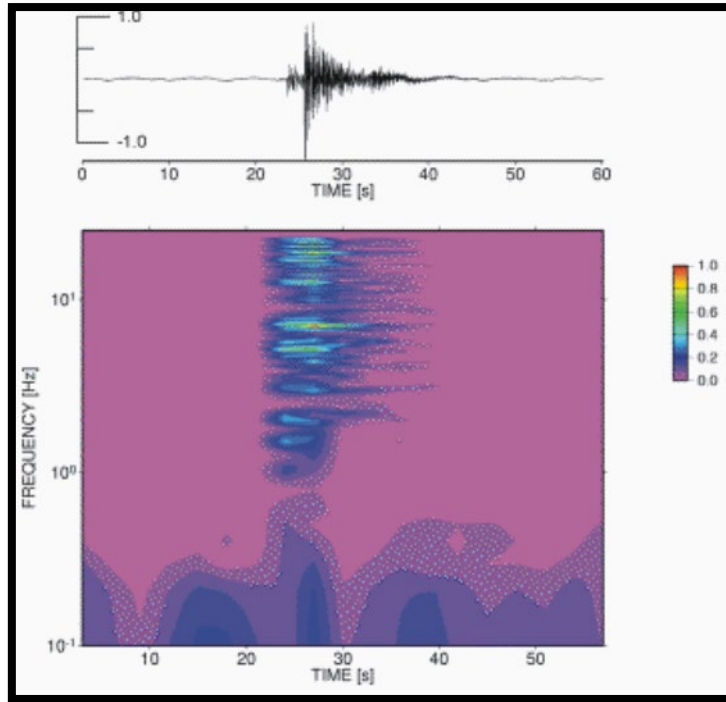
- Α τύπου
- Β τύπου
- σεισμούς έκρηξης και
- ηφαιστειακές δονήσεις

ανάλογα με τη θέση της εστίας τους, τη σχέση τους με ηφαιστειακή έκρηξη, και τη φύση της σεισμικής κίνησης. Φυσικά για κάθε ηφαίστειο οι σεισμολόγοι χρησιμοποιούν τη δική τους κατηγοριοποίηση με λεπτομερέστερη περιγραφή για κάθε είδος ηφαιστειακού σεισμού.

Ωστόσο ο McNutt παρουσίασε μία πιο σύγχρονη γενίκευση της κατηγοριοποίησης των ηφαιστειακών σεισμών η οποία στηρίζεται στη μορφή των κυματομορφών και στο φασματικό τους περιεχόμενο. Σύμφωνα με αυτήν την κατηγοριοποίηση έχουμε τα ακόλουθα είδη ηφαιστειακών γεγονότων:

1.5.1.1 Υψίσυχνα σήματα ή ηφαιστειοτεκτονικοί σεισμοί (High frequency- HF, ή volcanotectonic-VT earthquakes)

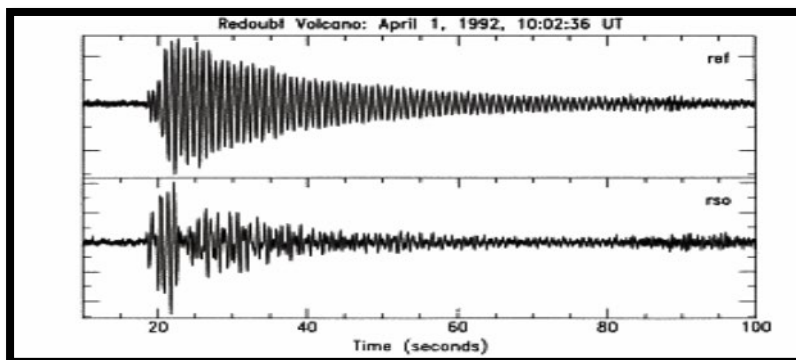
Οι σεισμοί αυτοί συνήθως συμβαίνουν στη βάση ηφαιστείων και κάτω από αυτά σε βάθος περίπου 1-20 km. Το μέγεθός τους συνήθως δεν ξεπερνά το μέγεθος των 6.0 βαθμών της κλίμακας Richter. Χαρακτηριστικό των κυματομορφών τους είναι ότι παρουσιάζουν εμφανείς και έντονες αφίξεις επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων, η ουρά τους παρουσιάζει σχεδόν εκθετική μείωση του πλάτους με την πάροδο του χρόνου ενώ οι κυρίαρχες συχνότητες που συνθέτουν τέτοιου είδους σήμα συνήθως κυμαίνονται από 5-15 Hz.



Εικόνα 6. Υψίσυχνος σεισμός μαζί με το φασματογράφημά του καταγεγραμμένος στο ηφαίστειο Μεγαρίστην Ινδονησία. Η χρωματική κλίμακα στο φασματογράφημα αντιπροσωπεύει το κανονικοποιημένο πλάτος φάσματος.

1.5.1.2 Χαμηλόσυχνα σήματα ή μεγάλης περιόδου σήματα (LF-low frequency ή LP-long period volcanic earthquakes)

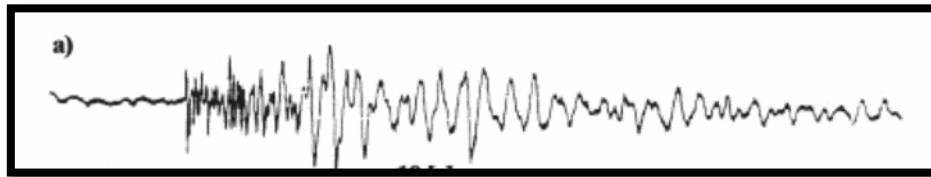
Αυτά συμβαίνουν συνήθως εντός του κρατήρα ή γύρω από αυτόν σε μια απόσταση περίπου 1 km. Το βάθος τους είναι μικρότερο εκείνου των υψίσυχνων σημάτων. Οι κυματομορφές των σημάτων αυτών χαρακτηρίζονται από όχι απότομη άφιξη διαμηκών κυμάτων, έλλειψη εγκαρσίων και από ουρά η οποία αποσβένει με αργό ρυθμό στο πέρασμα του χρόνου. Η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-5 Hz.



Εικόνα 7. Χαμηλόσυχνος ηφαιστειακός σεισμός καταγεγραμμένος σε δυο διαφορετικές περιοχές στο ηφαίστειο Redoubt στην Αλάσκα.

1.5.1.3 Υβριδικά σήματα (Hybrid events)

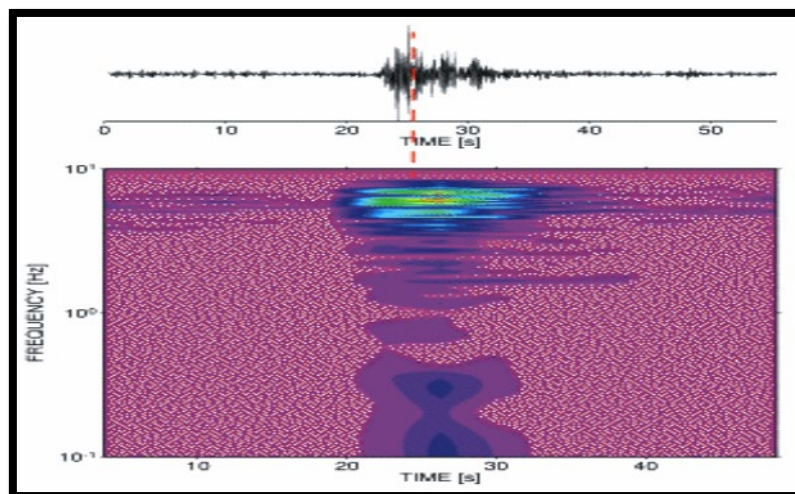
Τα ηφαιστειογενή αυτά σήματα κατά κάποιο τρόπο μοιράζονται τα κυματικά και συχνοτικά χαρακτηριστικά των υψίσυχνων και χαμηλόσυχνων ηφαιστειακών σεισμών. Επειδή αυτό μπορεί να αντικατοπτρίζει μία πιθανή ανάμιξη των διαδικασιών γένεσής τους για αυτό και ονομάζονται υβριδικά σήματα. Για παράδειγμα ένας ηφαιστειοτεκτονικός σεισμός κατά τη γένεσή του μπορεί να ενεργοποιήσει ένα χαμηλόσυχο σήμα.



Εικόνα 8. Υβριδικό σήμα που καταγράφηκε στο ηφαίστειο Redoubt 8 Κτμακριά από τον κρατήρα.

1.5.1.4 Χαμηλόσυχνα σήματα εκρήξεων ή σεισμοί έκρηξης (Explosion earthquakes)

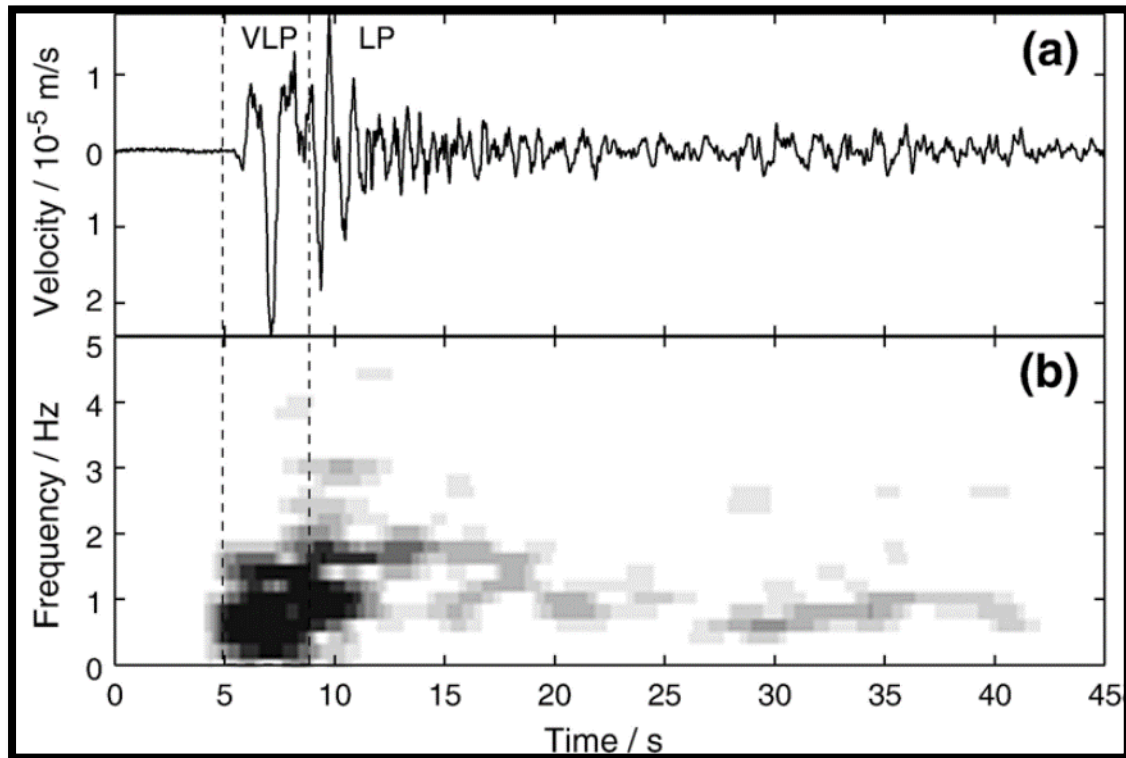
Είναι σεισμοί που συνοδεύουν μεμονωμένες εκρηκτικές δράσεις ενός ηφαιστίου και πολλοί χαρακτηρίζονται από την παρουσία ενός κρουστικού κύματος στο σεισμόγραμμα.



Εικόνα 9. Ένας σεισμός έκρηξης που καταγράφηκε στο ηφαίστειο Stromboli στην Ιταλία. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή υποδηλώνει την άφιξη του κρουστικού κύματος στα 5 Hz.

1.5.1.5 Πολύ μεγάλης περιόδου σεισμοί (VLP-very long period events)

Η εκτεταμένη χρήση των ευρέου φάσματος σεισμομέτρων από την περασμένη δεκαετία έχει δημιουργήσει ένα σύνολο νέων δεδομένων από πολύ μεγάλης περιόδου σήματα. Αυτά τα σήματα έχουν περιόδους που κυμαίνονται από 2 έως 100sec ή και περισσότερο.



Εικόνα 10. α)Σεισμός VLPπου καταγράφηκε στο ηφαίστειο Κατοραχίτου Εκουαδόρ. β)Το φασματογράφημα του παραπάνω σεισμού.

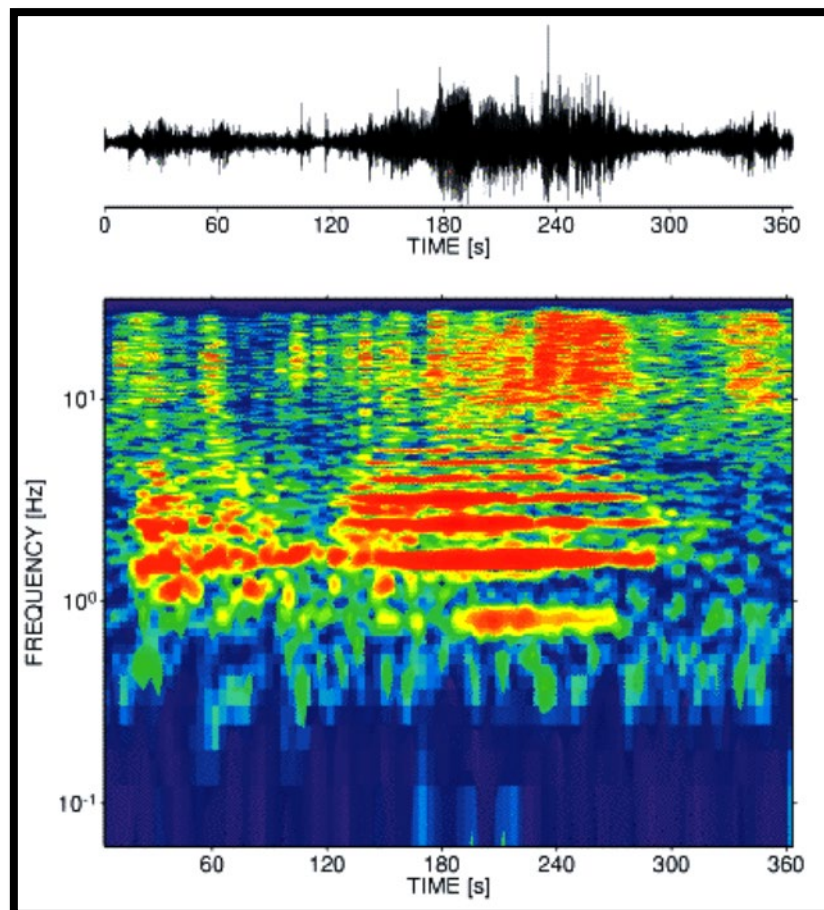
1.5.1.6 Ηφαιστειακές δονήσεις (Volcanic tremors)

Η ηφαιστειακή δόνηση είναι ένα ημι-συνεχές ή συνεχές σήμα, διάρκειας από μερικά δευτερόλεπτα ως μερικές μέρες ή και περισσότερο. Σε πολλές κατηγοριοποιήσεις ηφαιστειακών σημάτων που έχουν γίνει (Minakami 1960, Latter 1979) ο όρος ηφαιστειακή δόνηση χρησιμοποιείται για να περιγράψει σήματα δονήσεων με μεταβλητό πλάτος και διάρκεια.

Όρος	Πεδίο	Περιγραφή	Παράδειγμα
Αρμονική (harmonic)	Συχνότητας/ Χρόνου	Πολλαπλές κορυφές στο φάσμα με μία θεμελιώδη συχνότητα και τις αρμονικές της	Βουνό Semeru Schindwein et al., 1995
Μονοχρωματική (monochromatic)	Συχνότητας/ Χρόνου	Φάσμα που αποτελείται από ένα μόνο οξύ μέγιστο σε μία στενή ζώνη συχνοτήτων.	Ηφαίστειο Ruapehu Hurst, 1992.
Μη αρμονική (non-harmonic)	Συχνότητας	Τυχαία κατανομή μεγίστων συχνοτήτας	Sherburn et al., 1998
Ζωνοειδής δόνηση (Banded tremor)	Χρόνου	Ξεσπάσματα ηφαιστειακών δονήσεων που χωρίζονται από περιόδους αδράνειας, για αυτό και μοιάζουν με μπάντες στο σεισμόγραμμα.	McNutt, 1996
Σπασμωδική (spasmodic tremor)	Χρόνου	Συνεχόμενες δονήσεις με διακυμάνσεις πλάτους που πιθανόν εξαρτώνται από τη ροή μάγματος.	Ηφαίστειο Krafla, Brandsdottir and Einarsson, 1992.

Πίνακας 1. Περιγραφή ηφαιστειακών δονήσεων στο πεδίο χρόνου και συχνοτήτων.

Η πλειοψηφία των κυματομορφών των ηφαιστειακών δονήσεων δεν έχουν σαφή πρώτη άφιξη.



Εικόνα 11. Αρμονική ηφαιστειακή δόνηση καταγεγραμμένη στο ηφαίστειο Semeru στην Ινδονησία. Μπορούν να διακριθούν έως 6 αρμονικές αρχίζοντας από την κυρίαρχη συχνότητα στο 1 Hz περίπου.

Τέλος, στο πεδίο συχνοτήτων, οι ηφαιστειακές δονήσεις κυμαίνονται από 0.5 έως 7Hz.

1.6 Επίπεδα Συναγερμού Ηφαιστειών

Σύμφωνα με το USGS υπάρχουν 4 επίπεδα συναγερμού των ηφαιστειών. Το πράσινο, το κίτρινο, το πορτοκαλί και το κόκκινο επίπεδο.

Το πράσινο δηλώνει ότι το ηφαίστειο βρίσκεται σε κανονική, μη εκρηκτική κατάσταση ή ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα θεωρείται ότι έχει σταματήσει και το ηφαίστειο επανήλθε στην κανονική, μη εκρηκτική του κατάσταση βρισκόμενο προηγουμένως σε υψηλότερο επίπεδο συναγερμού.

Το κίτρινο δηλώνει ότι το ηφαίστειο εμφανίζει αυξημένη δραστηριότητα πάνω από τα φυσιολογικά επίπεδα ή ότι η ηφαιστειακή δραστηριότητα έχει μειωθεί σημαντικά, αλλά συνεχίζει να παρακολουθείται στενά για πιθανή νέα αύξηση της δραστηριότητας του βρισκόμενο προηγουμένως σε υψηλότερο επίπεδο συναγερμού.

Το πορτοκαλί δηλώνει ότι το ηφαίστειο παρουσιάζει αυξημένη δραστηριότητα με αυξημένη πιθανότητα έκρηξης ή ότι η ηφαιστειακή έκρηξη βρίσκεται σε εξέλιξη χωρίς ή με μικρή εκπομπή τέφρας.

Το κόκκινο δηλώνει ότι προβλέπεται ηφαιστειακή έκρηξη με πιθανή σημαντική εκπομπή τέφρας στην ατμόσφαιρα ή ότι η έκρηξη βρίσκεται σε εξέλιξη με σημαντική εκπομπή τέφρας στην ατμόσφαιρα.

Κεφάλαιο 2^ο: Ηφαίστειο Piton de la Fournaise

2.1 Γεωλογία και Ηφαιστειακή Δραστηριότητα

Το ηφαίστειο με το οποίο θα ασχοληθεί η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία είναι το Piton de la Fournaise ,που βρίσκεται στο Γαλλικό νησί Reunion στον δυτικό Ινδικό Ωκεανό και ανατολικά της νήσου Madagascar, στην Αφρικανική Τεκτονική πλάκα, που αποτελείται από Ωκεάνιο φλοιό.



Εικόνα 12. Το ηφαίστειο Piton de la Fournaise στον Παγκόσμιο χάρτη (Πηγή: GoogleMaps).



Εικόνα 13. Το ηφαίστειο Piton de la Fournaise στην νήσο Reunion (Πηγή: GoogleMaps).

Το Piton de la Fournaise είναι ένα Ασπιδόμορφο ηφαίστειο και αποτελεί ένα από τα πιο ενεργά ηφαίστεια στον πλανήτη. Αποτελείται κυρίως από βασάλτη και

τραχυβασάλτη και βρίσκεται σε υψόμετρο 2.632m. Η εκρηκτική δραστηριότητά του υπολογίζεται σε πάνω από 530.000 χρόνια. Αποτελείται από τρεις καλδές που σχηματίστηκαν πριν από 250.000, 65.000 και λιγότερο από 5.000 χρόνια αντίστοιχα μετά την προοδευτική καθίζηση του ηφαιστείου προς τα ανατολικά. Πολλοί πυροκλαστικοί κώνοι εντοπίζονται στην βάση των καλδέρων και των εξωτερικών πλευρών τους. Οι πιο ιστορικές εκρήξεις προέρχονται από τον κρατήρα Dolomieu που βρίσκεται εντός της νεότερης καλδέρας με πλάτος 8 Km.



Εικόνα 14. Κρατήρας Dolomieu εντός της νεότερης καλδέρας (Πηγή: Google Earth).



Εικόνα 15. Κρατήρας Dolomieu (Πηγή: Google Earth - Damour Nicolas Antonn).

Έχουν συμβεί πάνω από 150 εκρήξεις από τον 17^ο αιώνα και έπειτα, οι περισσότερες από τις οποίες παρήγαγαν ροές βασαλτικής λάβας. Μόνο έξι από αυτές, το 1708, το 1774, το 1776, το 1800, το 1977, και το 1986 προέρχονταν από ρωγμές στις εξωτερικές πλευρές της καλδέρας.

StartDate	StopDate	EruptionCertainty	Evidence	ActivityAreaorUnit
2020 Feb 10	2020 Apr 6	Confirmed	HistoricalObservations	
2019 Jun 11	2019 Oct 27	Confirmed	HistoricalObservations	
2019 Feb 18	2019 Mar 10	Confirmed	HistoricalObservations	
2018 Apr 3	2018 Nov 1	Confirmed	HistoricalObservations	
2017 Jul 14	2017 Aug 28	Confirmed	HistoricalObservations	
2017 Jan 31	2017 Feb 27	Confirmed	HistoricalObservations	
2016 Sep 11	2016 Sep 18	Confirmed	HistoricalObservations	
2016 May 26	2016 May 27	Confirmed	HistoricalObservations	ChâteauFortcrater
2015 Feb 4	2015 Oct 31	Confirmed	HistoricalObservations	
2014 Jun 21	2014 Jun 21	Confirmed	HistoricalObservations	EnclosFouquet
2010 Oct 14	2010 Dec 10	Confirmed	HistoricalObservations	2.5 km SE and 1 km NW of Dolomieu
2009 Nov 5	2010 Jan 12	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu crater and east flank
2008 Sep 21	2009 Feb 4	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu crater
2006 Jul 20	2007 May 1	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, S, E, and SE flanks
2005 Oct 4	2006 Jan 18	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, N and NE flanks
2005 Feb 17	2005 Feb 26	Confirmed	HistoricalObservations	North side of caldera (1600, 1200, & 450 m)
2004 May 2	2004 Oct 16	Confirmed	HistoricalObservations	SSW of Bory, Dolomieu and east flank
2003 May 30	2004 Jan 10	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, Bory, N, NW, and SSW flanks
2002 Nov 16	2002 Dec 3	Confirmed	HistoricalObservations	East flank of Dolomieu (1850-1540 m)
2002 Jan 5	2002 Jan 16	Confirmed	HistoricalObservations	NE part of l'EnclosFouquet caldera
2001 Jun 11	2001 Jul 7	Confirmed	HistoricalObservations	ESE flank (2500 m), East flank (1800-2000 m)
2001 Mar 27	2001 Apr 4	Confirmed	HistoricalObservations	South flank (below Dolomieu at ~2500 m)
2000 Jun 23	2000 Nov 13	Confirmed	HistoricalObservations	SE flank (2100-1800 m), E flank (2260-2000 m)
2000 Feb 14	2000 Mar 4	Confirmed	HistoricalObservations	North flank of Dolomieu (2490-2250 m)
1999 Jul 19	1999 Oct 23	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, E (2500-2100) & S flanks (1900 m)
1998 Mar 9	1998 Sep 20 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	N and WSW of Dolomieu, outer N flank
1992 Aug 27	1992 Sep 23	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu and upper SE flank
1991 Jul 19	1991 Jul 20	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu and upper east flank
1990 Jan 18	1990 May 8	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu and SE flank
1985 Jun 14	1988 Dec 29	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu and flanks, SE rift zone
1983 Dec 4	1984 Feb 18	Confirmed	HistoricalObservations	SSW flank of Dolomieu (2110-2300 m)
1981 Feb 3	1981 May 5	Confirmed	HistoricalObservations	Bory, SW, N & NE of Dolomieu

1979 May 28	1979 Jul 14	Confirmed	HistoricalObservations	SE, SW and N flanks, Dolomieu&Bory
1977 Oct 24	1977 Nov 17	Confirmed	HistoricalObservations	ENE flank (2050-2200 m, 1850-1920 m)
1977 Mar 24	1977 Apr 16	Confirmed	HistoricalObservations	NE and SE of Dolomieu, NE rift zone
1976 Nov 2	1976 Nov 4 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	North of Dolomieu (2250-2330 m)
1975 Nov 4	1976 Apr 6	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu and SE flank (1320-2350 m)
1973 May 10	1973 Sep 5 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu (SSW wall)
1972 Jun 9 (?)	1973 Jan 16 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	South, ENE, north and SE of Dolomieu
1966 Mar 15	1966 May 15	Confirmed	HistoricalObservations	SE flank (Cratere Maillard, 2400 m)
1964 Dec 21	1965 Feb 15	Confirmed	HistoricalObservations	East flank (1930 m)
1964 Apr 30	1964 May 8	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, upper east and NE flanks
1963 Nov 7	1963 Nov 21	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, upper east flank (2410 m)
1961 Apr 5	1961 Apr 25	Confirmed	HistoricalObservations	NE flank (east of Cratere Picard)
1960 Jan 11	1960 Mar 10	Confirmed	HistoricalObservations	Bory, southflank (2030 m)
1959 Mar 11	1959 Aug 6	Confirmed	HistoricalObservations	Bory
1958 May 30	1958 Sep 20	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu
1957 Sep 2	1957 Nov 16	Confirmed	HistoricalObservations	Bory, N of Bory, NE of Dolomieu
1955 Jul 6	1957 Mar 16	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, Bory, S, SE & ESE flanks
1954 Jan 16 ± 15 days	1954 Dec 16 ± 15 days	Confirmed	HistoricalObservations	
1953 Mar 13	1953 Jul 8	Confirmed	HistoricalObservations	South, NW & N flanks, Dolomieu, Bory
1952 May 19	1952 Jul 20	Confirmed	HistoricalObservations	NE flank near north rim (1500 m)
1951 Sep 10	1951 Sep 20	Confirmed	HistoricalObservations	
[1951 Jun 16 ± 15 days]	[Unknown]	Uncertain		North part of Grand Brule
1950 Aug 30	1950 Sep 5	Confirmed	HistoricalObservations	SE of Bory
1950 Feb 25	1950 Apr 2	Confirmed	HistoricalObservations	Southflank (2080 m)
[1949 Oct]	[Unknown]	Uncertain		
1948 Feb 14	1948 Mar 8	Confirmed	HistoricalObservations	South flank (le Chateau Fort)
1947 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, GrandBrule
1946 Jun 18	1946 Jul 5	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu crater and upper flanks
1945 Apr 15	1945 May 6	Confirmed	HistoricalObservations	SE flank near Nez Coupe du Tremblet
1944 Apr 11	1944 May 1	Confirmed	HistoricalObservations	
1943 Mar 30 (?)	1943 May 26 ± 5 days	Confirmed	HistoricalObservations	SE of Dolomieu, lower Grandes Pentes

1942 Oct 5	1942 Oct 25	Confirmed	HistoricalObservations	Bory, rim of Dolomieu
1941 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1938 Dec 7	1939 Jan 15	Confirmed	HistoricalObservations	ESE and SW flanks, Dolomieu
1938 Jul 25	1938 Jul 29	Confirmed	HistoricalObservations	
1937 Aug 13	1937 Nov 25	Confirmed	HistoricalObservations	Bory, flanks of Bory and Dolomieu
1936 Sep	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	Near 1933 crater
1935 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1933 Jun 7	1934 Apr 1	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, upper and SE flanks
1932 Nov	1932 Nov	Confirmed	HistoricalObservations	
1931 Jan 22	1931 Aug 26 ± 5 days	Confirmed	HistoricalObservations	Summit, NE flank (Cratère Haug)
1930 May 23	1930 May 24	Confirmed	HistoricalObservations	
1929 Dec 23	1929 Dec 31	Confirmed	HistoricalObservations	
1926 Sep 18	1927 Jun 15	Confirmed	HistoricalObservations	North flank
1925 Dec 30	1926 Apr 20	Confirmed	HistoricalObservations	
1924 Sep 3	1924 Sep 13	Confirmed	HistoricalObservations	
1924 May 19	1924 May 23 (in orafter)	Confirmed	HistoricalObservations	
1921 Nov 27	1921 Dec 3	Confirmed	HistoricalObservations	
1920 Jun 28	1920 Oct 18	Confirmed	HistoricalObservations	
1917 Apr 29	1917 Apr 29	Confirmed	HistoricalObservations	NE flank (above Piton de Crac)
1915 Jul 22	1915 Nov 21	Confirmed	HistoricalObservations	Summit, N and NE of Crater Velain
1913 Jul 10	1913 Aug 3	Confirmed	HistoricalObservations	
1910 Nov 16	1910 Dec 12	Confirmed	HistoricalObservations	
1909 Apr	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	East of CratèreFaujas
[1908]	[Unknown]	Uncertain		
1907 Nov 29	1907 Dec 5 ± 4 days	Confirmed	HistoricalObservations	
1905 Feb 15	1905 Feb 16	Confirmed	HistoricalObservations	
1904 Aug 19	1904 Oct 17	Confirmed	HistoricalObservations	NE flank (above Piton de Crac)
1903 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1902 Aug 13	1902 Aug 18	Confirmed	HistoricalObservations	
1901 Jul 4	1901 Jul 6	Confirmed	HistoricalObservations	NE flank (above Piton de Crac)
1901 Feb 21	1901 Feb 25	Confirmed	HistoricalObservations	East of Dolomieu
1900 May 11	1900 May 30	Confirmed	HistoricalObservations	East of Dolomieu
1899 Feb 13	1899 Jul 18 (in orafter)	Confirmed	HistoricalObservations	
1898 Nov 26	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1898 Jan 14	1898 Jan 20	Confirmed	HistoricalObservations	
1897 Jan 5 ± 4 days	1897 Jan 24	Confirmed	HistoricalObservations	
1894 Aug	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1890 Feb	1891 Feb 4	Confirmed	HistoricalObservations	Summit, GrandesPentes

1889 Jun	1889 Aug 11 (in orafter)	Confirmed	HistoricalObservations	GrandesPentes and summit
1884 Feb 4	1884 Feb 5	Confirmed	HistoricalObservations	
[1882]	[Unknown]	Uncertain		
1878 Mar 14	1878 Mar 30	Confirmed	HistoricalObservations	
1876 Dec 11	1876 Dec 11 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	
1875 Nov 26	1875 Dec 11 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	
1874 Jun 29	1874 Nov 7 (in orafter)	Confirmed	HistoricalObservations	
1874 Feb 1 ± 30 days	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
[1872 Feb 1 ± 30 days]	[Unknown]	Uncertain		
1871 Jun 21	1871 Jul 5	Confirmed	HistoricalObservations	
[1870 Feb 1 ± 30 days]	[Unknown]	Uncertain		
1869 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1868 Mar	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1865 Feb 5	1865 Feb 10	Confirmed	HistoricalObservations	
1863 Dec 20	1864 Jan 29	Confirmed	HistoricalObservations	
1861 Mar 19	1861 Mar 19	Confirmed	HistoricalObservations	Brulant
1860 Jan 22	1860 Mar 20	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu and l'Enclos
1859 May 8	1859 May 23 (in orafter)	Confirmed	HistoricalObservations	
1858 Nov 3	1859 Jan	Confirmed	HistoricalObservations	
1852	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	Brulant
1851	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	Brulant, l'EnclosVelain
1850 Nov 3	1850 Nov 12	Confirmed	HistoricalObservations	
1849	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1848	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1847	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1846	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1845	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1844 Dec	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1844 Mar 19	1844 May 11	Confirmed	HistoricalObservations	Summit and Piton de Crac
1843	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1842 Apr	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1832 Mar	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	L'Enclos and NE rift zone
1830 Oct	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	CratereFaujas
1824 Dec	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1824 Feb	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1821 Feb 27	1821 Apr 10	Confirmed	HistoricalObservations	
1820 Jan	1820 Feb	Confirmed	HistoricalObservations	NW riftzone
1817 Jan	1817 Apr	Confirmed	HistoricalObservations	
1816 Dec 15	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	

1815 Aug 15	1815 Aug 16	Confirmed	HistoricalObservations	Summit and Plaine des Osmondes
1815 Jan 21	1815 Jan 27	Confirmed	HistoricalObservations	
1814 Sep 10	1814 Oct 13	Confirmed	HistoricalObservations	
1813 Sep 26	1813 Nov 26	Confirmed	HistoricalObservations	
1812 Aug 5 ± 4 days	1812 Dec	Confirmed	HistoricalObservations	Summit and above Piton de Crac
1810 Nov 20	1810 Nov 28	Confirmed	HistoricalObservations	
1809 Jul 17	1809 Aug 8	Confirmed	HistoricalObservations	
1807 Mar 23	1807 Jun 13	Confirmed	HistoricalObservations	
1802 Dec	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1801 Oct 27	1802 Apr 28 ± 7 days	Confirmed	HistoricalObservations	MammelonCentral
1800 Nov 2	1800 Nov 8	Confirmed	HistoricalObservations	SE riftzone
1797 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1795	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1794 Jan	1794 Jan	Confirmed	HistoricalObservations	
1792 Dec 19 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1791 Jun 5 ± 4 days	1791 Jul 27 (?)	Confirmed	HistoricalObservations	Dolomieu, MamelonCentral ?
1789 Jun	1789 Jul	Confirmed	HistoricalObservations	East side of summit cone and Bory crater
1787 Jun 14	1787 Aug 1	Confirmed	HistoricalObservations	Bory
1786 Jun 5 (?)	1786 Aug 4 (in orafter)	Confirmed	HistoricalObservations	
1784	1785	Confirmed	HistoricalObservations	
1776	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	SE rift zone (Piton Takamaka)
1775	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	East side of summit cone
1774 Jul 2 ± 182 days	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	SE riftzone
1772 Nov 18	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1772 Feb	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1771	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1768	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	FormicaLeo
1766 Mar	1766 May 26 ± 5 days	Confirmed	HistoricalObservations	
1760 Dec 15	1760 Dec 29	Confirmed	HistoricalObservations	East flank
1759	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1753	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1751 Jun	1751 Jun	Confirmed	HistoricalObservations	
1734 Dec	1734 Dec	Confirmed	HistoricalObservations	
1734 Jan 1	1734 Mar 6	Confirmed	HistoricalObservations	
1733 (?)	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	L'Enclos and NE rift zone
1721 Jun	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1709	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1708 Apr	1708 Apr	Confirmed	HistoricalObservations	NE riftzone
1703 (in	1705	Confirmed	HistoricalObservations	

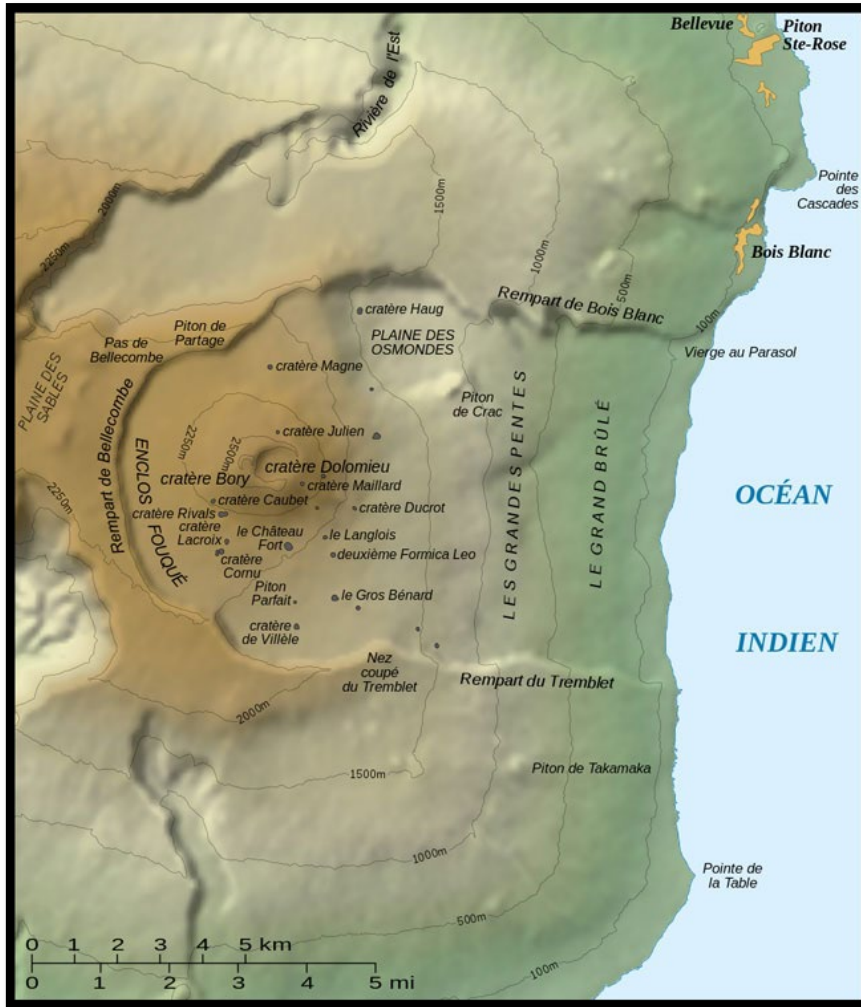
orbefore)				
1672	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1671	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1669	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1649	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1640	Unknown	Confirmed	HistoricalObservations	
1600 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	S rift zone (Piton Taye Poule)
1440 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	Upper NW flank (Petit Cratθre)
1340 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	South rift zone (Brulθ du Baril)
0960 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	Upper W flank (Piton Chisny)
0600 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	Upper NW flank (Piton Gξte)
0460 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (uncorrected)	
0120 (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	Upper NW flank (Cratθre Commerson)
1790 BCE ± 100 years	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (uncorrected)	
2700 BCE (?)	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (corrected)	BellecombeAshMember
2800 BCE ± 150 years	Unknown	Confirmed	Radiocarbon (uncorrected)	

Πίνακας 2. Έκρηκτικές περιόδοι 194ων ηφαιστειακών εκρήξεων του PitondelaFournaise κατά το Ολόκαινο (Πηγή: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020>).

2.2 Έκρηξη 4^{ης} Φεβρουαρίου 2015

Η έκρηξη της 4^{ης} Φεβρουαρίου του 2015 ξεκίνησε στις 11:00 τοπική ώρα και διήρκεσε μέχρι 22:30 τοπική ώρα της 15^{ης} Φεβρουαρίου του 2015.

Μεταξύ 4:00 και 9:00 τοπική ώρα της 4^{ης} Φεβρουαρίου καταγράφηκαν 180 σεισμοί, πέντε από τις οποίες είχαν μέγεθος μεγαλύτερο των 2 βαθμών της κλίμακας Richter. Στις 9:10 ξεκίνησε μία σεισμική κρίση και στις 10:50 ένας ηφαιστειακός θόρυβος. Δέκα λεπτά αργότερα στις 11:00 τοπική ώρα ξεκίνησε η έκρηξη από μία σχισμή στην Νότια πλευρά του ηφαιστειακού κώνου του PitondelaFournaise μέσα στην καλδέρα EnclosFouaqué.

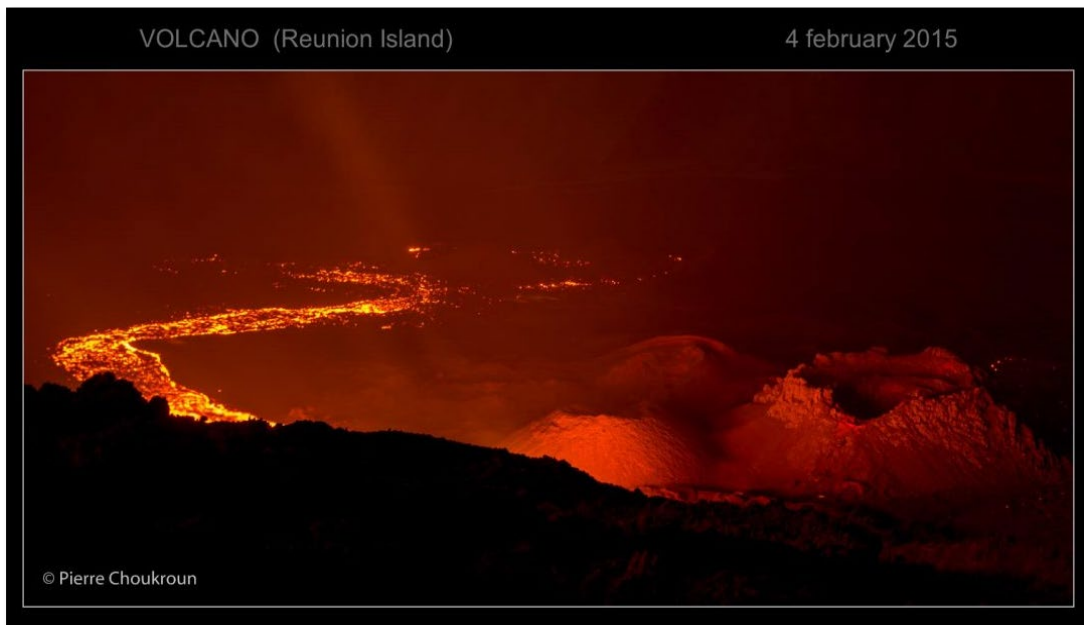


Εικόνα 16. Τοπογραφικός χάρτης του Piton de la Fournaise με τις ονομασίες κρατήρων και καλδέρων (Πηγή: https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020#bgvn_201502).



Εικόνα 17. ΚαλδέραEnclosFouqué
(Πηγή:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fournaise_rempart_Enclos_Fouqu%C3%A9.JPG).

Λόγω της έκρηξης το επίπεδο προειδοποίησης που δηλώθηκε ήταν 2-2 «εν εξελίξει έκρηξη».



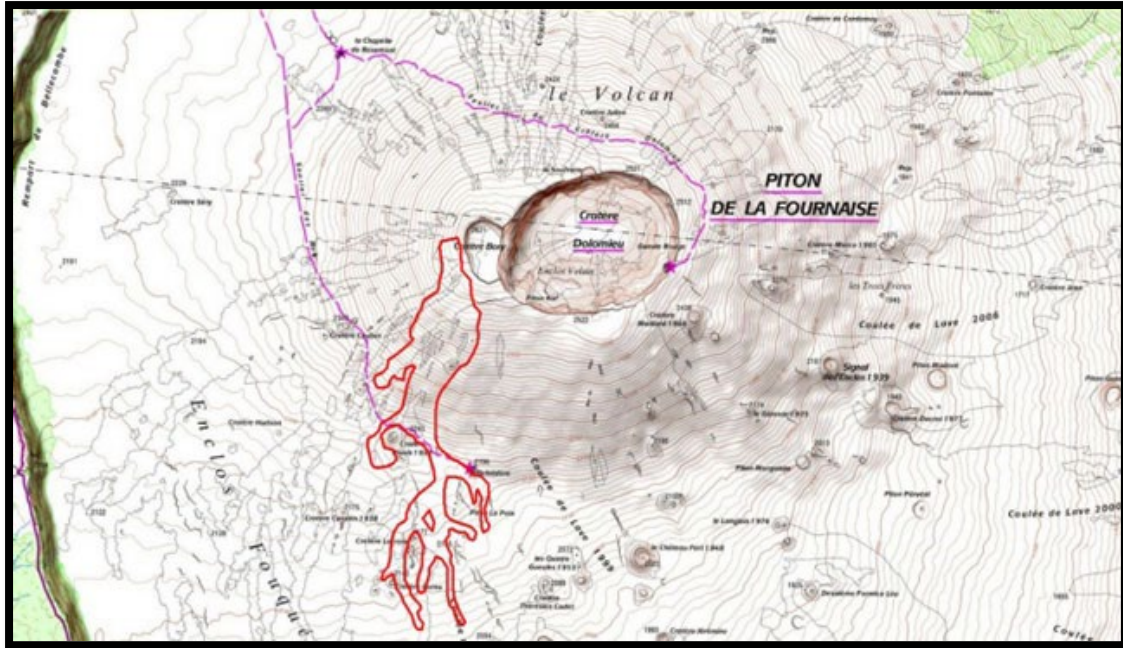
Εικόνα 18. Έκρηξη 4ης Φεβρουαρίου του 2015 (Πηγή:<https://lakazkozkoze.com/?p=31927&lang=en-Pierre-Choukroun>).



Εικόνα 19. Έκρηξη 4ης Φεβρουαρίου του 2015 (Πηγή: <https://fournaise.info/eruption-4-fevrier-2015/>).

Στις 5 Φεβρουαρίου, η έκρηξη συνεχίστηκε παρόλο που η ένταση του ηφαιστειακού θορύβου είχε μειωθεί από την έναρξή της. Επίσης, το Ηφαιστειακό Παρατηρητήριο του PitondelaFournaise ανέφερε πως η εκρηκτική σχισμή σχηματίστηκε 100 m Δυτικά του κρατήρα Bogy. Η σχισμή είχε μήκος περίπου 500 m και η δραστηριότητά της συγκεντρωνόταν στο νοτιότερο άκρο της. Η ροή λάβας που αναδύθηκε κινήθηκε προς τα Νότια-Νοτιοδυτικά, και αφού πέρασε από τον κρατήρα Rivals, χωρίστηκε σε διάφορα παρακλάδια, καθώς συνέχισε να κινείται ακόμα πιο Νότια και Νοτιοδυτικά. Ο νοτιότερος κλάδος της ροής πέρασε από τον κρατήρα Cornu. Εκείνο το βράδυ, στις 18:00 τοπική ώρα, ο ηφαιστειακός θόρυβος είχε μειωθεί σημαντικά. Η ένταση του θορύβου ήταν περίπου έξι φορές χαμηλότερη από την αρχή της έκρηξης.

Η έκρηξη συνεχίστηκε και στις 6 Φεβρουαρίου, όπου η ένταση του ηφαιστειακού θορύβου παρέμενε χαμηλά και η ροή της λάβας διατηρούταν ενεργή. Επίσης, το Ηφαιστειακό Παρατηρητήριο ανέφερε ότι κατά την διάρκεια παρατηρήσεων πεδίου, εντοπίστηκαν χαμηλά επίπεδα απελευθέρωσης αερίων. Στις 8 Φεβρουαρίου, η έκρηξη συνεχίστηκε και οι σεισμοί χαμηλού μεγέθους που βρίσκονταν στο πάνω μέρος του ηφαιστείου επανεμφανίστηκαν. Παρά τον άσχημο καιρό που επικρατούσε το Παρατηρητήριο παρατήρησε ότι η λάβα συνέχισε να ρέει από τις φλέβες και συνέχισε να ταξιδεύει προς τα Δυτικά.



Εικόνα 20. Ροή λάβας μετά την 8η Φεβρουαρίου (Πηγή: https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020#bgvn_201502).

Μέχρι τις 9 Φεβρουαρίου, δεν σημειώθηκαν σημαντικές αλλαγές και μέχρι αργά το πρωί της ίδιας μέρας, η εκρηκτική ρωγμή ήταν ασθενώς ενεργή και παρατηρήθηκαν μόνο μικρές ροές λάβας.

Η έκρηξη συνεχίστηκε με παρόμοιο τρόπο μέχρι τις 15 Φεβρουαρίου. Μεταξύ 10 και 15 Φεβρουαρίου, το Παρατηρητήριο ανέφερε ότι ο ηφαιστειακός θόρυβος παρέμεινε χαμηλός και ότι δεν υπήρχαν σημαντικές αλλαγές σε άλλες καταγεγραμμένες γεωφυσικές παραμέτρους. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος, οι κακές καιρικές συνθήκες εμπόδισαν μερικές φορές τις παρατηρήσεις.

Το πρωί της 14ης Φεβρουαρίου, το Παρατηρητήριο παρατήρησε ένα σύννεφο που υψώθηκε μεταξύ 2,8 και 3 km και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ήταν πιθανώς πλούσιο σε υδρατμούς.

Το πρωί της 15ης Φεβρουαρίου, ο ηφαιστειακός θόρυβος ήταν χαμηλός και σταθερός και ισοδύναμος με αυτό που καταγράφηκε τις προηγούμενες ημέρες. Σύμφωνα με το Παρατηρητήριο, στις 17:00 τοπική ώρα στις 15 Φεβρουαρίου, ο θόρυβος άρχισε να μειώνεται στην ένταση, ενώ στη συνέχεια υπέστη μερικές ώρες διακύμανσης στην έντασή του, πριν εξαφανιστεί στις 22:30 τοπική ώρα. Με την εξαφάνιση του θορύβου, η έκρηξη τελείωσε. Την επόμενη μέρα, στις 16 Φεβρουαρίου το επίπεδο συναγερμού είχε μειωθεί.

2.3 Σεισμολογικοί Σταθμοί

Οι σεισμολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση και εν συνεχεία την επεξεργασία των δεδομένων, ανήκουν στο «Piton de laFournaiseVolcanoObservatoryNetwork (Reunion Island)» που περιλαμβάνει 47 σεισμολογικούς σταθμούς, ήταν οι εξής:

Station Code	Station Name	Latitude	Longitude
BON	Bory Nord	-21,239710	55,709210
CSS	Enclos Sery Sud	-21,246420	55,684510
FJS	Station Sismologique de Faujas	-21,229493	55,722290
FLR	Station Sismologique de Flanc Est	-21,240742	55,732887
FOR	Station Sismologique de Chateau Fort	-21,261867	55,718708
RVL	Station Sismologique de Rivals Ouest	-21,255894	55,700522
SNE	Station Sismologique de Soufriere nord est	-21,239115	55,717900

Πίνακας 3. Σεισμολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι παραπάνω επτά σταθμοί χρησιμοποιήθηκαν, καθώς οι καταγραφές τους ήταν καλύτερες από τους υπολοίπους, αφού βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο της έκρηξης.



Εικόνα 21. Ηνήσος Reunion και οι θέσεις των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν (Πηγή: GoogleEarth).

DATE	J.DATE	DURATION
2014 7 11 311 03 47 05	03 47 30	
2014 10 11 314 02 55 20	02 56 30	
2014 15 11 319 02 43 05	02 56 00?	
2014 15 11 319 03 06 43	03 12 48	
2014 16 11 320 23 21 50	23 57 51	
2014 17 11 321 17 06 32	17 29 39	
2014 18 11 322 04 58 41	04 59 27	
2014 21 11 325 10 21 50	10 23 18	
2014 26 11 330 14 45 10	14 46 59	
2014 26 11 330 15 08 58	15 15 49	
2014 30 11 334 18 06 11	18 07 02	
2014 01 12 335 04 22 02	04 22 56	
2014 01 12 335 14 50 58	14 55 02	
2014 02 12 336 05 21 49	05 23 25	
2014 02 12 336 05 27 45	05 29 37	
2014 04 12 338 06 18 25	06 19 50	
2014 04 12 338 06 25 49	06 30 49	
2014 04 12 338 07 21 58	07 23 03	
2014 04 12 338 08 15 52	08 16 48	
2014 04 12 338 17 39 41	17 42 49	
2014 04 12 338 22 26 52	22 28 18	
2014 06 12 340 02 24 56	02 26 28	
2014 06 12 340 22 16 33	22 18 11	
2014 07 12 341 22 30 28	22 31 52	
2014 08 12 342 00 22 04	00 23 39	
2014 09 12 343 03 20 47	03 21 53	
2014 10 12 344 06 48 52	06 49 43	
2014 14 12 348 04 34 41	04 35 33	
2014 17 12 351 19 16 09	19 17 17	
2014 19 12 353 17 06 27	17 07 32	
2014 19 12 353 17 46 02	17 47 07	
2014 20 12 354 10 36 03	10 37 13	
2014 21 12 355 11 45 39	11 46 38	
2014 21 12 355 13 11 01	13 13 05	
2014 22 12 356 11 56 08	11 57 26	
2014 23 12 357 14 12 39	14 13 48	
2014 23 12 357 23 45 25	23 47 31	
2014 24 12 357 03 29 55	03 31 03	
2014 28 12 362 00 41 52	00 42 25	
2014 30 12 364 20 14 44	20 15 41	
2015 02 01 002 08 38 13	08 39 00	
2015 03 01 003 04 44 17	04 44 48	



2015 27 01 027 13 06 43	13 07 28
2015 27 01 027 13 30 04	13 30 25
2015 27 01 027 15 28 50	15 30 03
2015 28 01 028 04 13 00	04 14 03
2015 28 01 028 04 44 32	04 45 32
2015 31 01 031 11 09 00	11 09 35
2015 01 02 032 12 34 39	12 34 54
2015 01 02 032 15 42 35	15 43 05
2015 01 02 032 22 09 07	22 09 24
2015 02 02 033 06 28 19	06 29 15
2015 02 02 033 19 39 14	19 39 37
2015 03 02 034 08 25 08	08 25 24
2015 05 02 036 10 54 54	14 20 56
2015 06 02 037 19 32 02	19 32 29
2015 07 02 038 04 20 03	04 20 52
2015 07 02 038 11 35 37	12 44 58
2015 07 02 038 14 09 00	15 06 03
2015 07 02 038 22 36 44	22 37 13

Εικόνα 22. Οι θέσεις των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν πάνω στο ηφαίστειο PitondelaFournaise (Πηγή: GoogleEarth).

Κεφάλαιο 3^ο: Δεδομένα και Επεξεργασία

3.1 Ανάλυση Δεδομένων

Από τους παραπάνω σταθμούς αντλήθηκαν οι 24ωρες κυματομορφές από την 1^η Νοεμβρίου του 2014 μέχρι την 15^η Φεβρουαρίου του 2015. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός BON από όπου σημειώθηκαν οι χρόνοι άφιξης των σεισμών. Στην συνέχεια, και με βάση τους χρόνους άφιξης εντοπίστηκαν οι σεισμοί και στους υπόλοιπους 6 σταθμούς. Ακολουθώντας, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό επεξεργασίας σεισμών και εύρεσης των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων καθώς και της διάρκειας του σήματος, είχε ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό του μεγέθους του σεισμού, του βάθους της διάρρηξης και των συντεταγμένων της τοποθεσίας του.

Επίσης, για τον εντοπισμό των LF σημάτων καθώς και των Tremors χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Swarm με το οποίο επεξεργάστηκαν οι 24ωρες κυματομορφές του σταθμού BON. Εν συνεχεία, τα σήματα αυτά κατηγοριοποιήθηκαν.

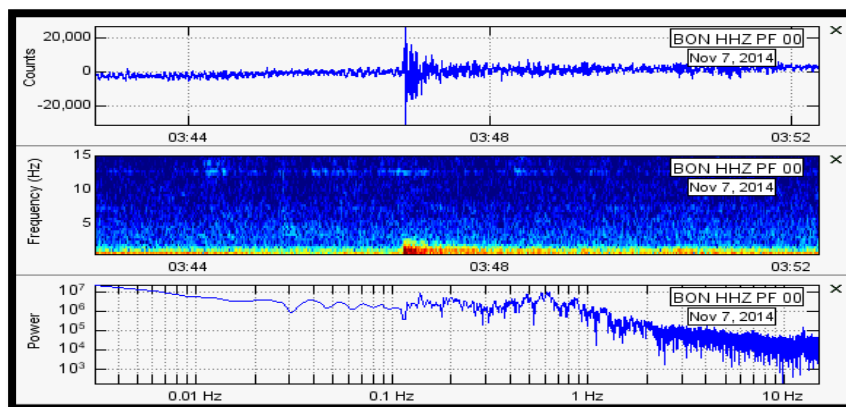
2015 05 01 005 17 29 02	17 29 24
2015 06 01 006 00 45 03	00 46 05
2015 06 01 006 02 01 19	02 02 56
2015 07 01 007 11 45 46	11 47 55
2015 08 01 008 01 25 36	01 26 56
2015 08 01 008 14 05 29	14 06 32
2015 08 01 008 16 35 14	16 36 40
2015 10 01 010 16 58 38	16 59 19
2015 12 01 012 00 32 24	00 33 22
2015 12 01 012 16 56 28	16 57 11
2015 12 01 012 23 01 04	23 01 50
2015 12 01 012 23 05 30	23 06 20
2015 14 01 014 12 52 24	12 52 48

Πίνακας 4. Πίνακας LF και Tremors σημάτων όπως εντοπίστηκαν από το Swarm.

3.1.1 Κατηγορίες LF και Tremors σημάτων

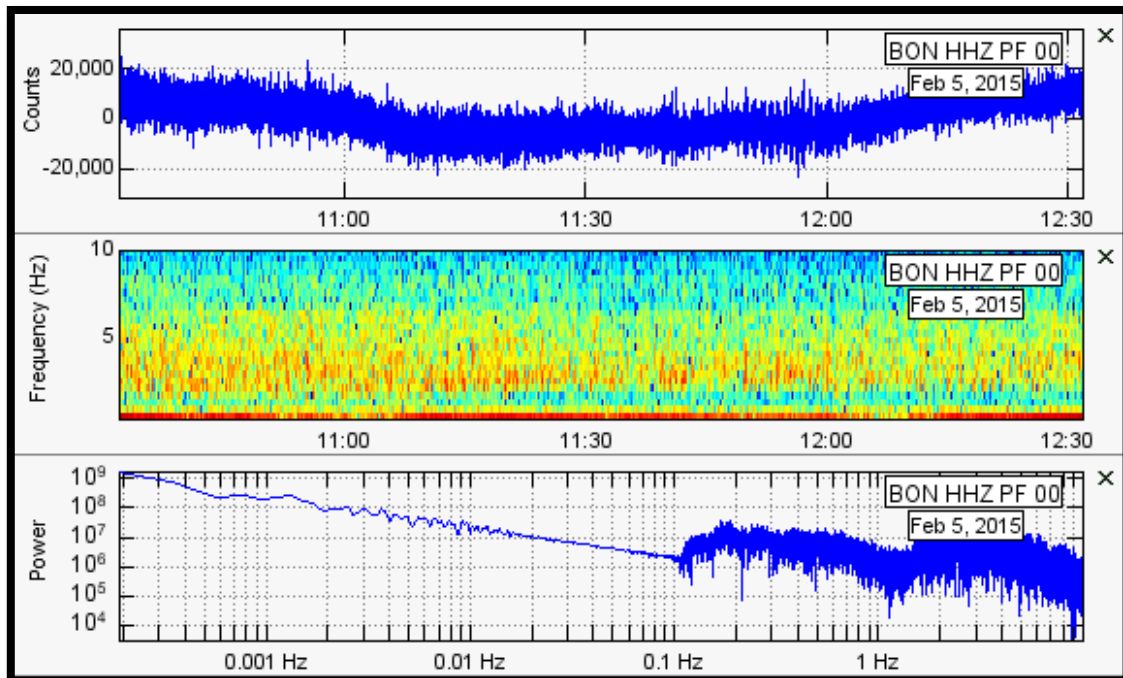
Τα LF και Tremors σήματα που εντοπίστηκαν με το Swarm κατηγοριοποιήθηκαν εν συνεχεία σε 5 κατηγορίες σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει σήματα όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2,5 Hz.



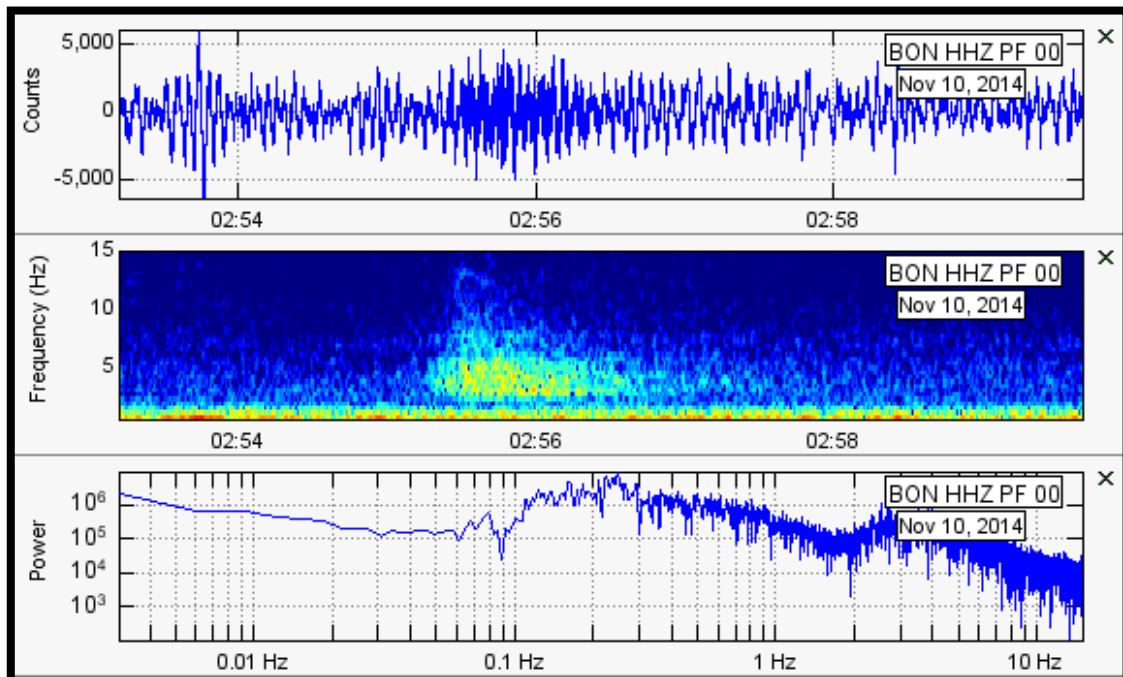
Εικόνα 23. Παράδειγμα Κατηγορίας 1(1-2,5 Hz).

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει σήματα όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2-7 Hz.



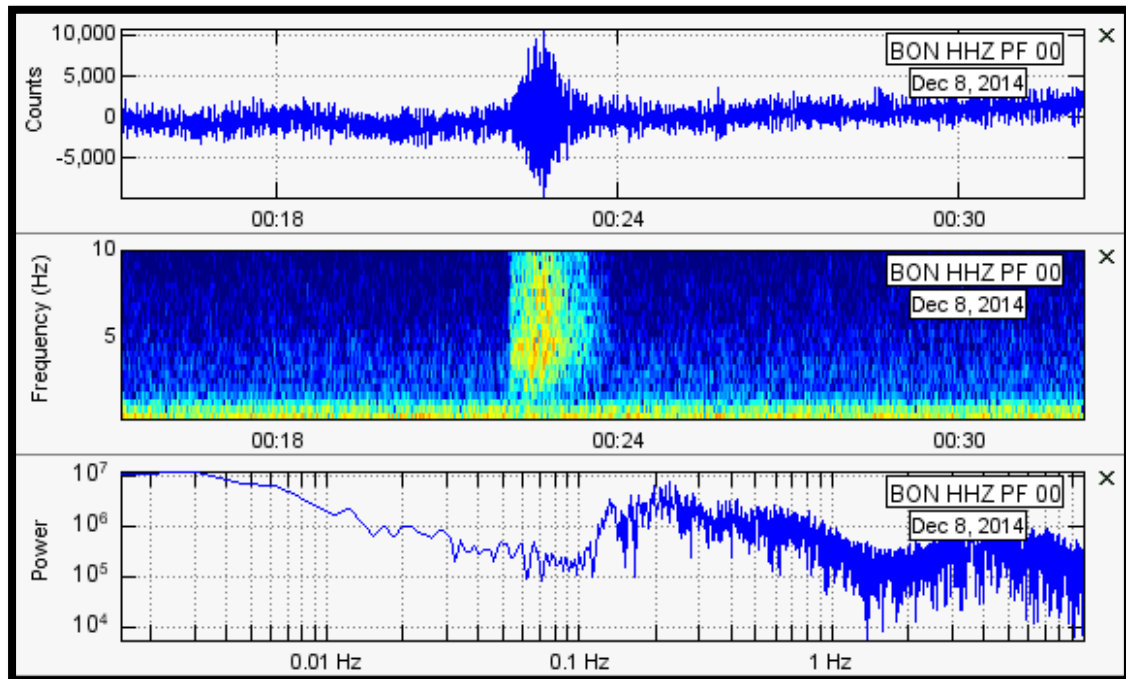
Εικόνα 24. Παράδειγμα Κατηγορίας 2(2-7 Hz).

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει σήματα όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



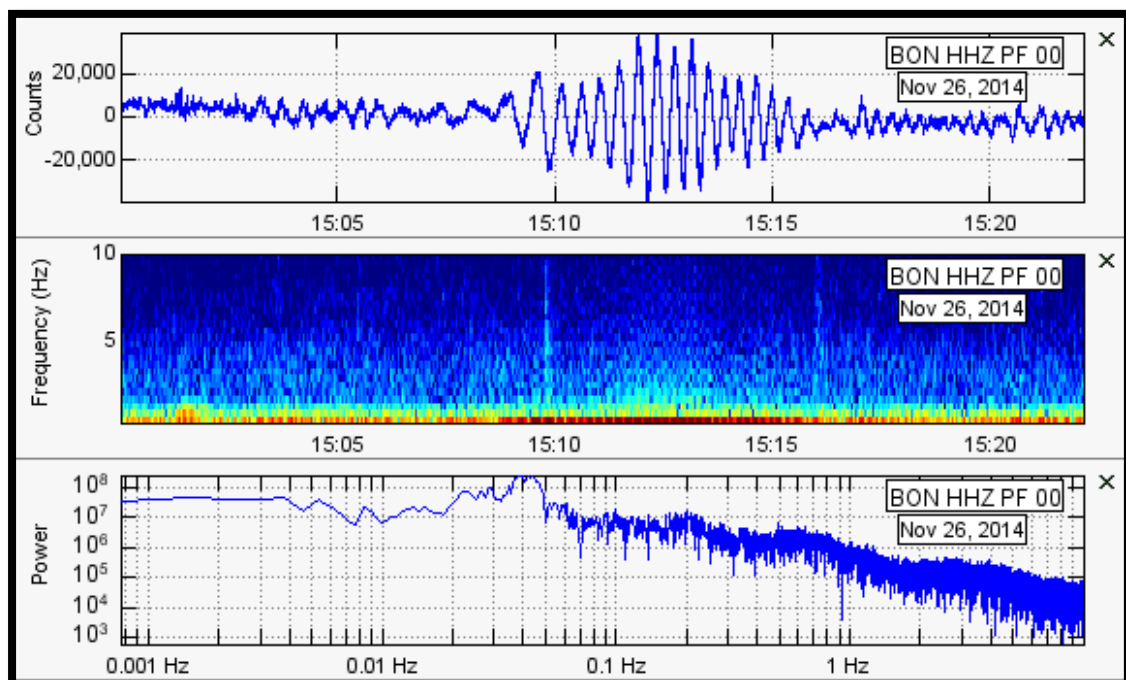
Εικόνα 25. Παράδειγμα Κατηγορίας 3(3-8 Hz).

Η τέταρτη κατηγορία περιλαμβάνει σήματα όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2 έως και πάνω από 10 Hz.



Εικόνα 26. Παράδειγμα Κατηγορίας 4(2->10 Hz).

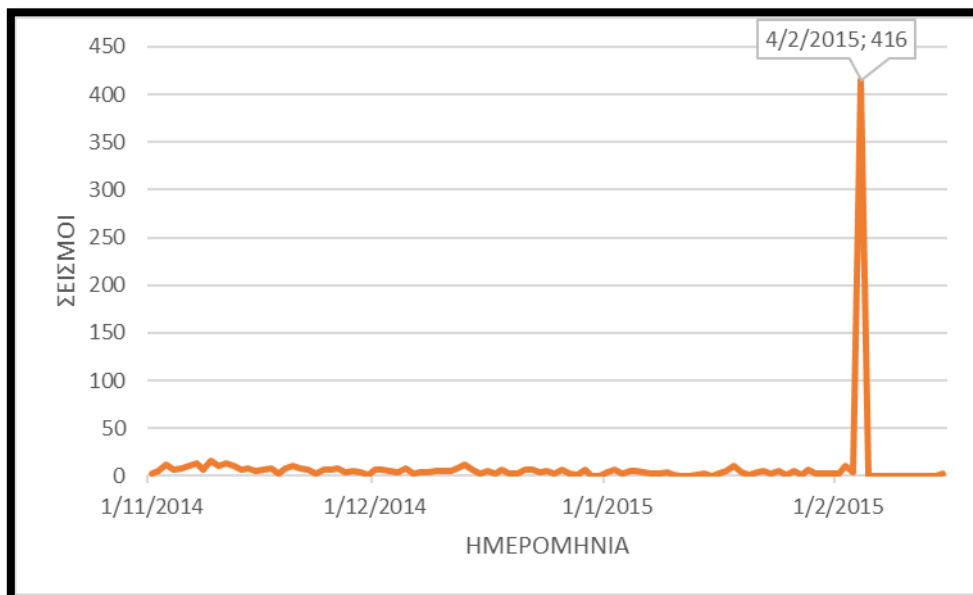
Η πέμπτη κατηγορία περιλαμβάνει σήματα όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2Hz.



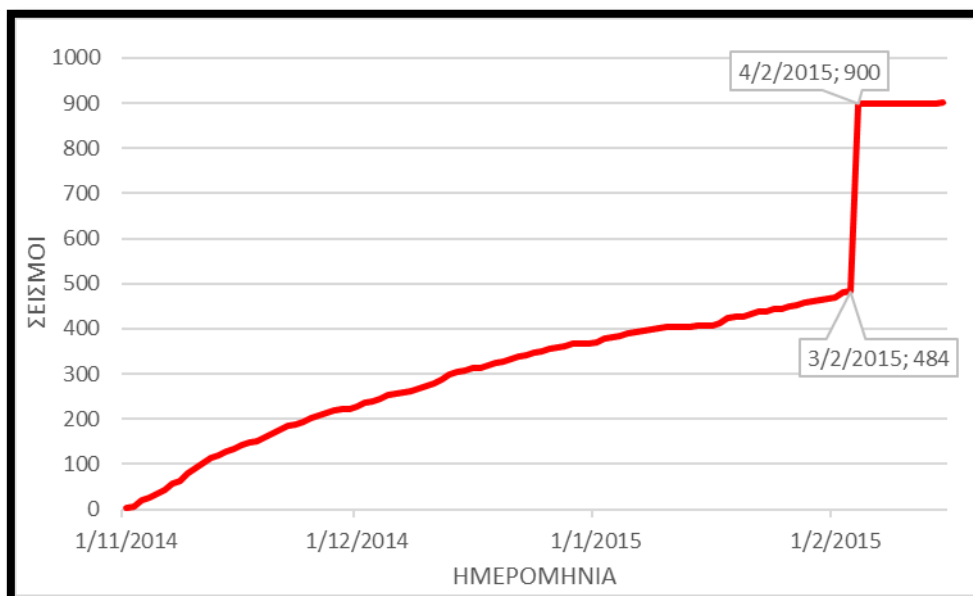
Εικόνα 27. Παράδειγμα Κατηγορίας 5(1-2 Hz).

3.1.2 Σεισμικότητα (1/11/2014-15/2/2015)

Από την 1^η Νοεμβρίου 2014 έως την 15^η Φεβρουαρίου 2015 έπειτα από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στις 24ωρες κυματομορφές εντοπίστηκαν συνολικά 903 σεισμικά γεγονότα. Από αυτά τα 416 εντοπίστηκαν την 4^η Φεβρουαρίου 2015, ημέρα της έκρηξης.

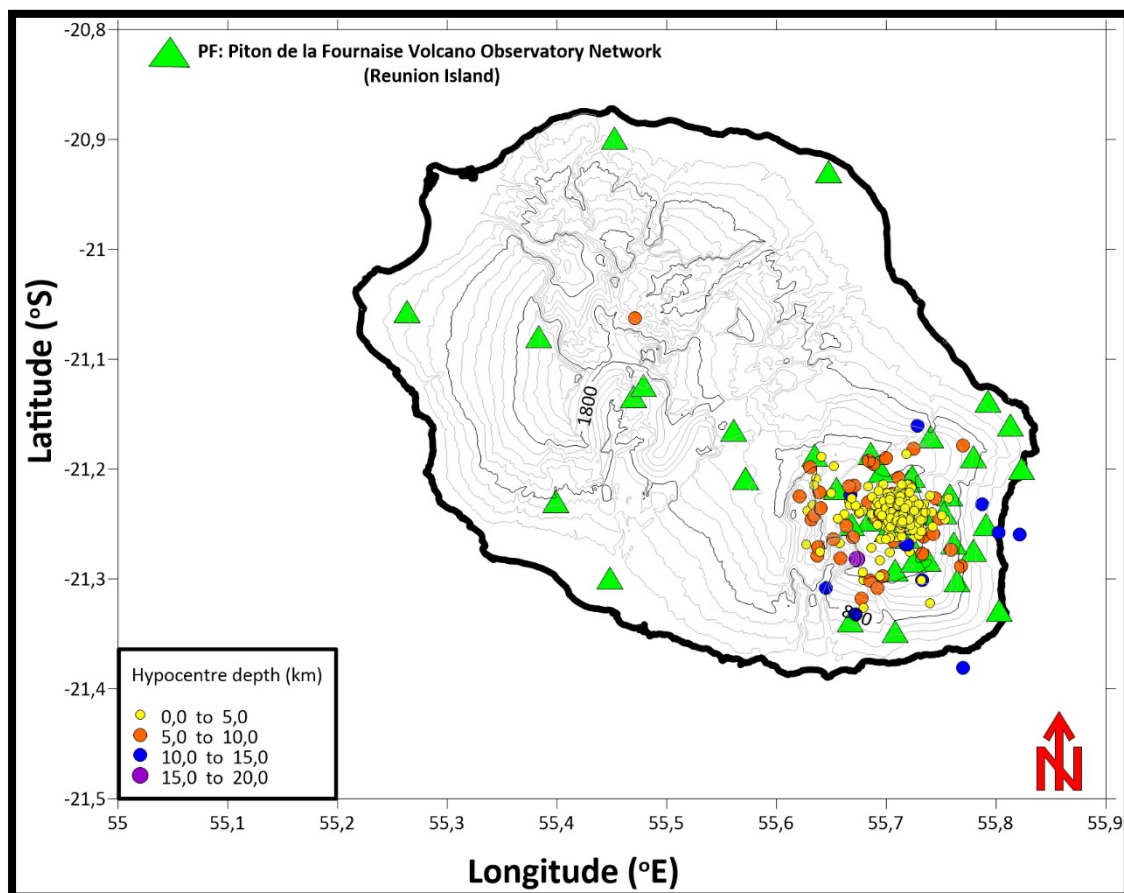


Εικόνα 28. Ημερήσια κατανομή σεισμών.

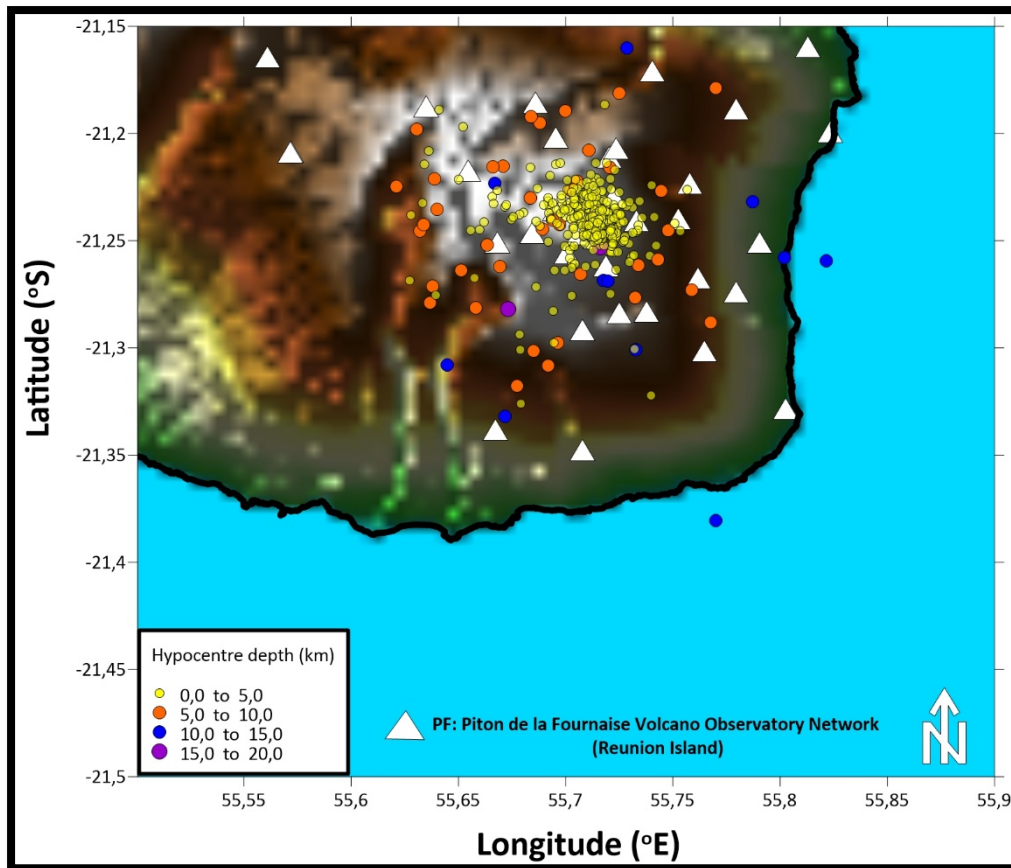


Εικόνα 29. Αθροιστική κατανομή σεισμών.

Λόγω του θορύβου που εμφανιζόταν στις 24ωρες κυματομορφές την ημέρα της έκρηξης δεν ήταν δυνατή η ανάλυση των σεισμών αυτών. Έτσι η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στους υπόλοιπους 487. Από την ανάλυση προέκυψαν το βάθος, το μέγεθος, και οι συντεταγμένες δηλαδή, η θέση του κάθε σεισμού που αποτυπώνονται στους παρακάτω χάρτες.

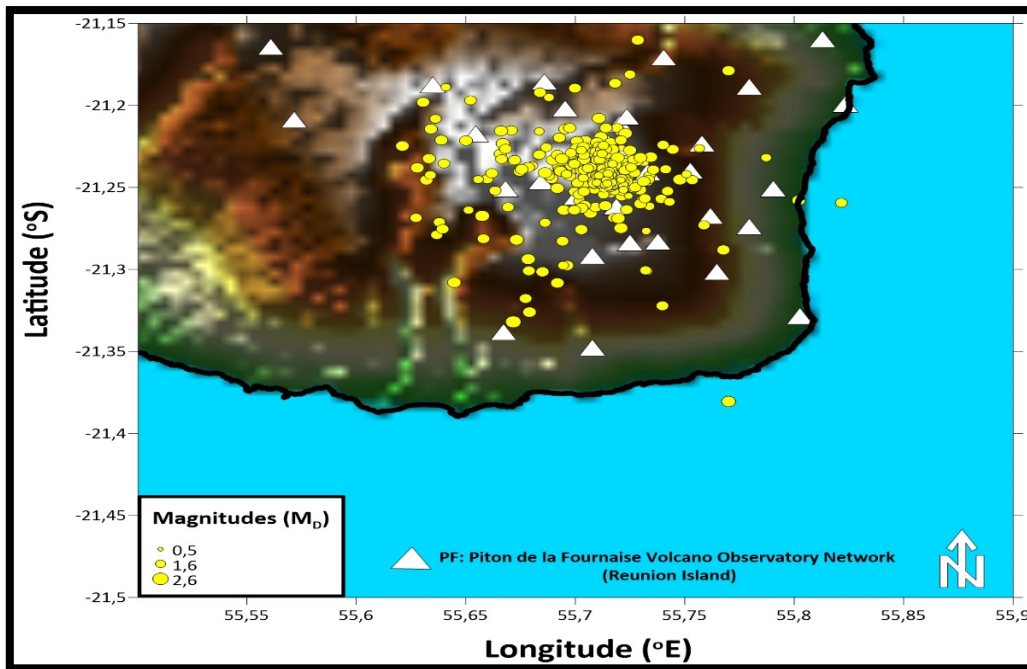


Χάρτης 1. Οι θέσεις και το υποκεντρικό βάθος των σεισμών έπειτα από την ανάλυση στο νησί Reunion.



Χάρτης 2. Οι θέσεις και το υποκεντρικό βάθος των σεισμών έπειτα από την ανάλυση στο νησί Reunion, στο ηφαιστείο Piton de la Fournaise.

Από τους παραπάνω χάρτες φαίνεται ότι το βάθος των σεισμών αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από τον κρατήρα του ηφαιστείου, γεγονός που οφείλεται στην κίνηση του μάγματος πριν την έκρηξη. Αυτό, καθώς ανεβαίνει προς τα πάνω οδηγεί στην εκδήλωση σεισμών μειούμενου βάθους. Έτσι, τα μικρότερα βάθη (0-5Km) εντοπίζονται εντός του κρατήρα του ηφαιστείου.



Χάρτης 3. Οι θέσεις και το μέγεθος των σεισμών έπειτα από την ανάλυση στο νησί Reunion, στο ηφαίστειο Piton de laFournaise.

Από τον Χάρτη 3 προκύπτει ότι το μέγεθος των σεισμών δεν υπερβαίνει τα 3 Richter και η πλειονότητά τους εντοπίζεται εντός του κρατήρα.

Επίσης, σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως η κλίμακα μεγέθους των σεισμών που υπολογίστηκε είναι το M_d ή μέγεθος χρονικής διάρκειας. Η κλίμακα κυρίως εφαρμόζεται για να υπολογίσουμε από τοπικά δίκτυα το μέγεθος και βασίζεται στη γενικευμένη σχέση:

$$M_{\tau} = a_1 + a_2 \log \tau + a_3 (\log \tau)^2 + a_4 \Delta$$

Εξίσωση 1. Εξίσωση υπολογισμού μεγέθους χρονικής διάρκειας M_d .

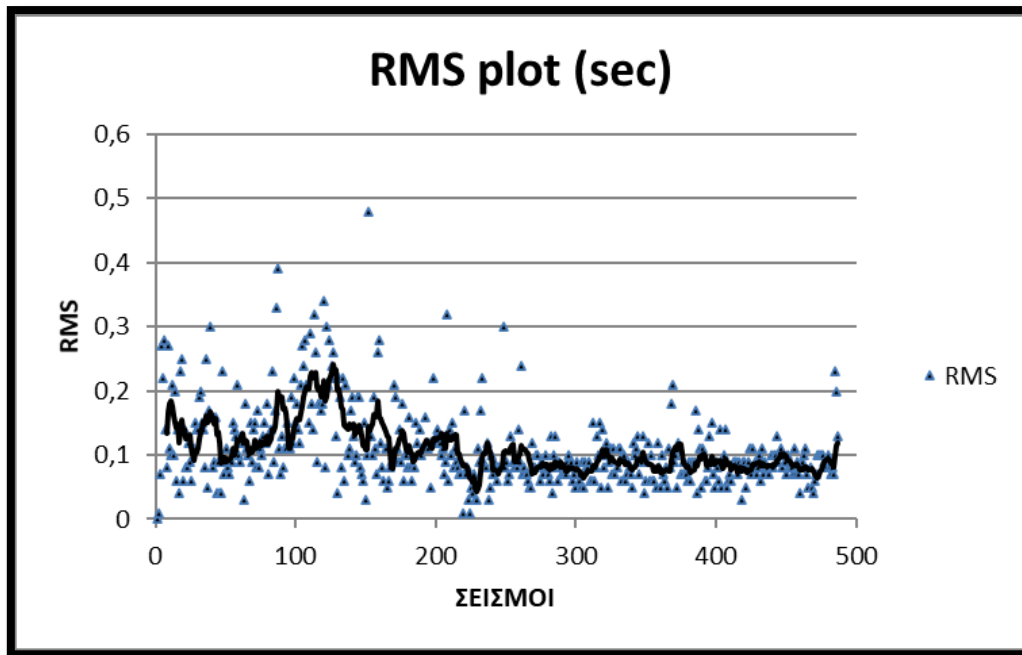
,όπου $\tau (=d)$ είναι η διάρκεια του σήματος σε sec, Δ είναι η επικεντρική απόσταση σε Km, και a_1, a_2, a_3, a_4 σταθερές και συνήθως είναι $a_3=0$

Η ανάλυση συνεχίστηκε με τον υπολογισμό της ποσότητας RMS (RootMeanSquare), δηλαδή η μέση τετραγωνική τιμή του λάθους του χρόνου διάδοσης των κυμάτων σε δευτερόλεπτα.

$$RMS = \sqrt{\sum_i R_i^2 / NO}$$

Εξίσωση 2. Εξίσωση RMS

,όπου R_i είναι ο τοπικός χρόνος για κάθε σταθμό.



Εικόνα 30. RMS ανά σεισμικό γεγονός.

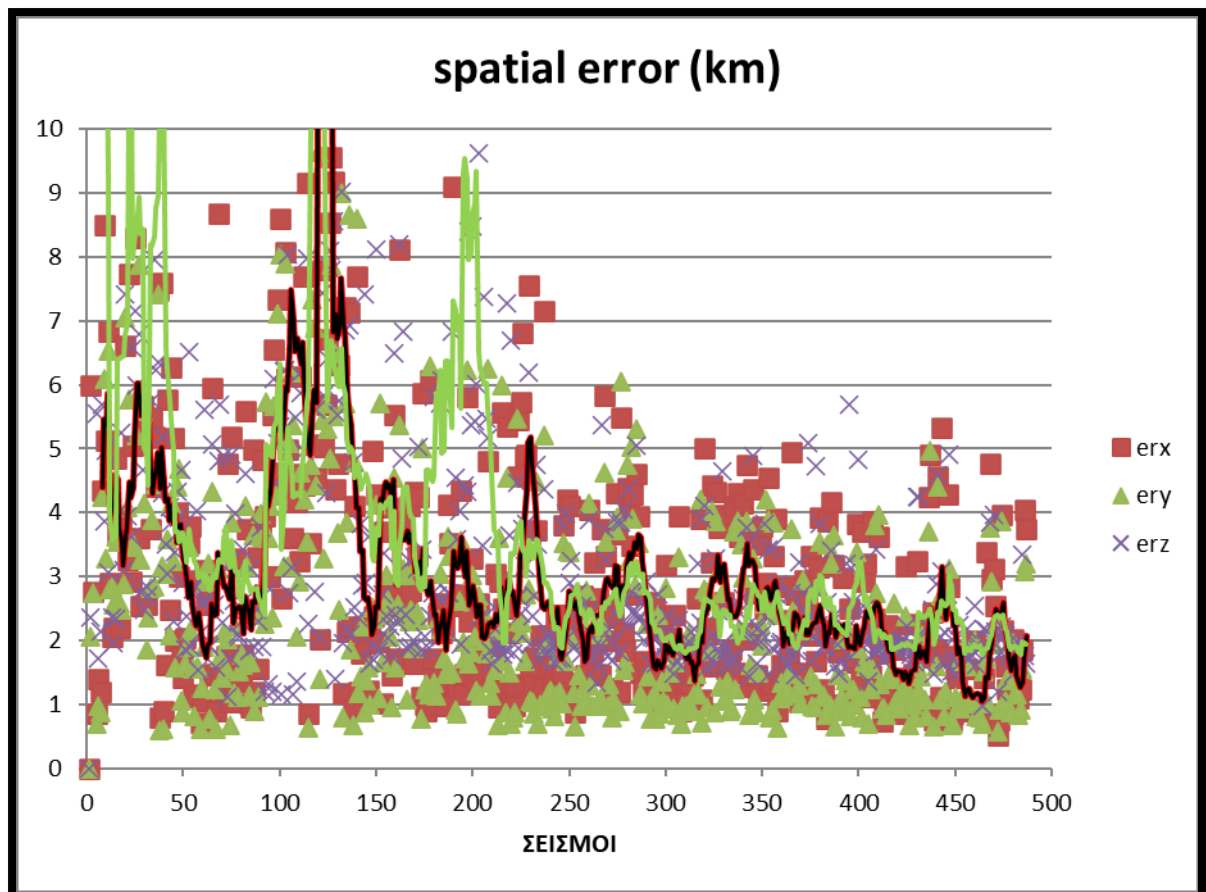
Από την εικόνα 30 είναι διακριτό ότι οι τιμές RMS στην πλειονότητα τους είναι κοντά στο 0,1 ($RMS_{\text{mean}}=0,11$), επομένως τα αποτελέσματά είχαν πολύ μικρό ποσοστό λάθους και έτσι είχαμε καλή ποιότητα των αφίξεων.

Εν συνεχεία, υπολογίστηκε το ERH, δηλαδή το οριζόντιο λάθος θέσης του επικέντρου σε χιλιόμετρα.

$$ERH = \sqrt{SDX^2 + SDY^2}$$

Εξίσωση 3. Εξίσωση υπολογισμού ERH.

,όπου $SDX(=ERX)$ και $SDY(=ERY)$ είναι το τυπικό λάθος στο γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος, αντίστοιχα του επικέντρου. Επίσης, υπολογίστηκε και το ERZ ,δηλαδή το σφάλμα του εστιακού βάθους σε Km.

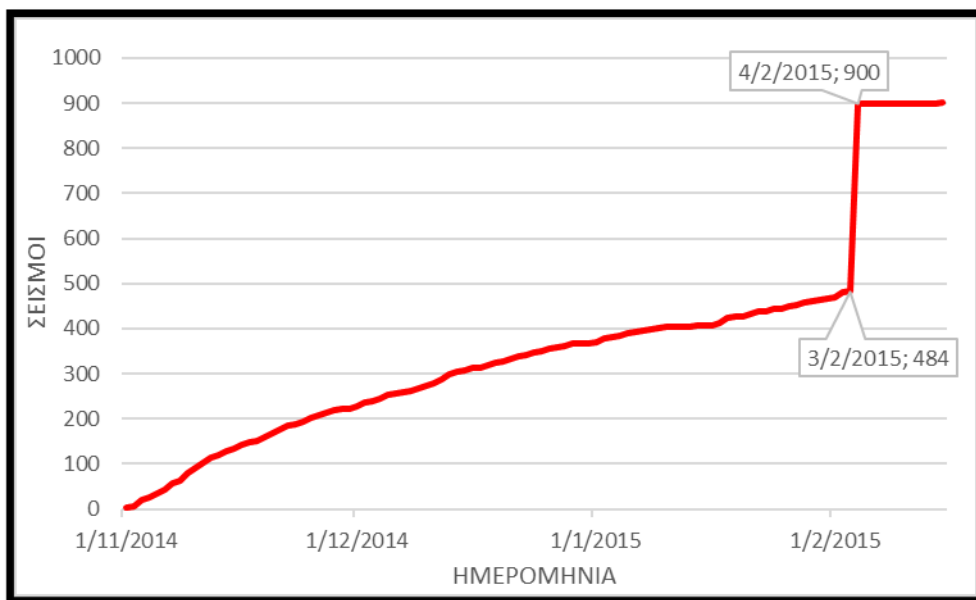


Εικόνα 31. Σφάλματα ανά σεισμικό γεγονός.

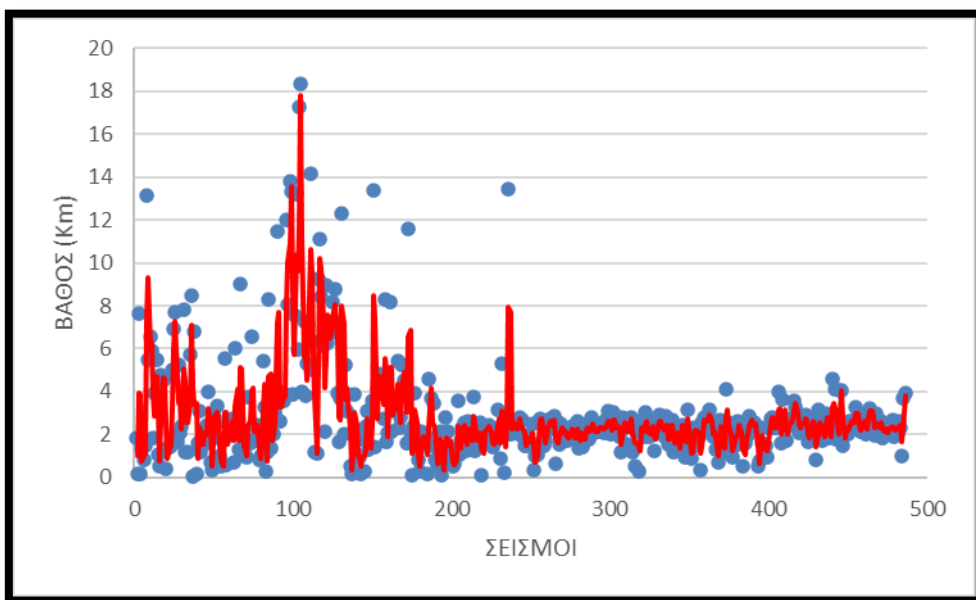
Τόσο οι τιμές ERH ($ERX_{\text{mean}}=3,08$, $ERY_{\text{mean}}=2,46$) όσο και οι τιμές ERZ ($ERZ_{\text{mean}}=3,77$) όπως διακρίνεται και από την εικόνα 31 είναι αρκετά μικρές έτσι, τόσο το οριζόντιο σφάλμα της θέσης του επικέντρου όσο και το σφάλμα βάθους ήταν πολύ μικρό με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματική θέση του σεισμού και του βάθους του.

Κεφάλαιο 4ο: Συμπεράσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω η ανάλυση της σεισμικότητας έλαβε χώρα σε 486 σεισμικάγεγονότα ,από την 1/11/2014 έως τις 15/02/2015, από τα 903 συνολικά, από τα οποία εξήχθη τα παρακάτω συμπεράσματα.

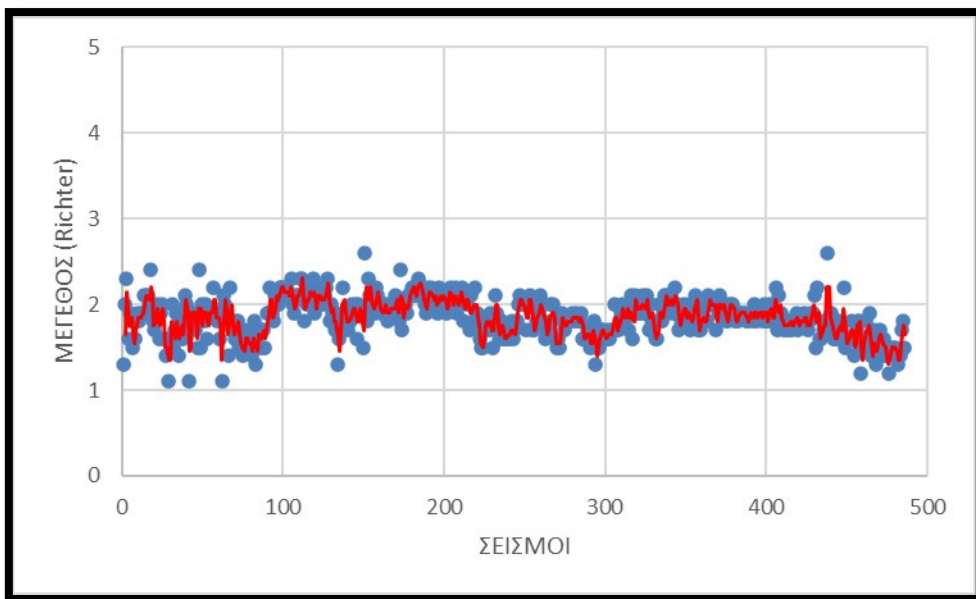


Εικόνα 32. Αθροιστική κατανομή σεισμών.



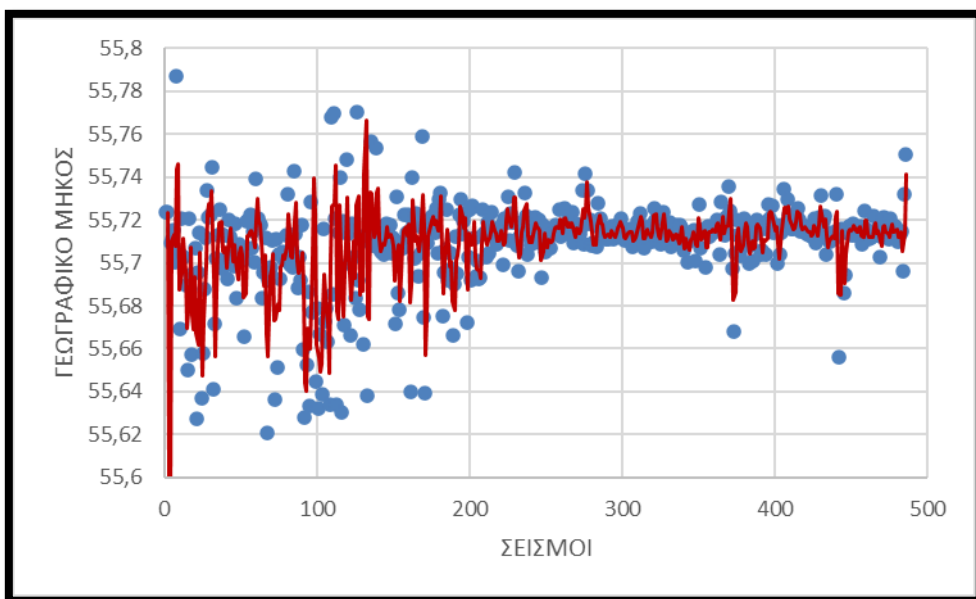
Εικόνα 33.Βάθος ανά σεισμικό γεγονός.

Από την εικόνα 33 γίνεται διακριτό ότι μετά από τις 5/12/2014, 250^ο σεισμικό γεγονός και έπειτα, το βάθος εκδήλωσης των σεισμών σταθεροποιείται στα 2 με 2,5 Km με μέσο Βάθος τα 2,22 Km. Γεγονός που οφείλεται στη σταθεροποίηση του μάγματος.

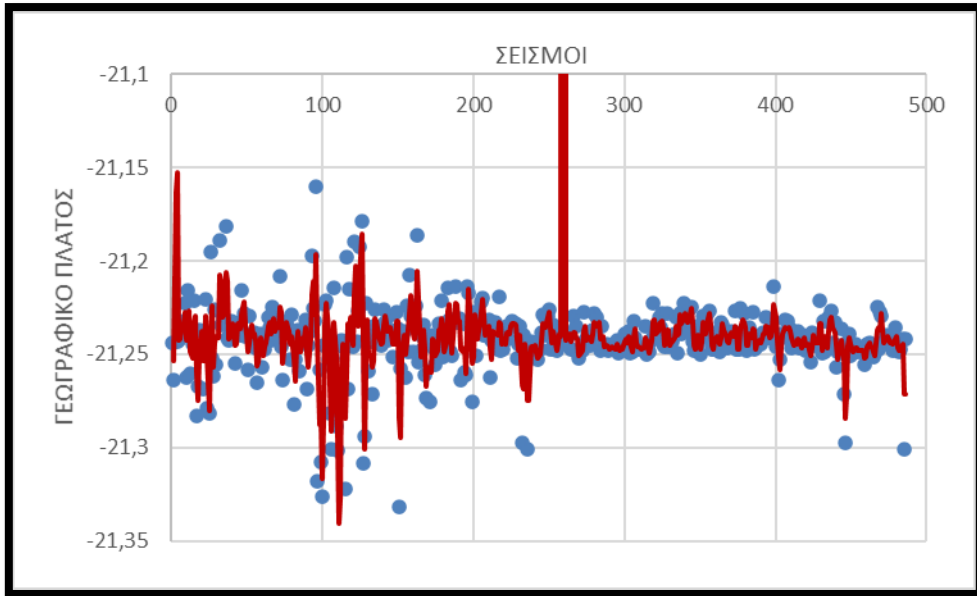


Εικόνα 34. Μέγεθος (Richter) ανά σεισμικό γεγονός.

Από την εικόνα 34 δια βλέπεται πως το μέγεθος των σεισμών κυμαίνεται μεταξύ 1,5 με 2 Richter με μέσο μέγεθος τα 1,8 Richter. Επίσης, από τις 5/01/2015, δηλαδή από το 400^ο σεισμικό γεγονός και έπειτα, παρουσιάζεται μια πτωτική πορεία του μεγέθους.



Εικόνα 35. Γεωγραφικό μήκος ανά σεισμικό γεγονός.



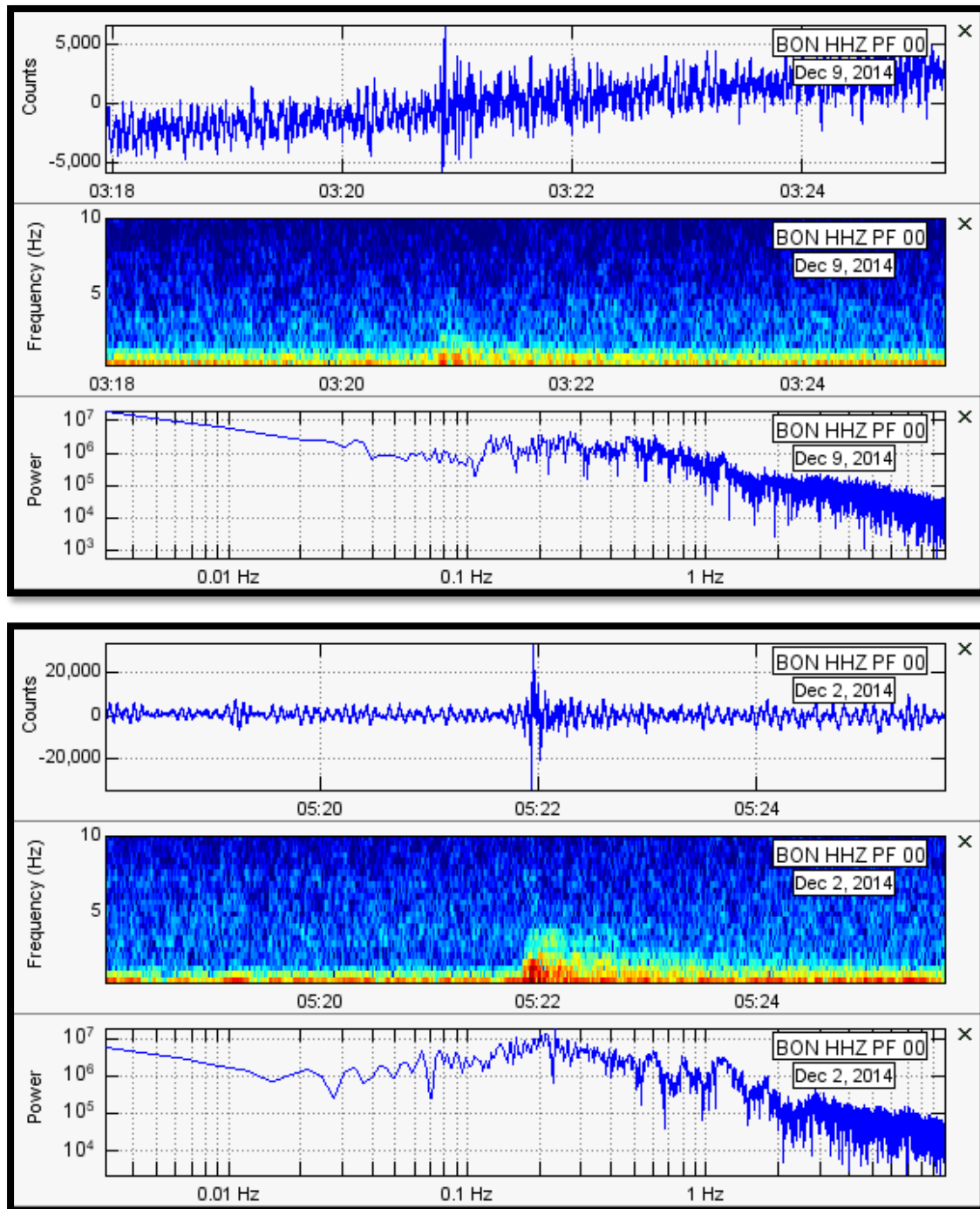
Εικόνα 36. Γεωγραφικό πλάτος ανά σεισμικό γεγονός.

Από τις εικόνες 35 και 36 παρατηρείται πως το γεωγραφικό μήκος των σειμών κυμαίνεται μεταξύ $55,6^\circ$ με $55,8^\circ$ και το γεωγραφικό πλάτος μεταξύ $-21,35^\circ$ με $-21,1^\circ$. Επίσης, παρατηρείται πως από τις 12/12/2014 και έπειτα, δηλαδή από το 280^ο σεισμικό γεγονός, το εύρος του γεωγραφικού πλάτους και μήκους εκδήλωσης σειμών μειώνεται γεγονός που οφείλεται στην σταθεροποίηση του μάγματος.

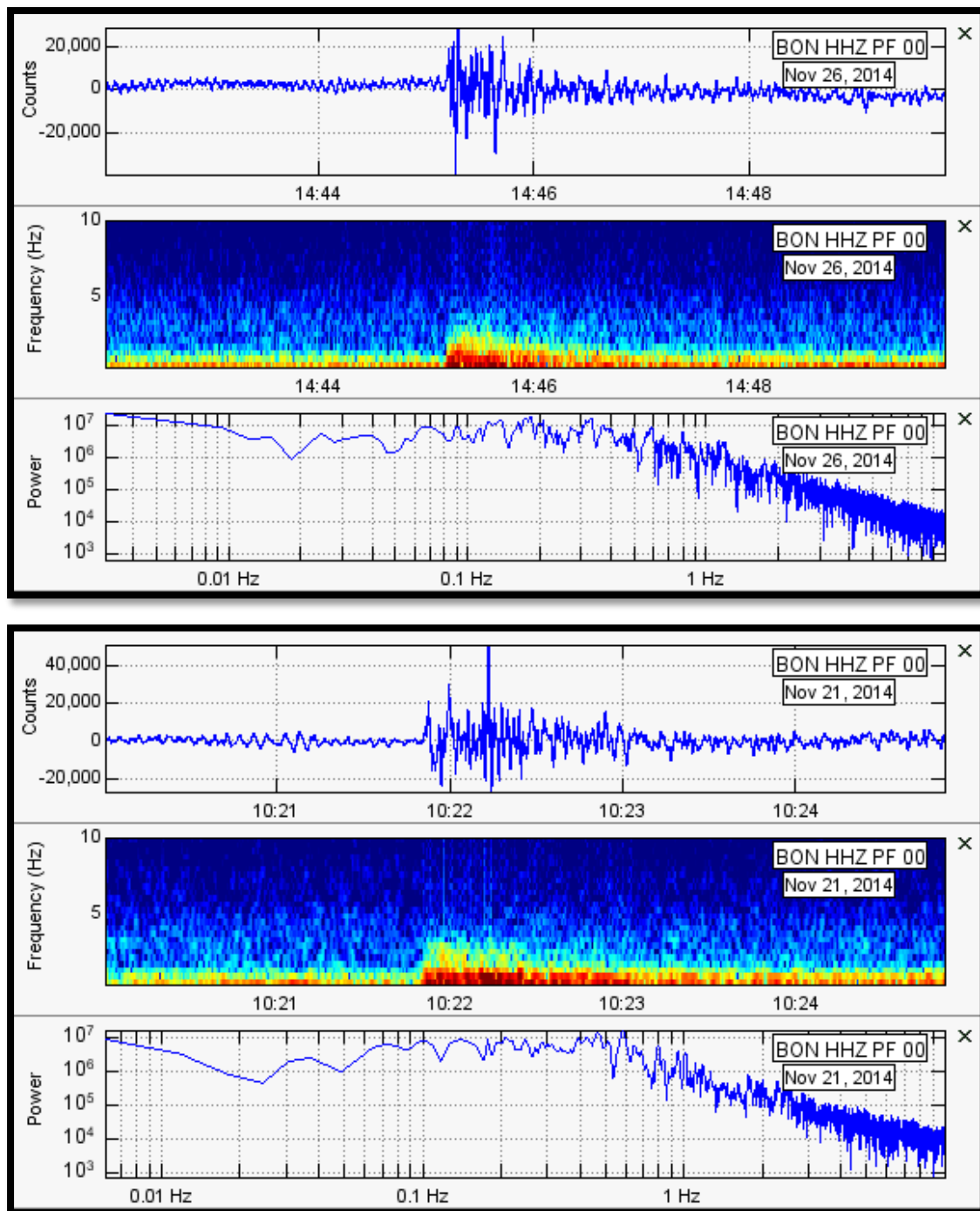
Βιβλιογραφία

1. Kawakatsu H., and Yamamoto M Volcano Seismology. In: Gerald Schubert (editor-in-chief) «Treatise on Geophysics», 2nd edition, Vol 4
2. Joachim Wassermann, August 2011. «Volcano Seismology DOI: [10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch13](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch13)»
3. Vyacheslav M. Zobin, 2012, «Introduction to Volcanic Seismology»
4. Patrick Smith, PhD Transfer report. «Combining magma flow modelling and seismicity on Montserrat»
5. Κολαΐτης Άγγελος, 2011, Διδακτορική Διατριβή. «Μελέτη Τεκτονικής και ηφαιστειογενούς σεισμικότητας νήσου Σαντορίνης»
6. Σιμόπουλος Παναγιώτης, Μάρτιος 2017, Διατριβή Ειδίκευσης. «Επιπτώσεις των ηφαιστειακών εκρήξεων στο δομημένο ανθρωπογενές περιβάλλον»
7. Κυριακόπουλος Κωνσταντίνος, 1991. «Ηφαιστειολογία»
8. Καβύρης Γ. και Κασσάρας Ι., 2015, «Εργαστηριακά Κεφάλαια Σεισμολογίας»
9. Τσελέντης Άκης, 2018. «Γενική Σεισμολογία»
10. Παπαζάχος Βασίλειος, 2005. «Εισαγωγή στη σεισμολογία»
11. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020>
12. <http://www.ipgp.fr/fr/ovpf/piton-de-fournaise>
13. <https://fournaise.info/eruption-4-fevrier-2015>
14. <https://www.fdsn.org/networks/detail/PF/>
15. <https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards/about-alert-levels>
16. <http://history-pages.blogspot.gr/2012/08/blog-post.html>
17. <https://www.google.gr/maps/>
18. <https://www.usgs.gov/>
19. https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020#bgvn_201502
20. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fournaise_rempart_Enclos_Fouqu%C3%A9.JPG
21. <https://lakazkozkoze.com/?p=31927&lang=en-Pierre Choukroun>
22. <https://earth.google.com/web/>

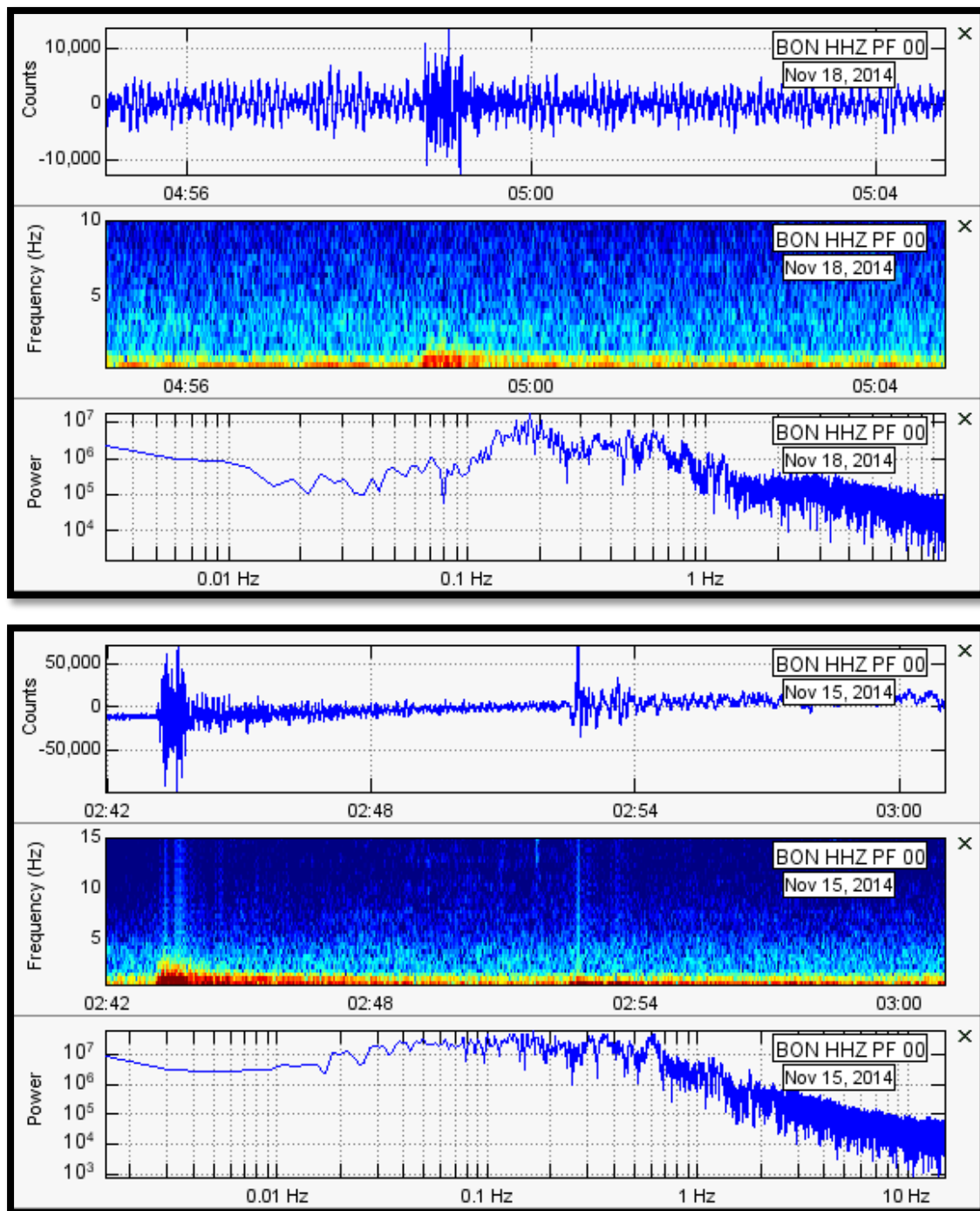
Παράρτημα 2



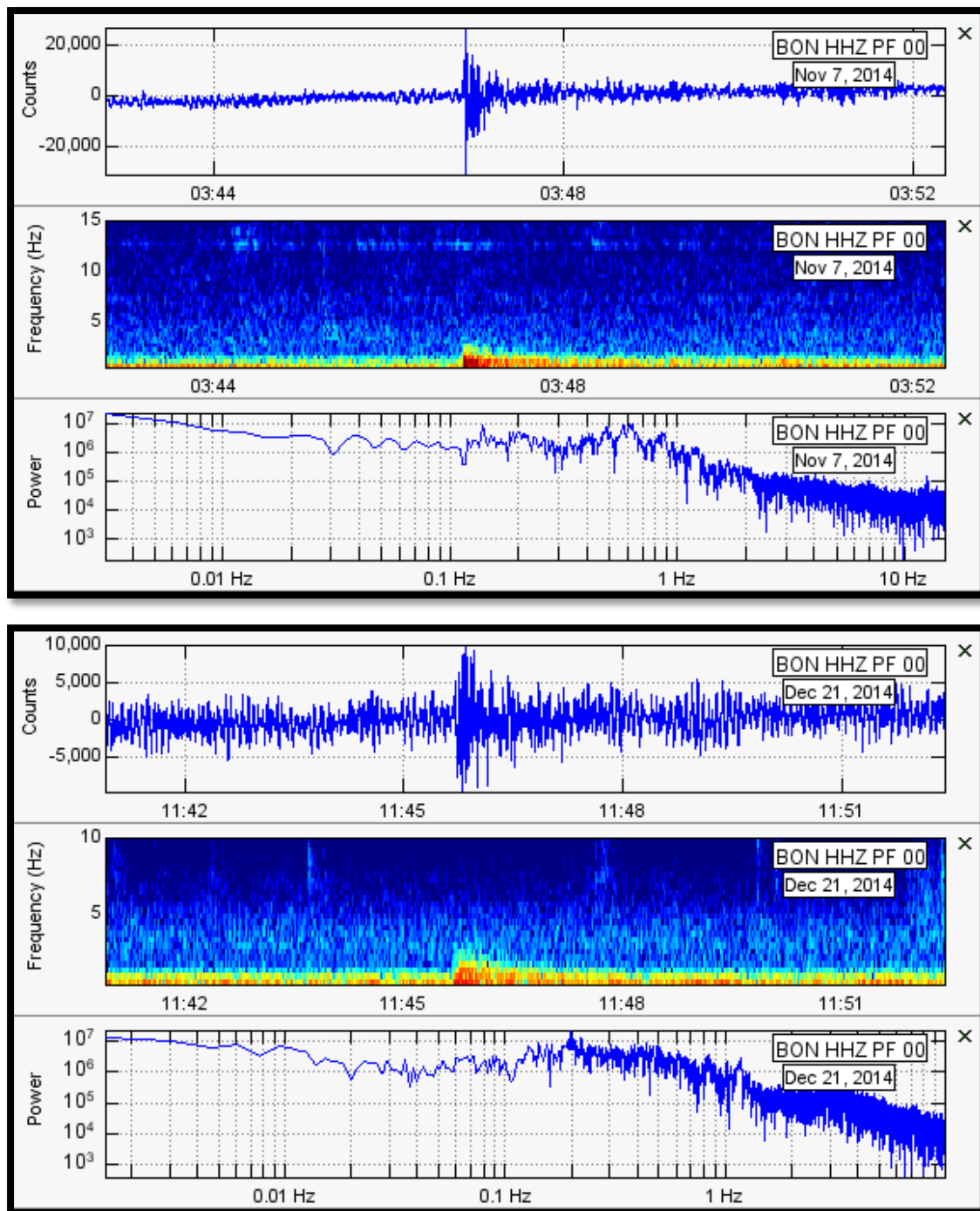
Εικόνα 37. Παραδείγματα Κατηγορίας 1 των LF και Τρεμοσημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2,5 Hz.



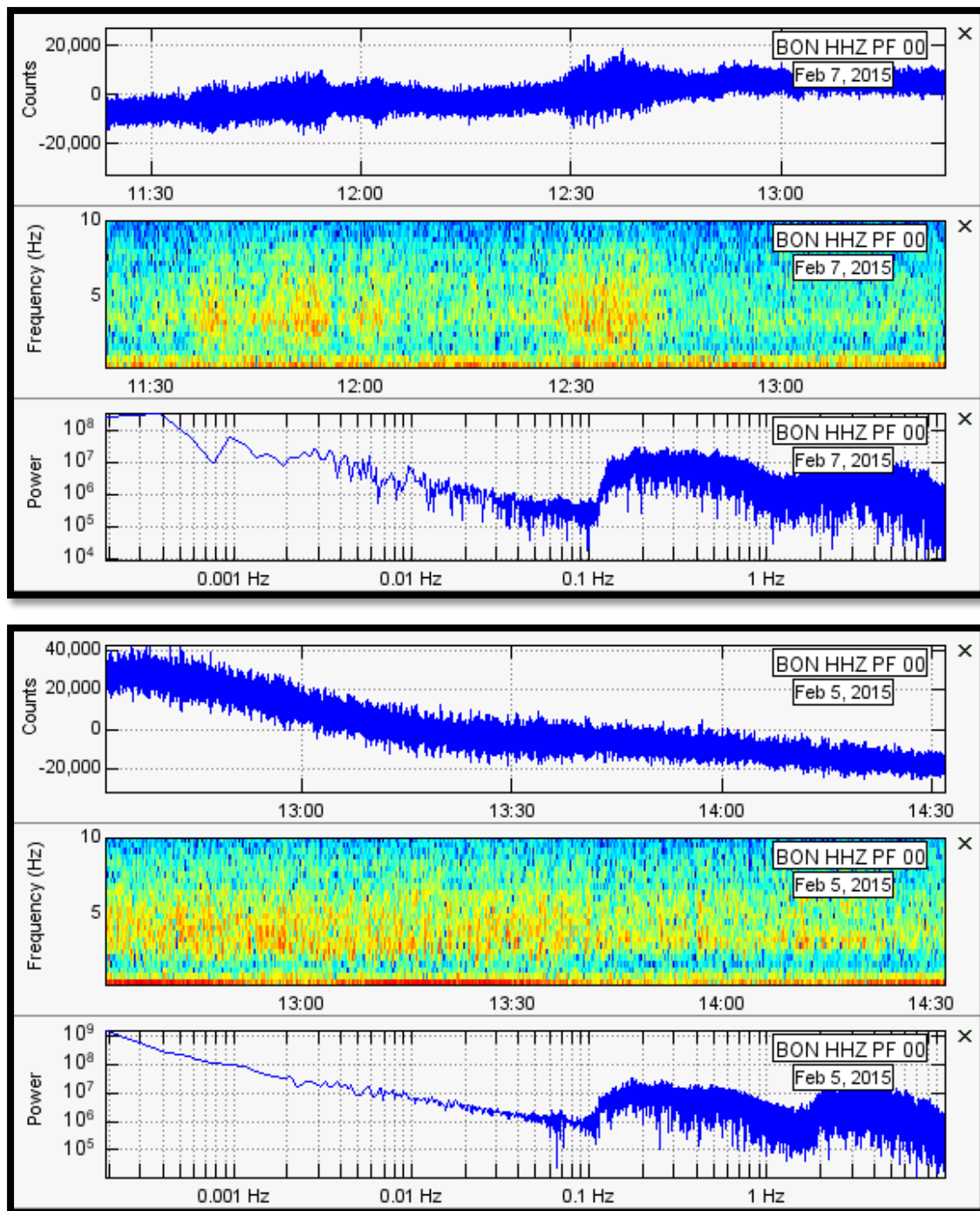
Εικόνα 38. Παραδείγματα Κατηγορίας 1 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2,5 Hz.



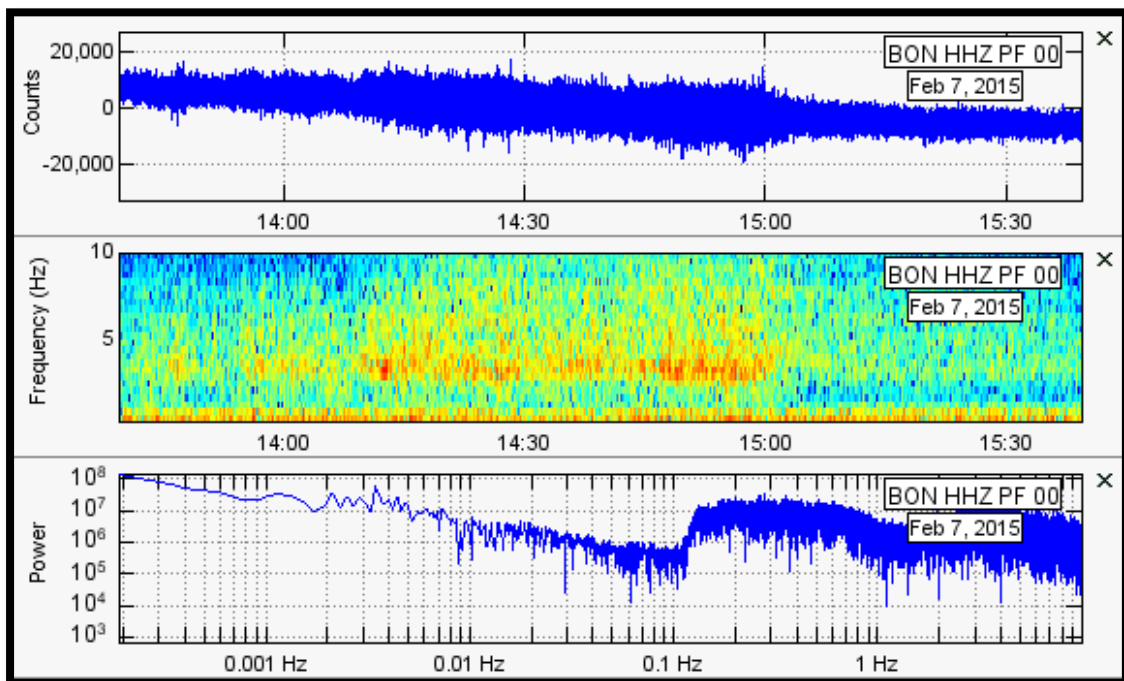
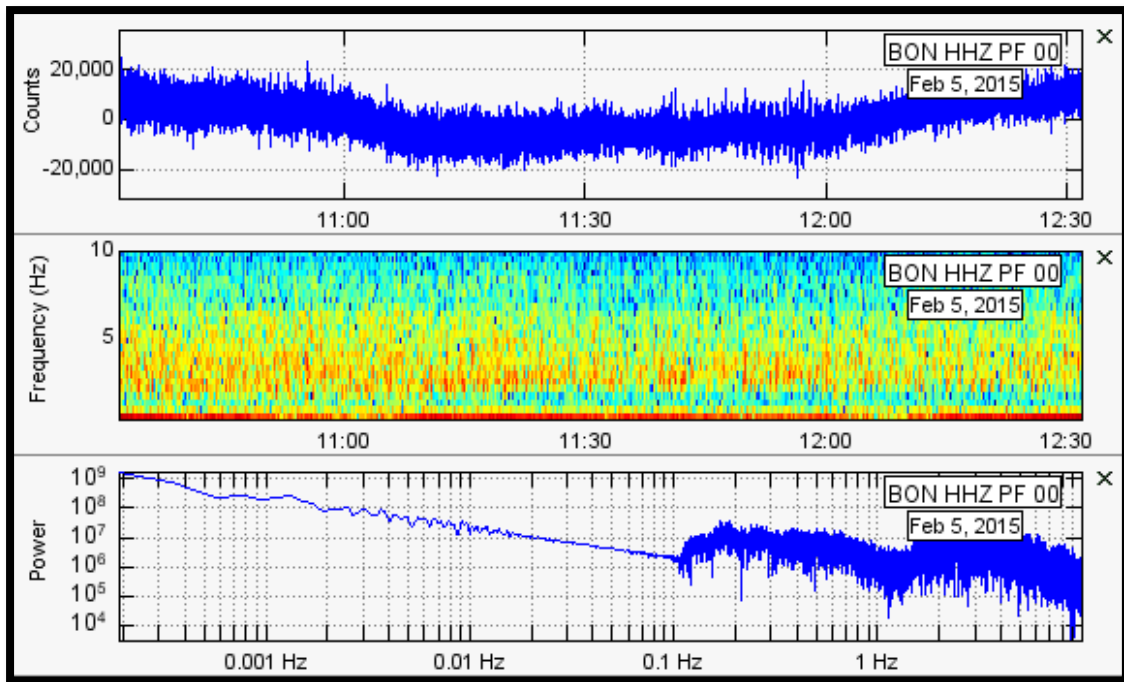
Εικόνα 39. Παραδείγματα Κατηγορίας 1 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2,5 Hz.



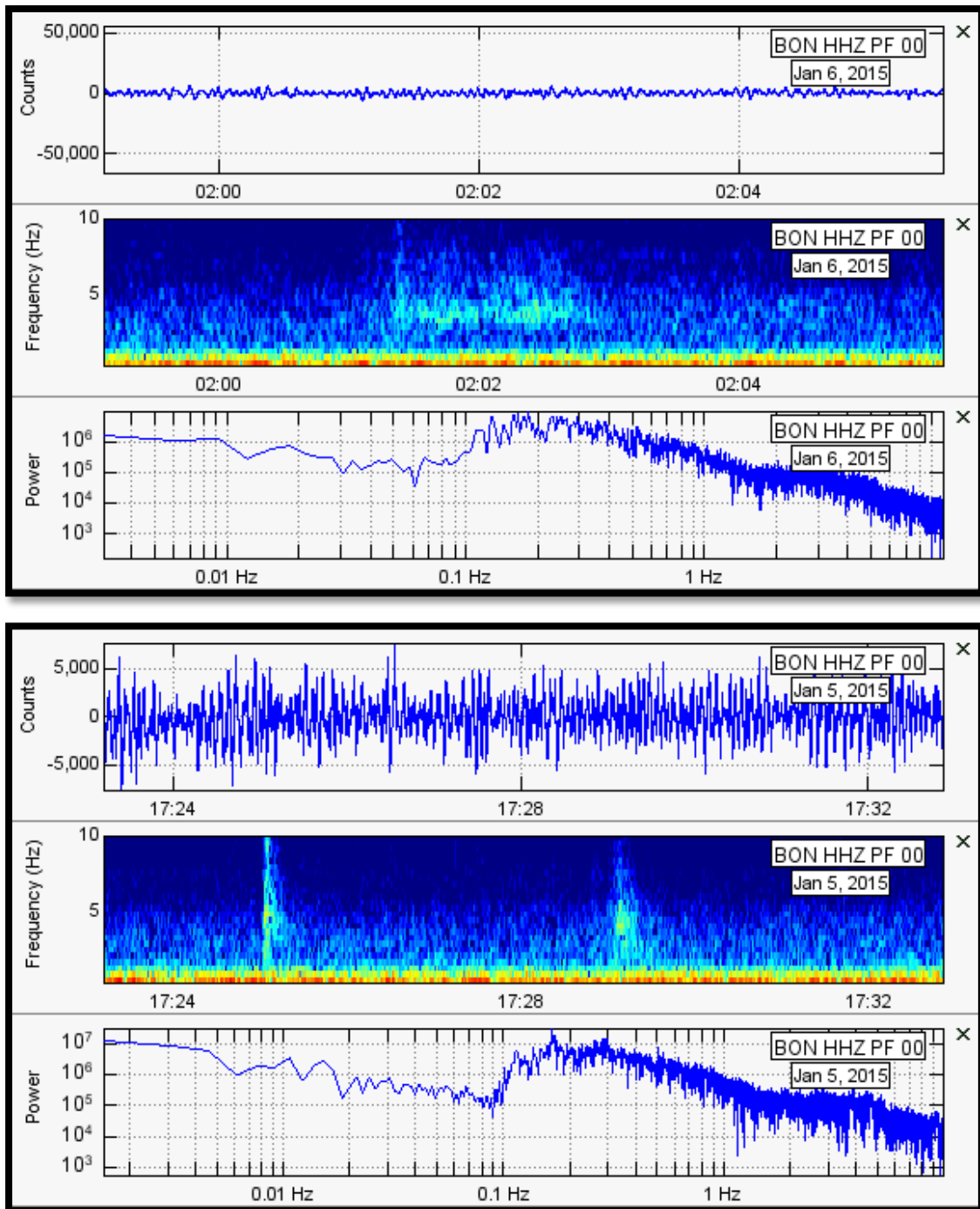
Εικόνα 40. Παραδείγματα Κατηγορίας 1 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2,5 Hz.



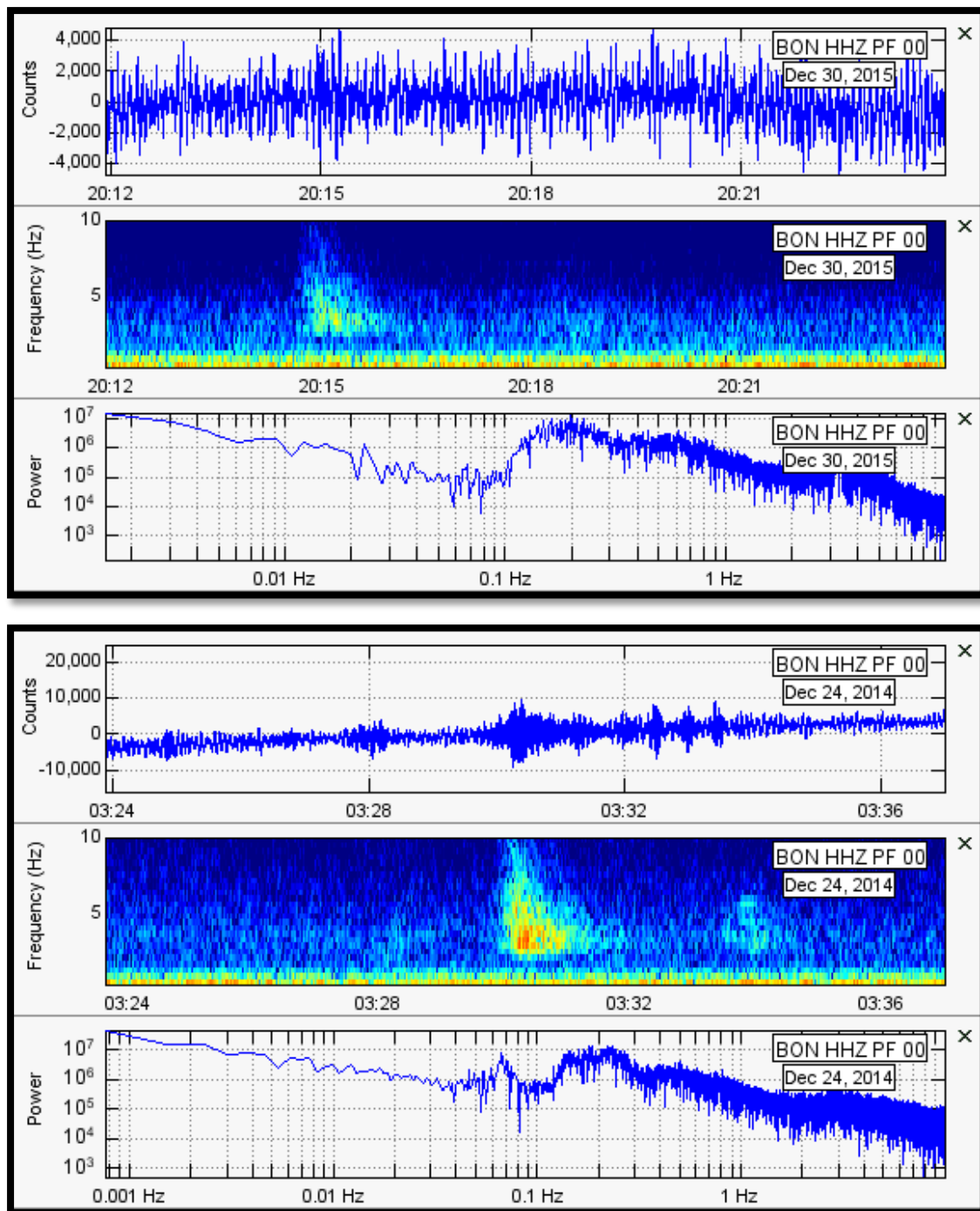
Εικόνα 41. Παραδείγματα Κατηγορίας 2 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2-7 Hz.



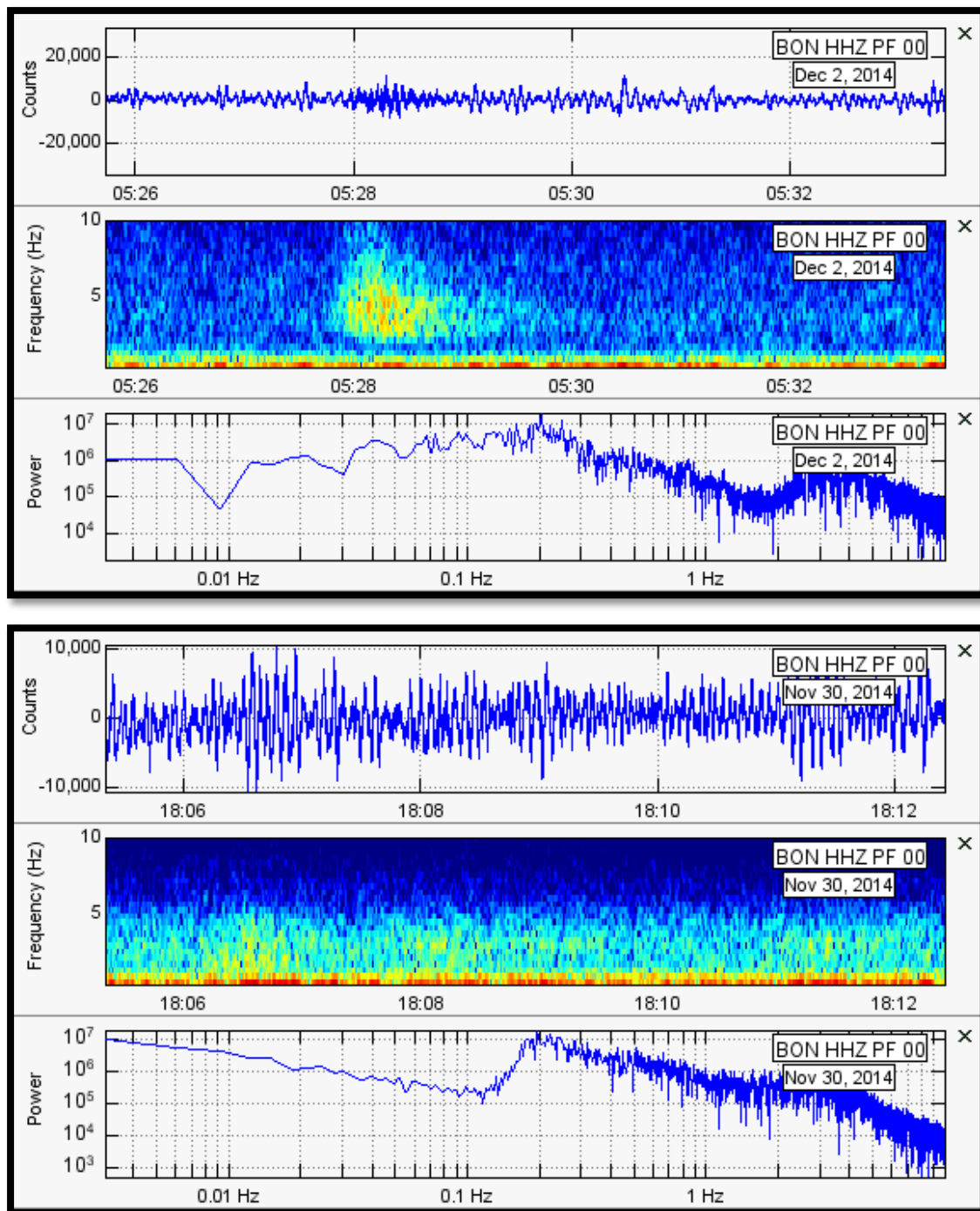
Εικόνα 42. Παραδείγματα Κατηγορίας 2 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2-7 Hz.



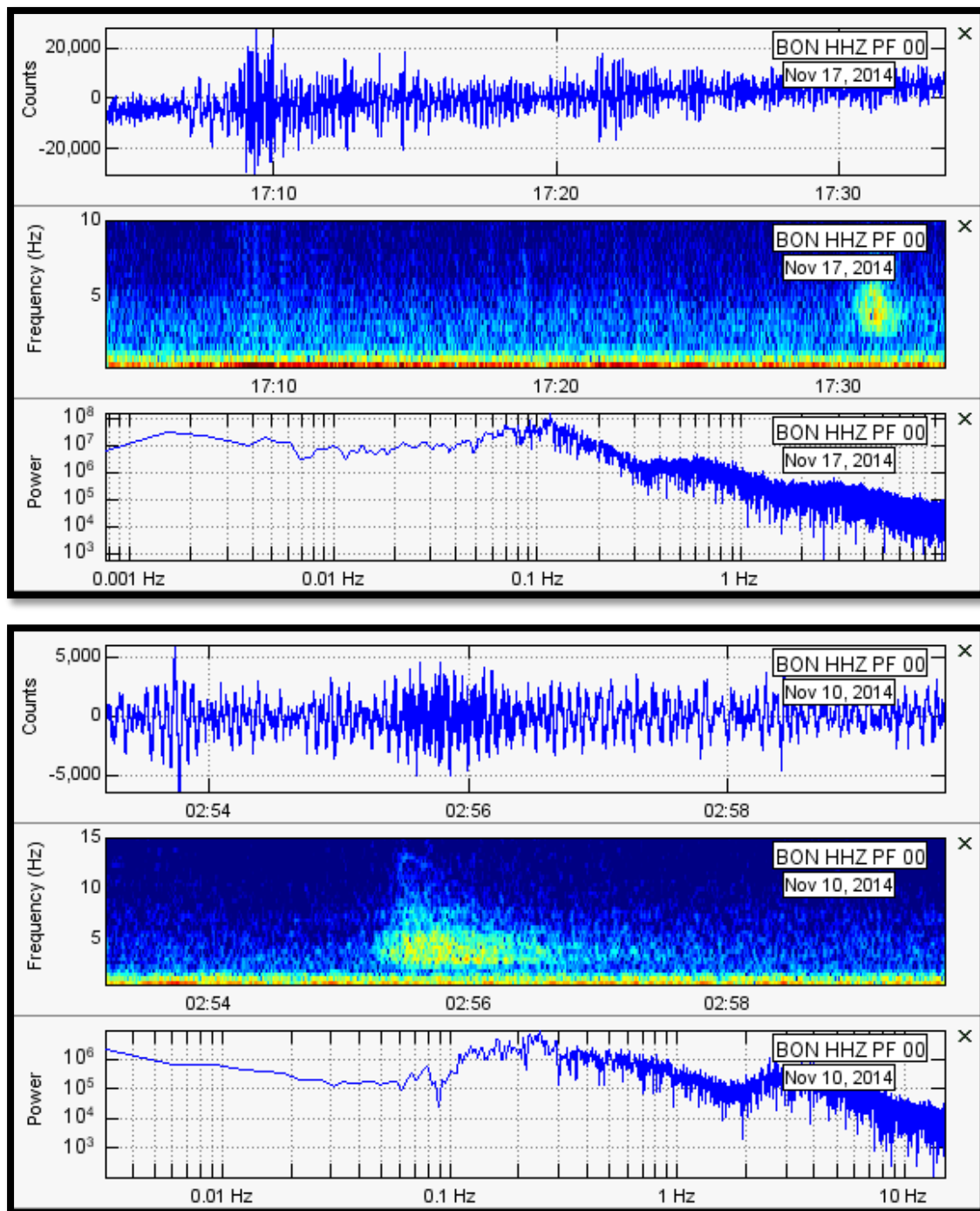
Εικόνα 43. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8Hz.



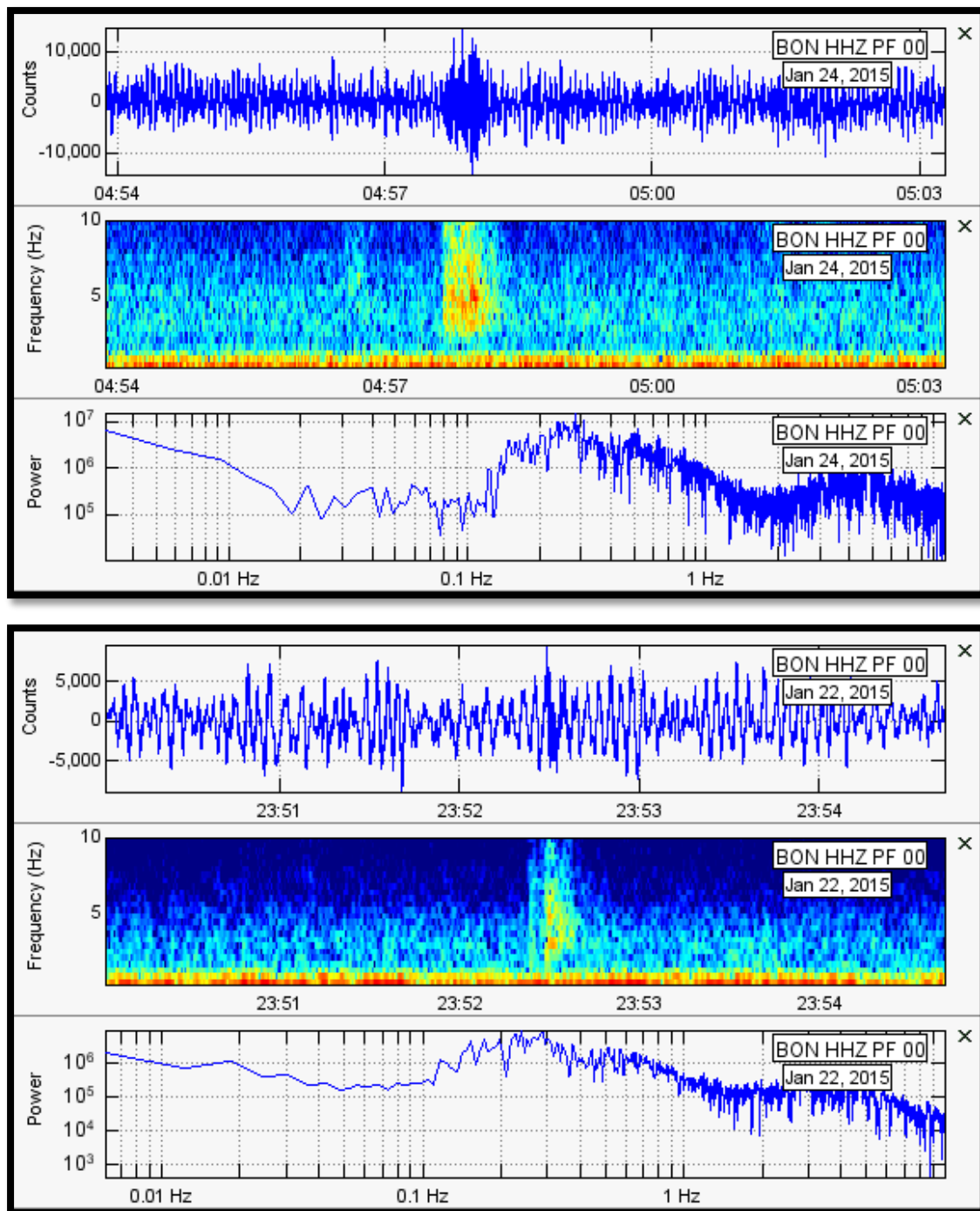
Εικόνα 44. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



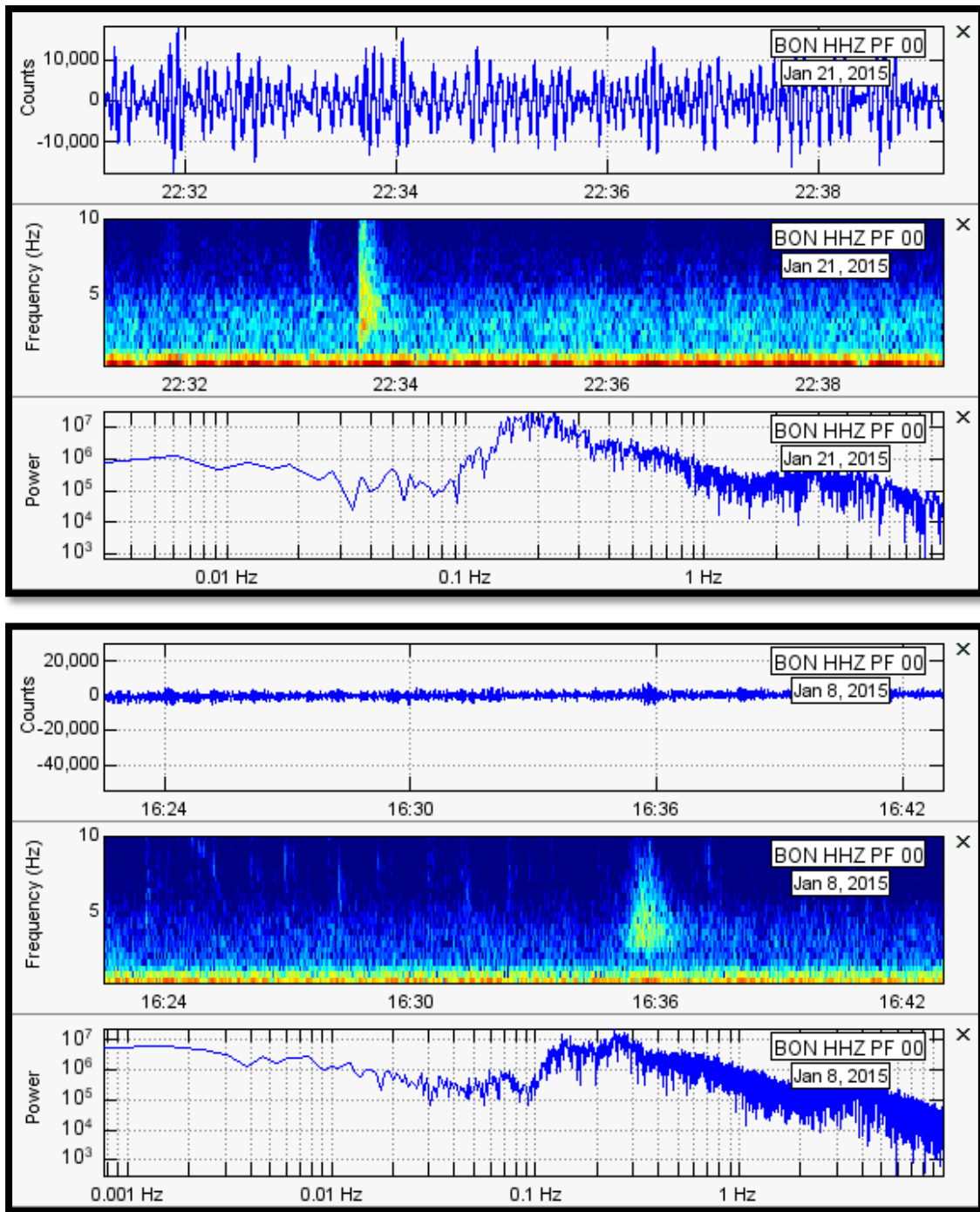
Εικόνα 45. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



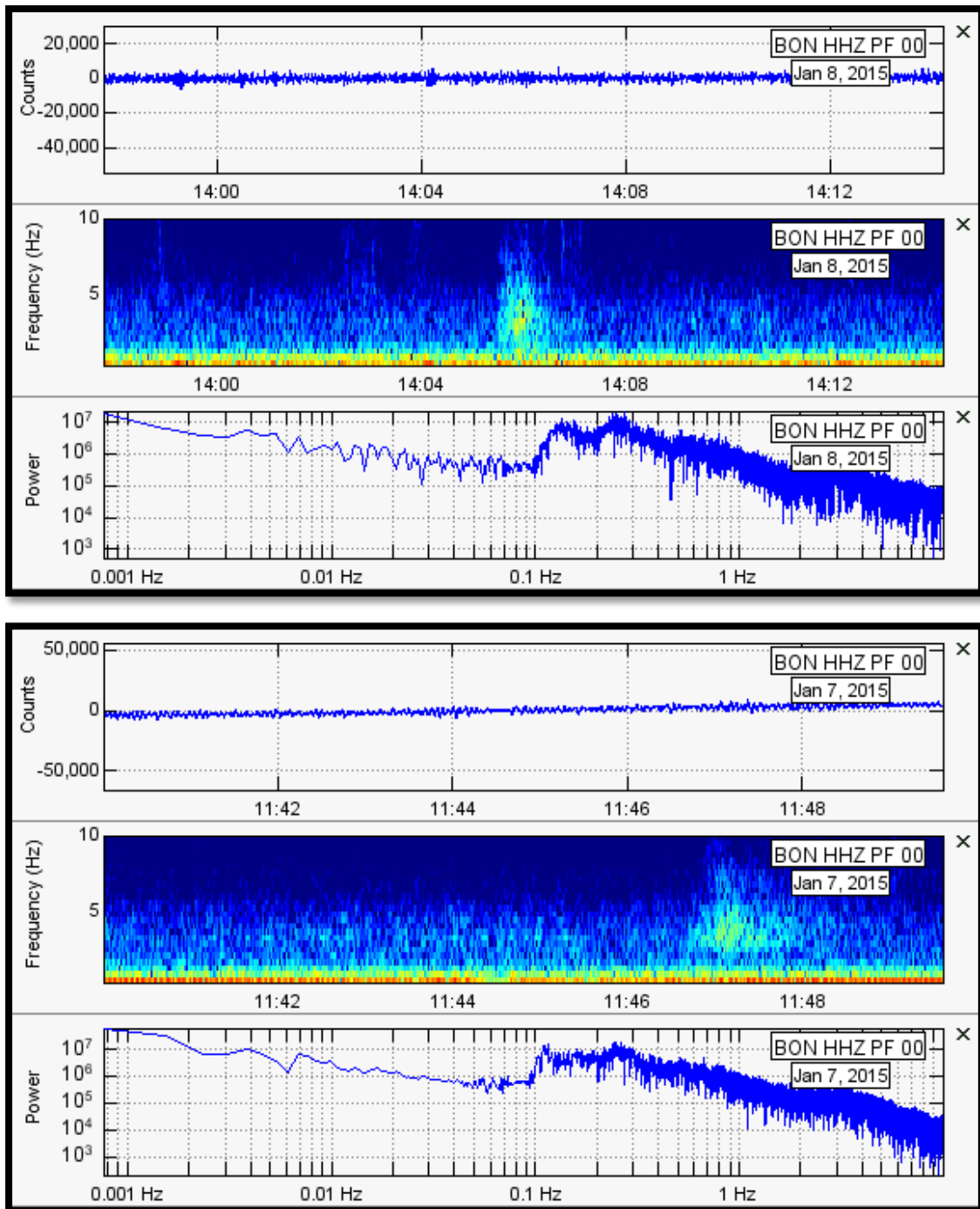
Εικόνα 46. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



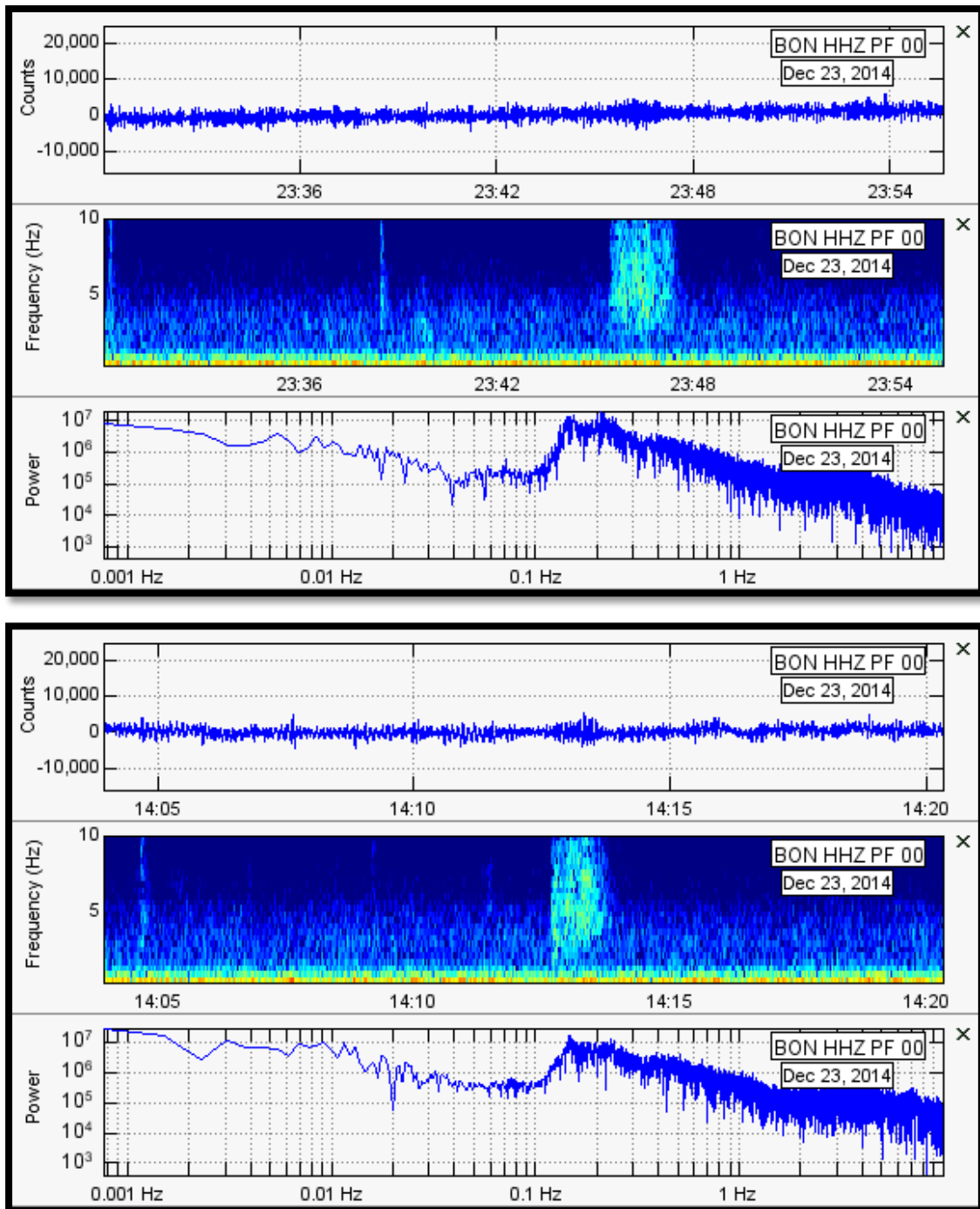
Εικόνα 47. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



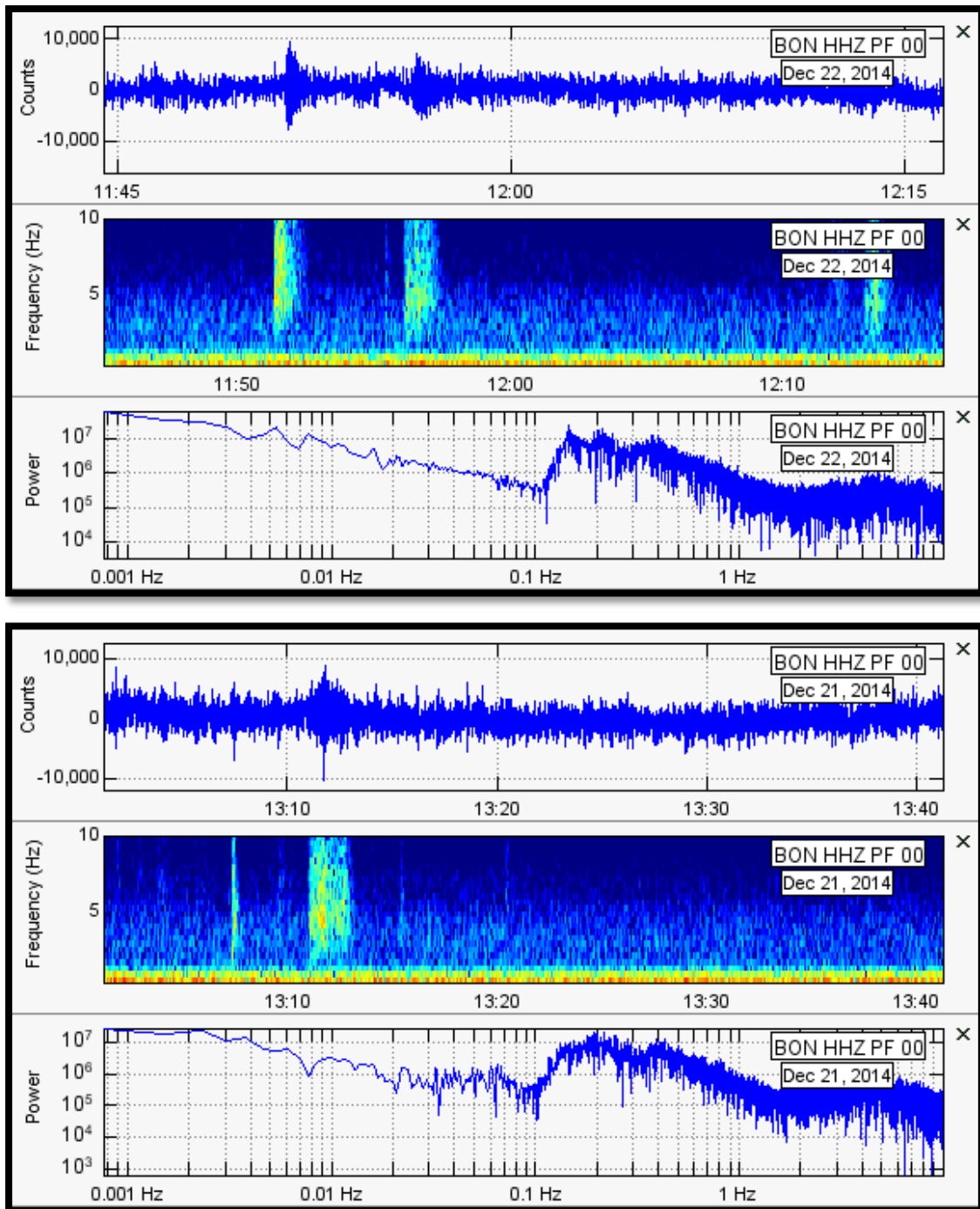
Εικόνα 48. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



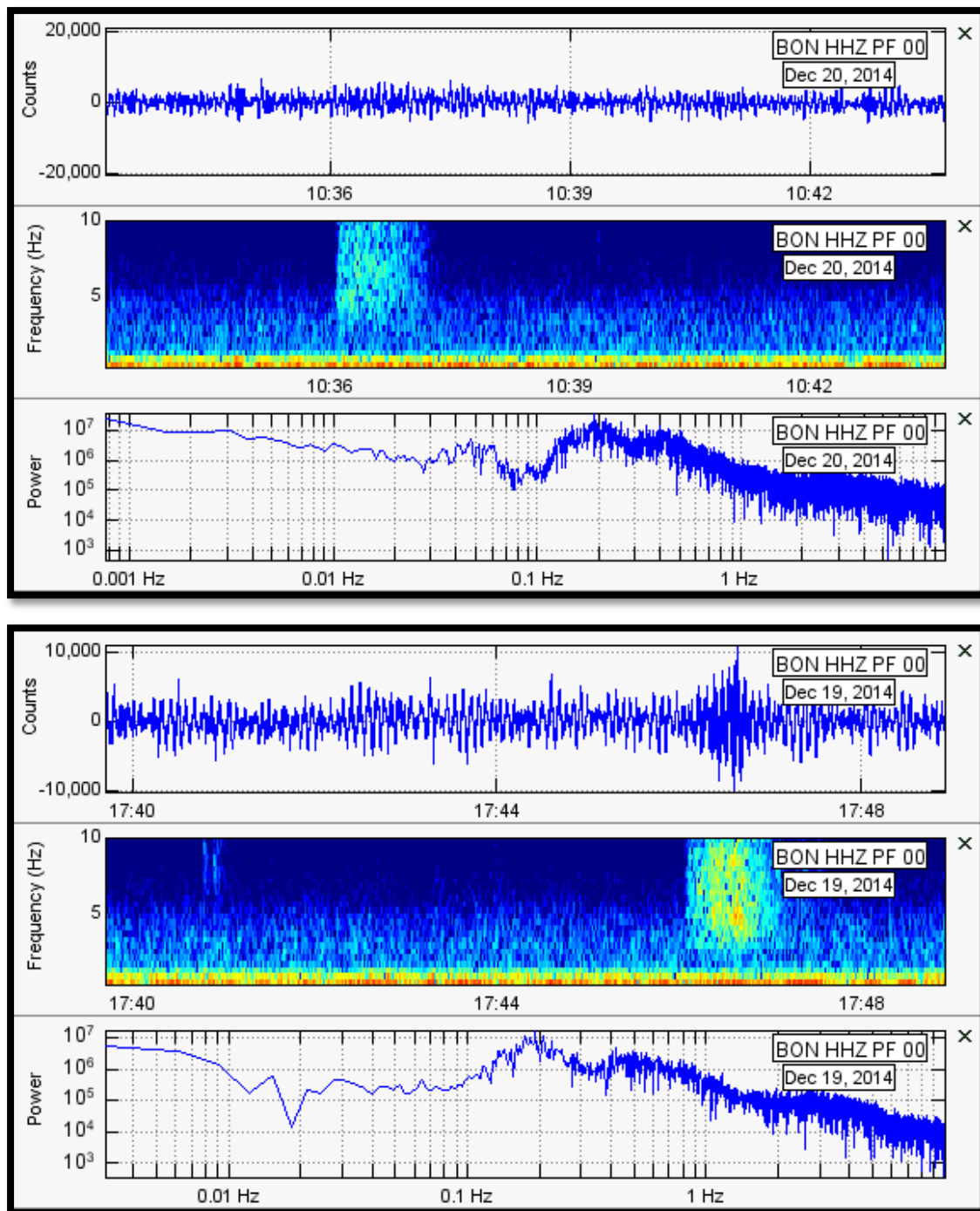
Εικόνα 49. Παραδείγματα Κατηγορίας 3 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 3-8 Hz.



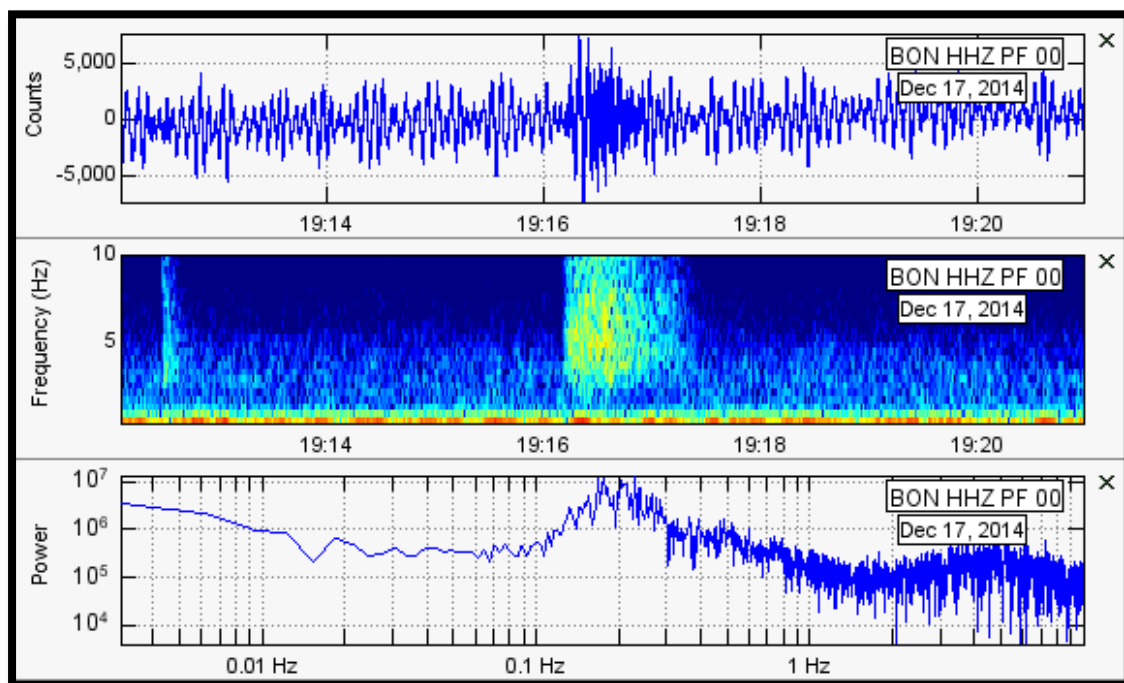
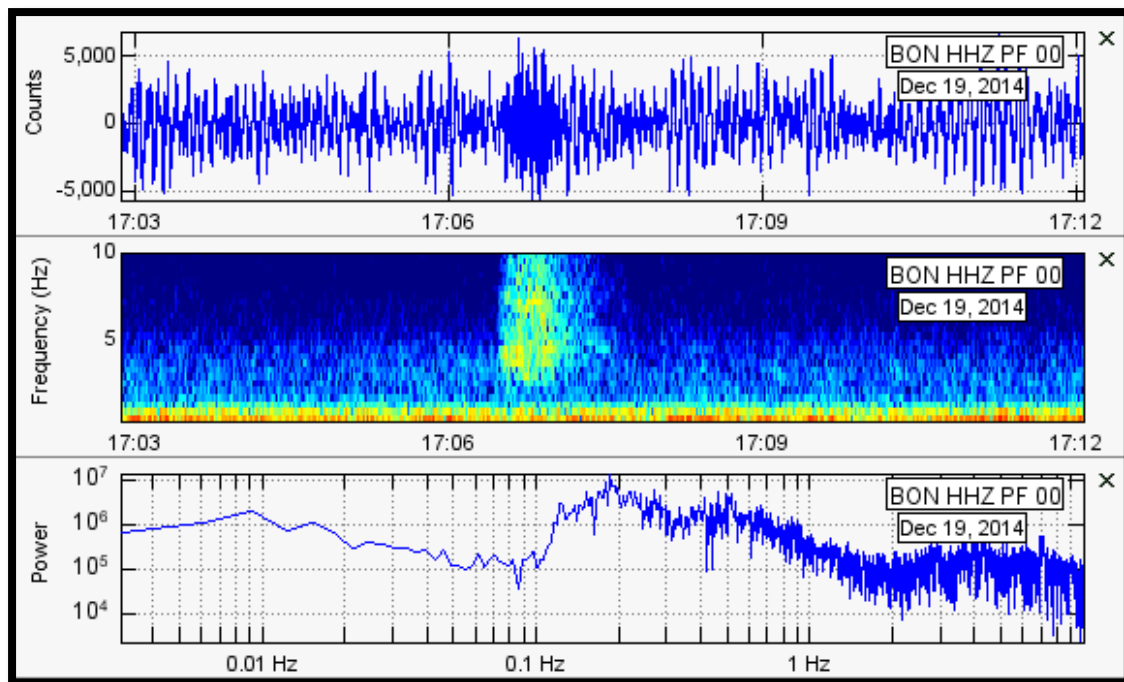
Εικόνα 50. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2->10Hz.



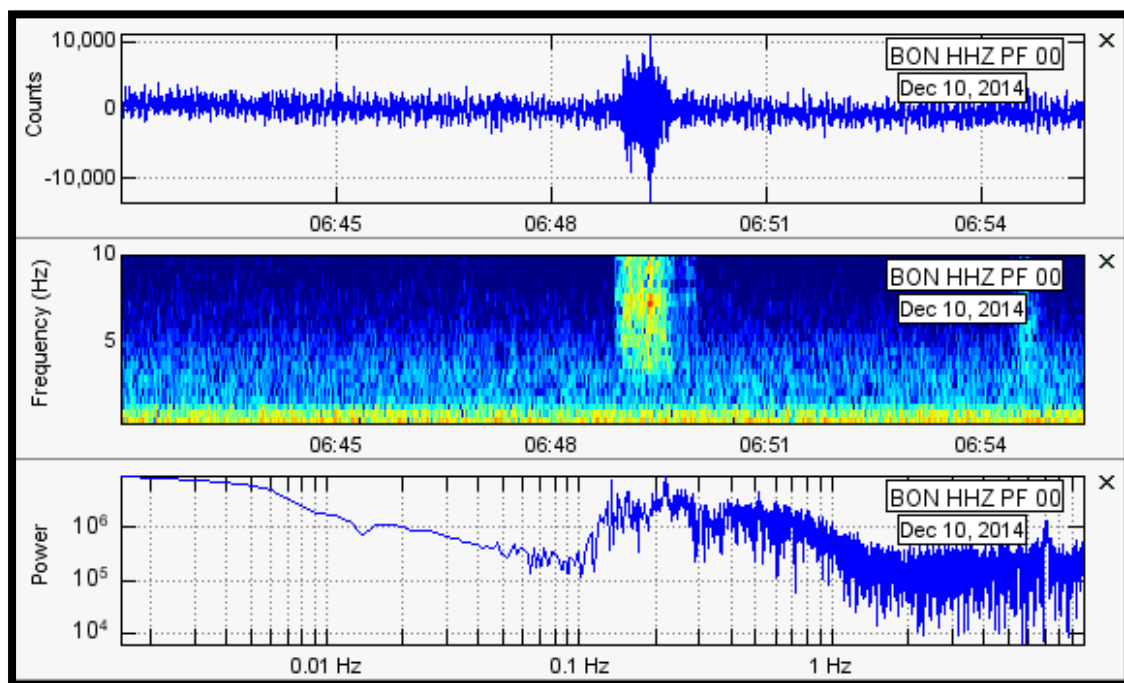
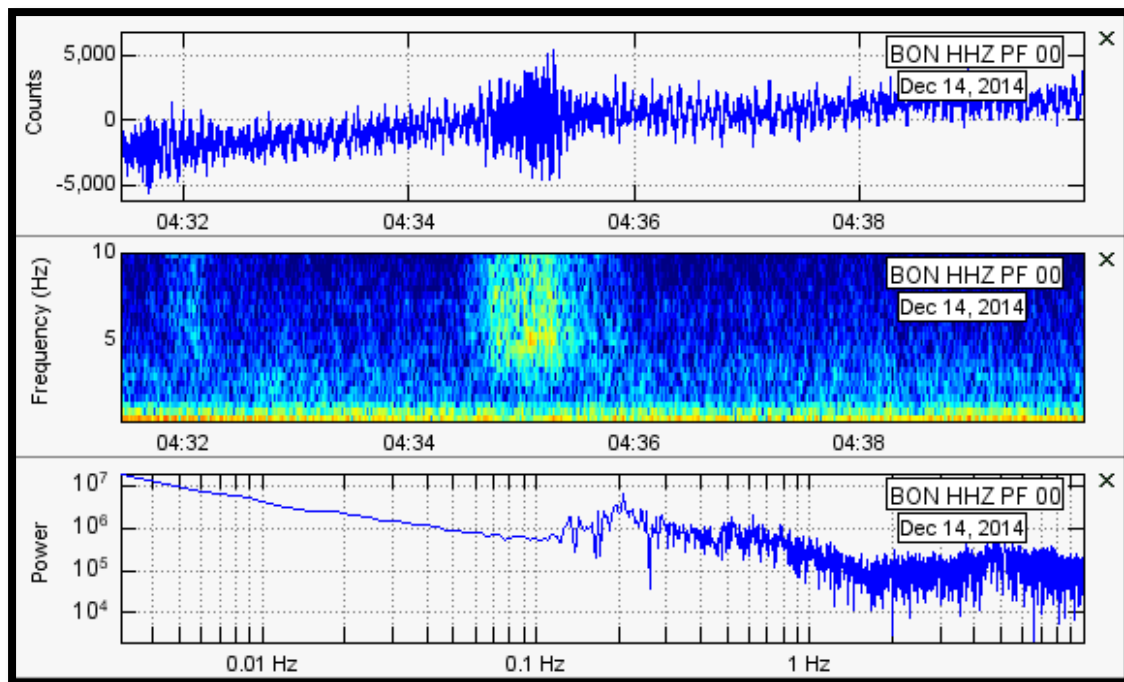
Εικόνα 51. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



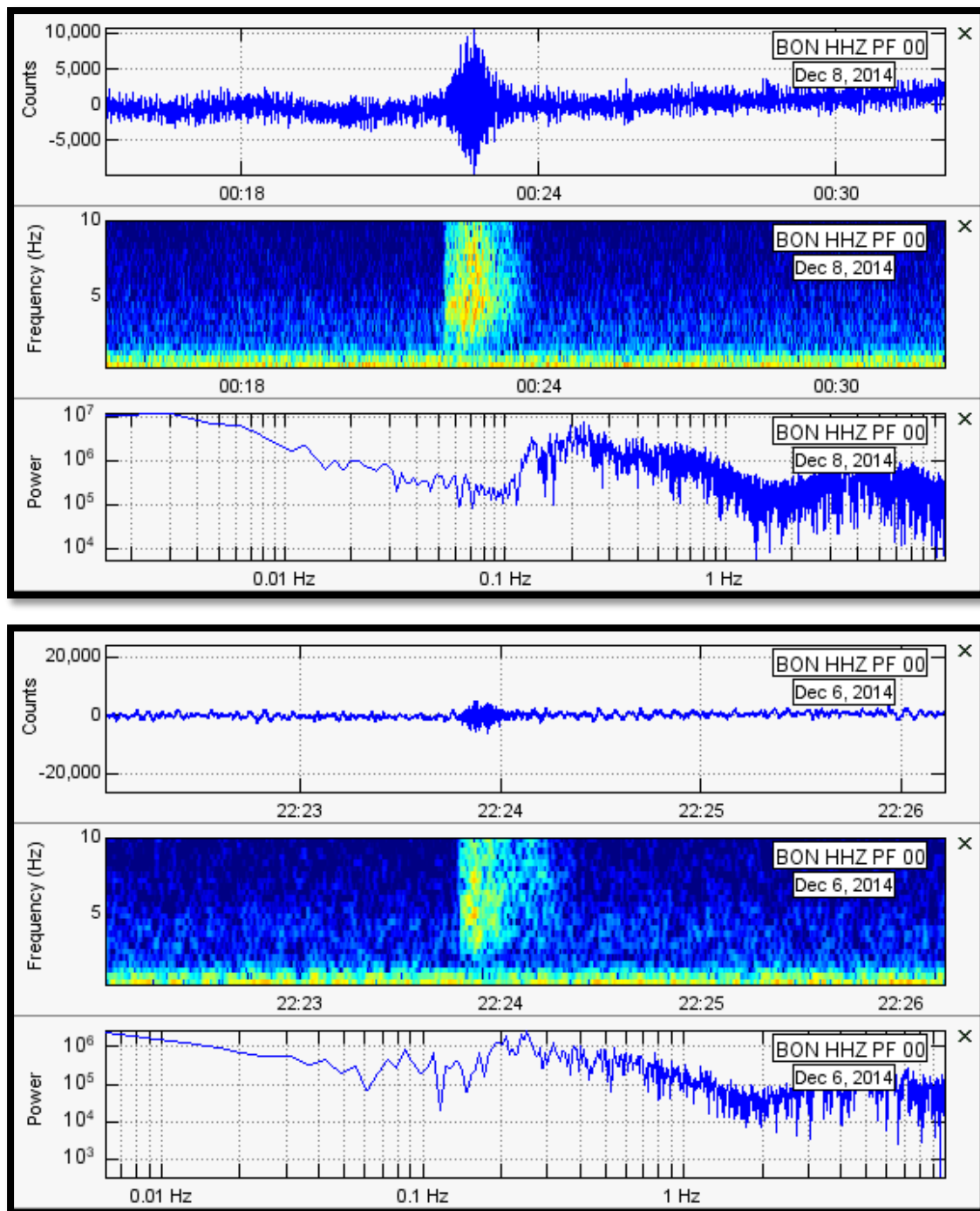
Εικόνα 52. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



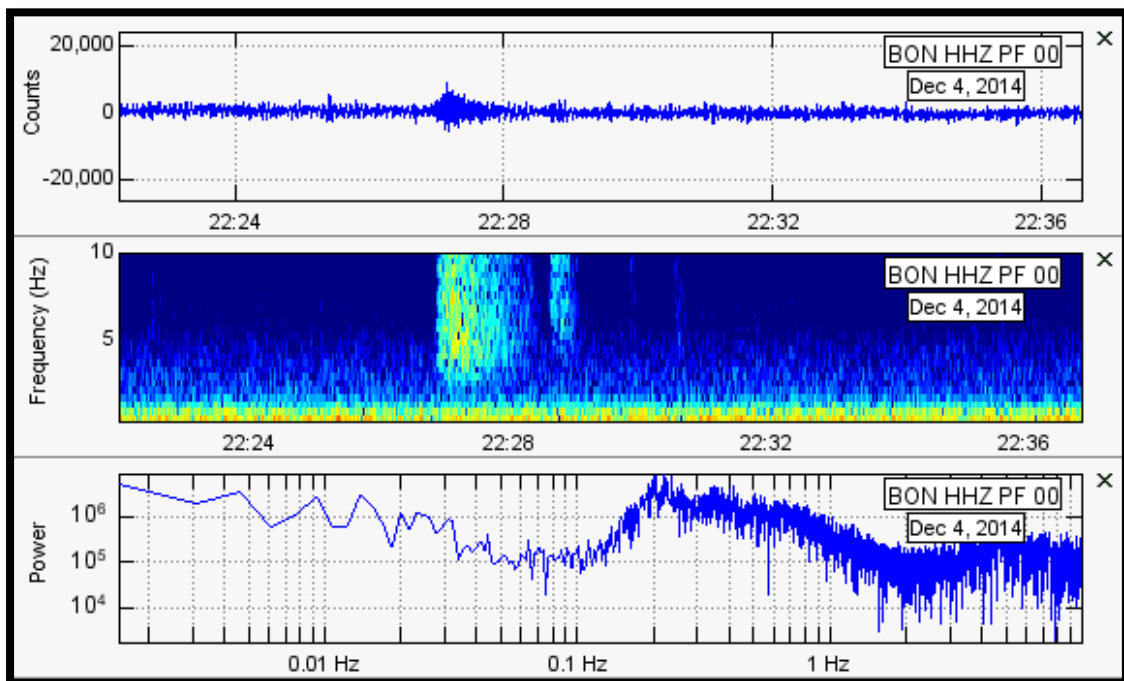
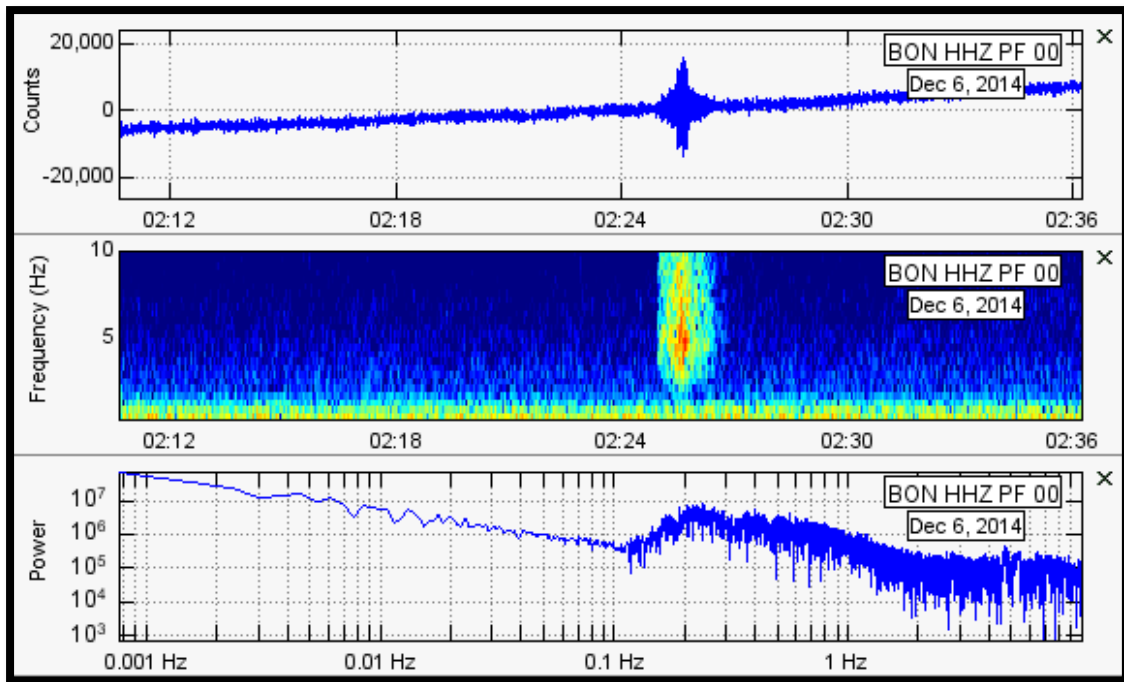
Εικόνα 53. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



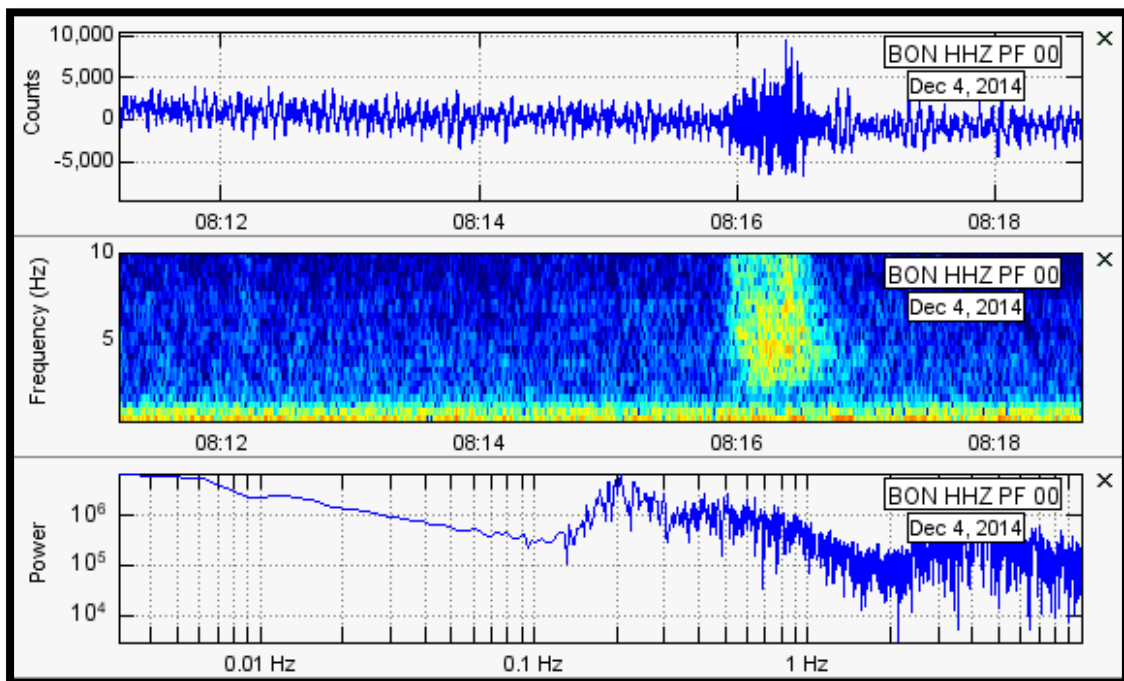
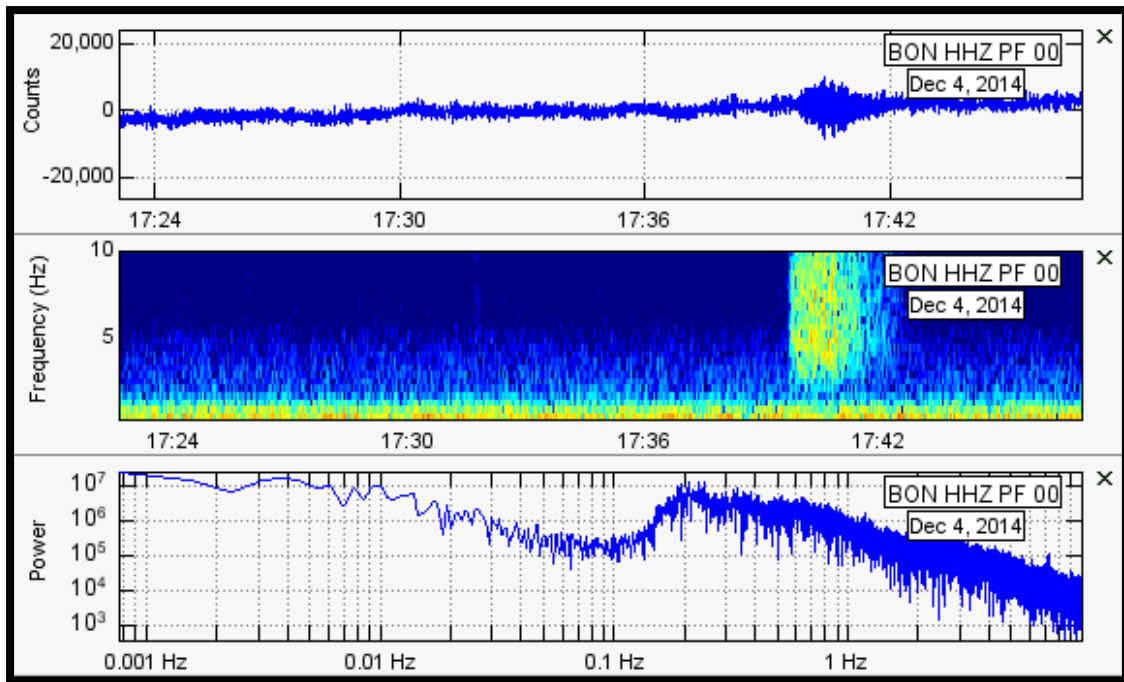
Εικόνα 54. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



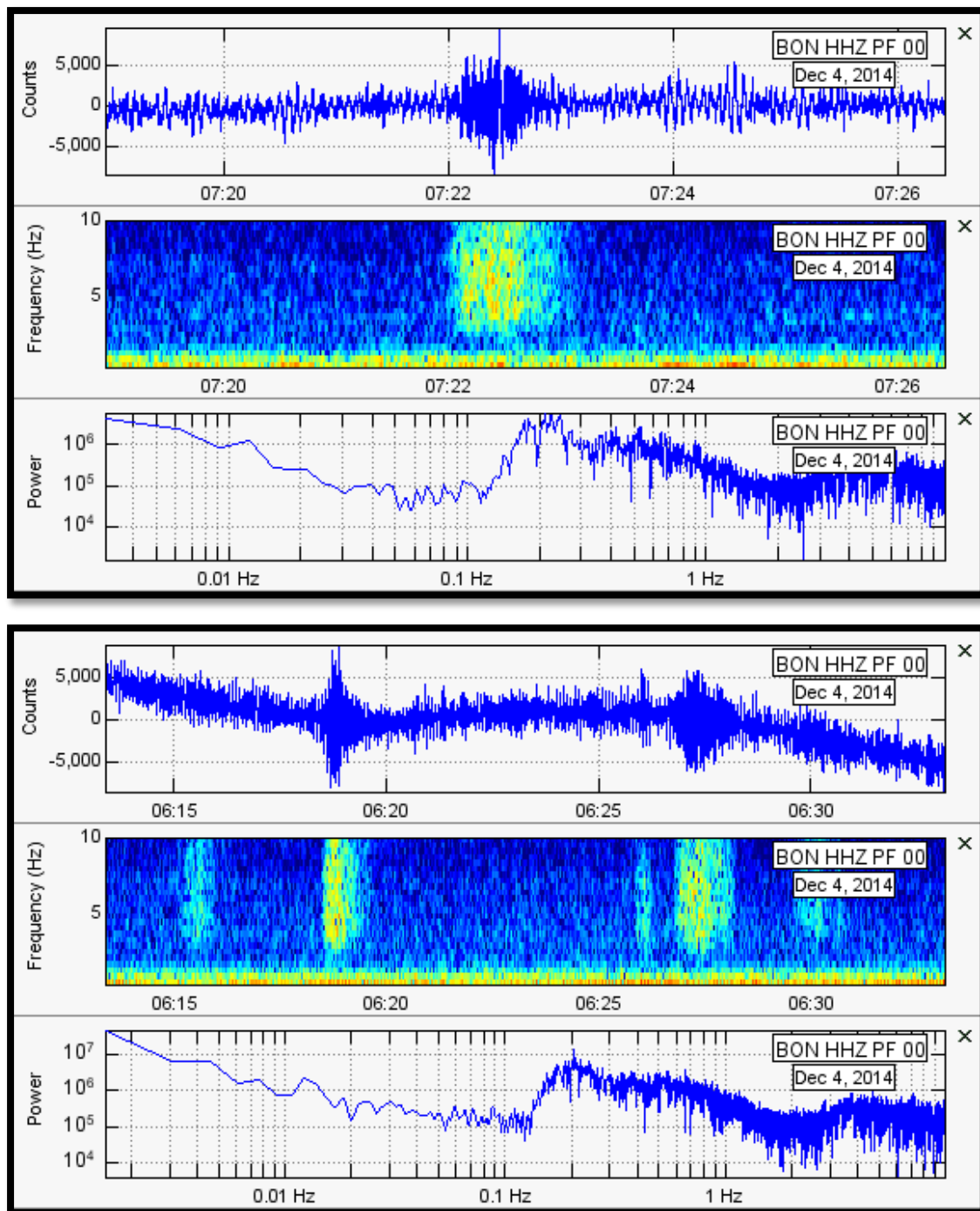
Εικόνα 55. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



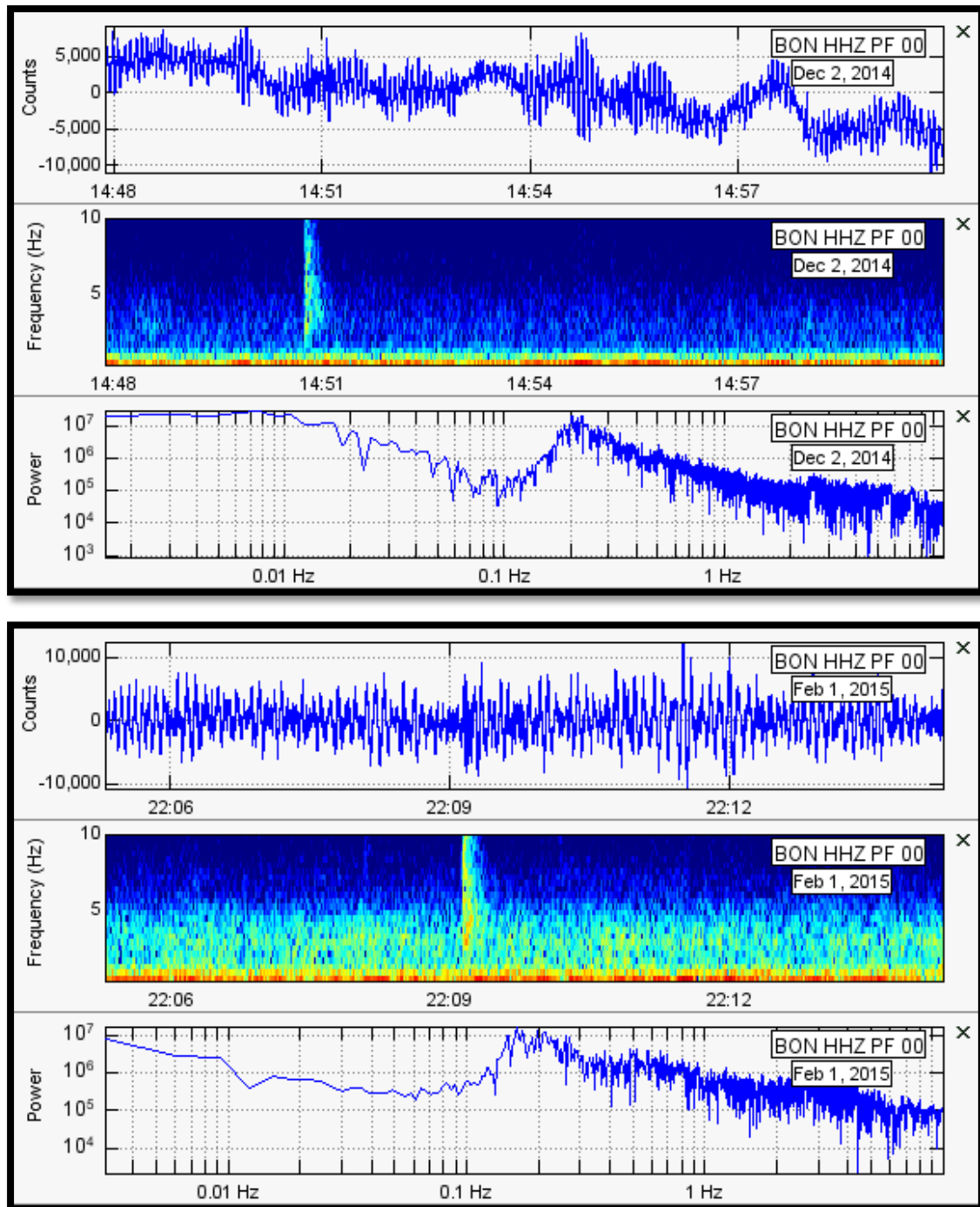
Εικόνα 56. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



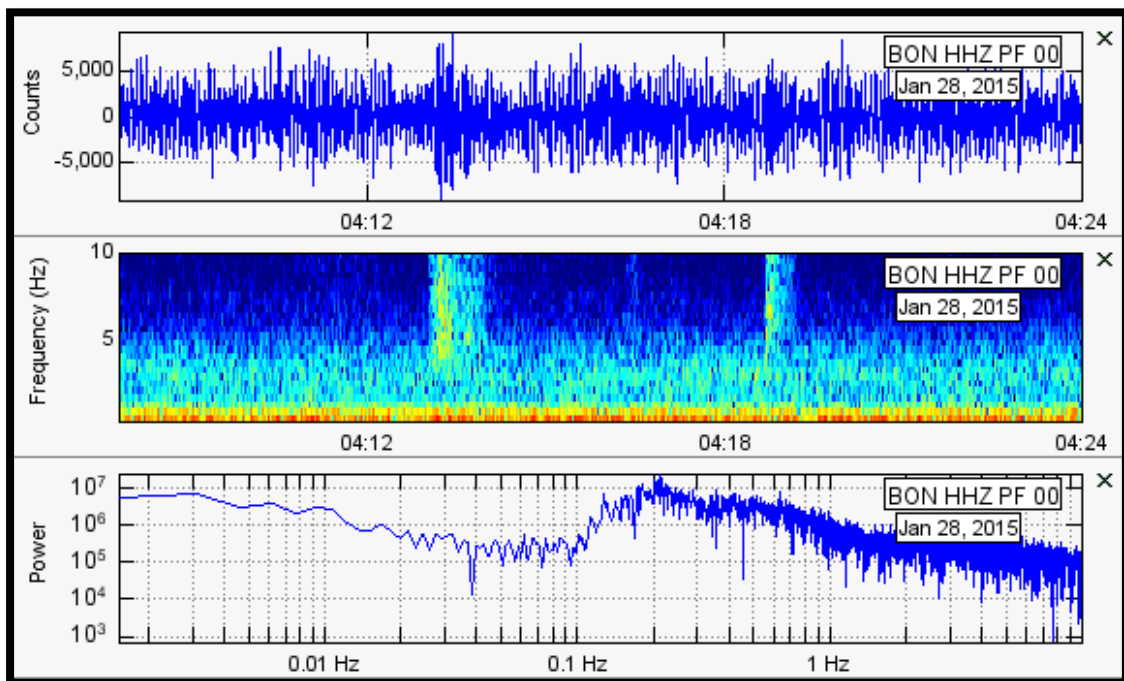
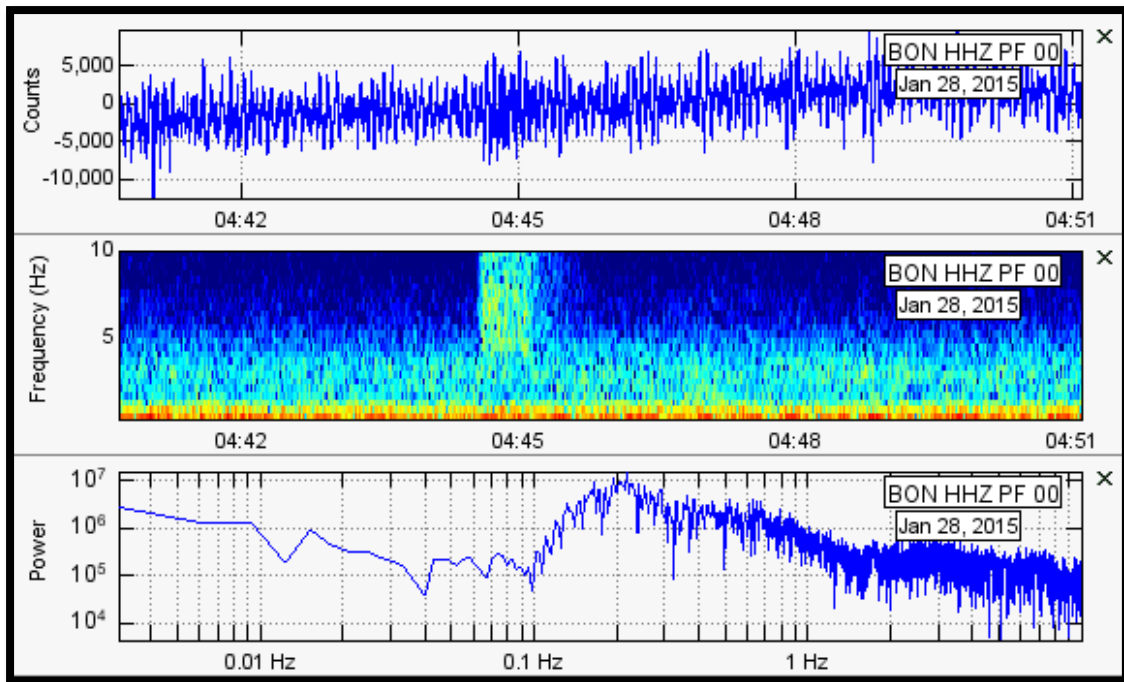
Εικόνα 57. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



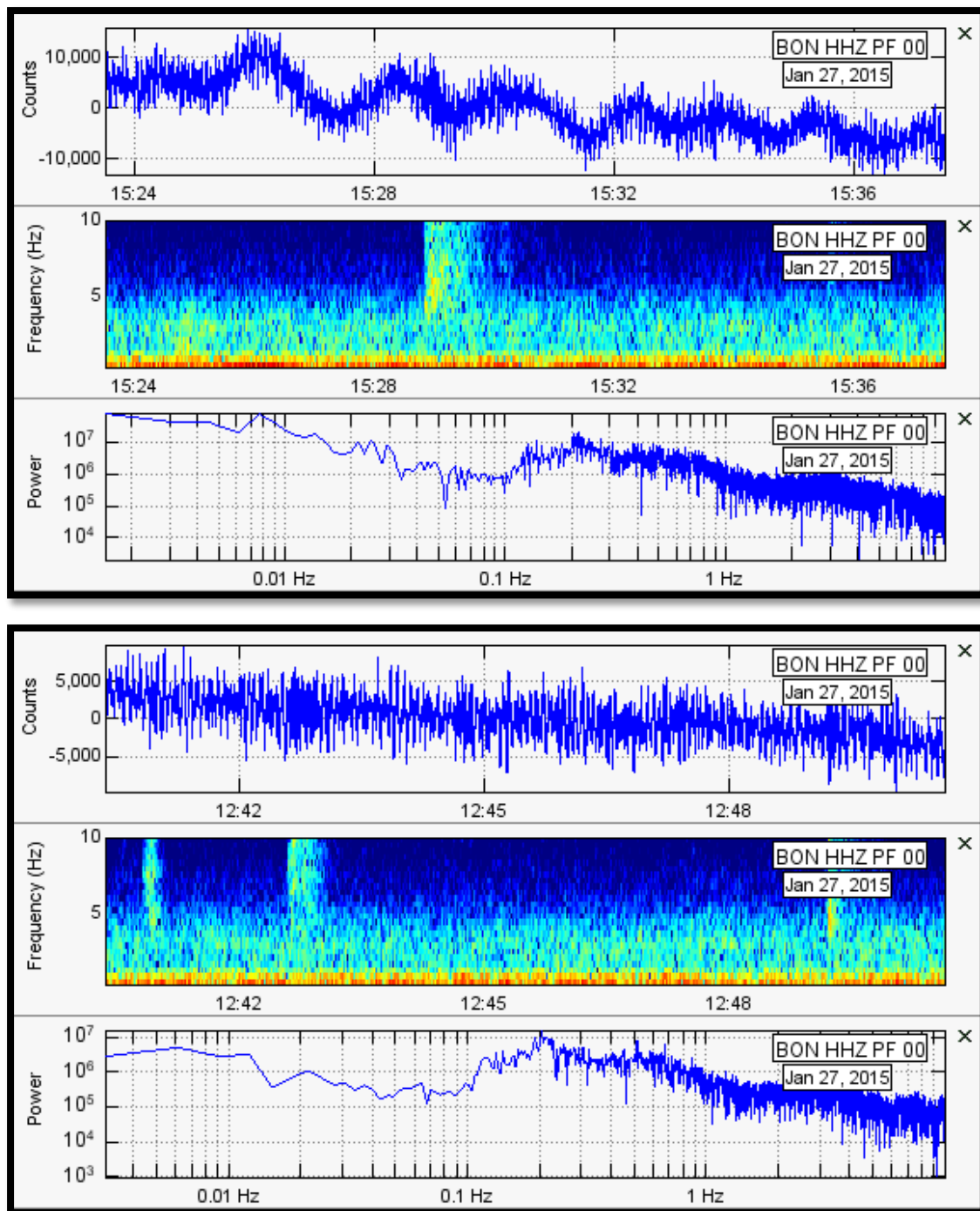
Εικόνα 58. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



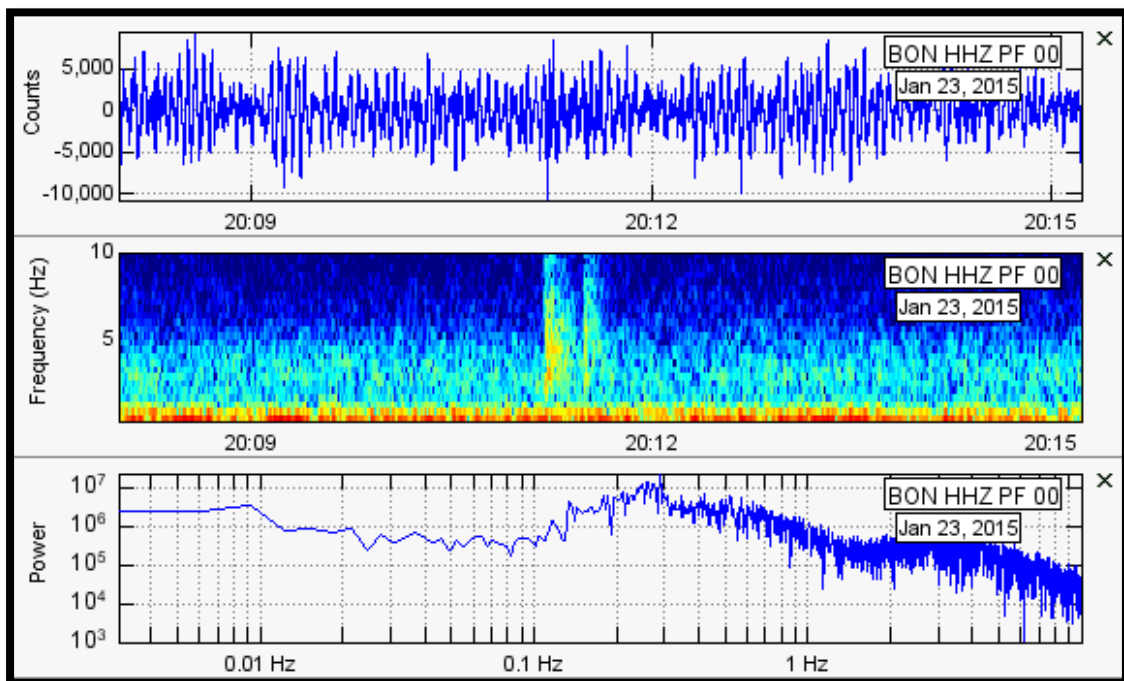
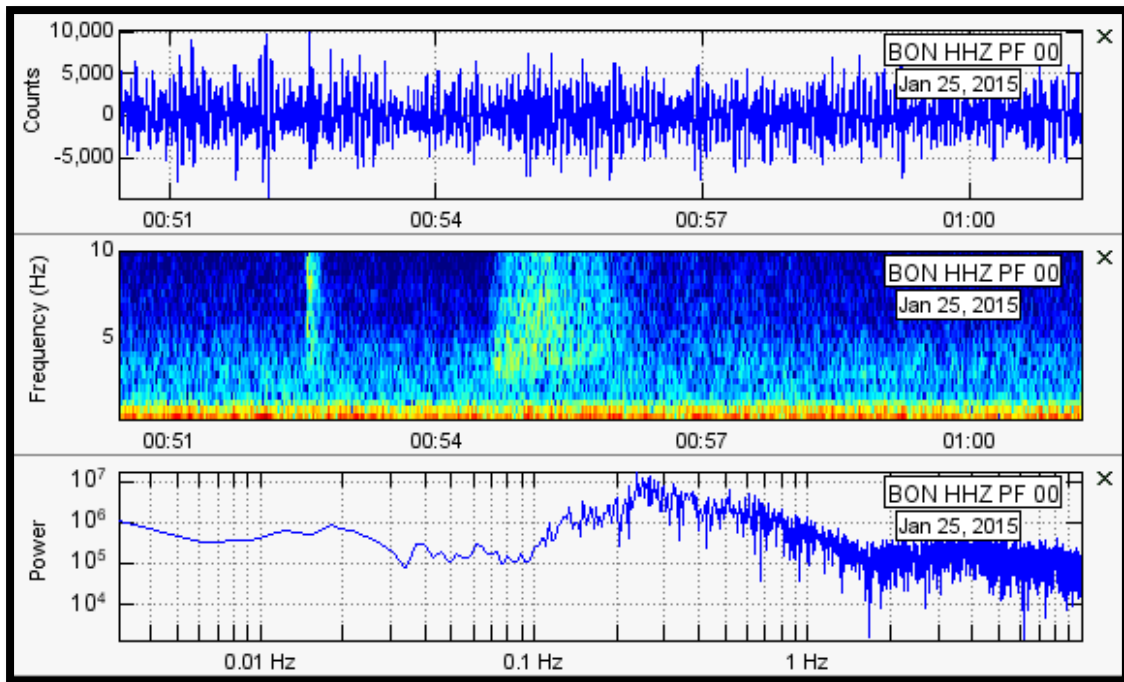
Εικόνα 59. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



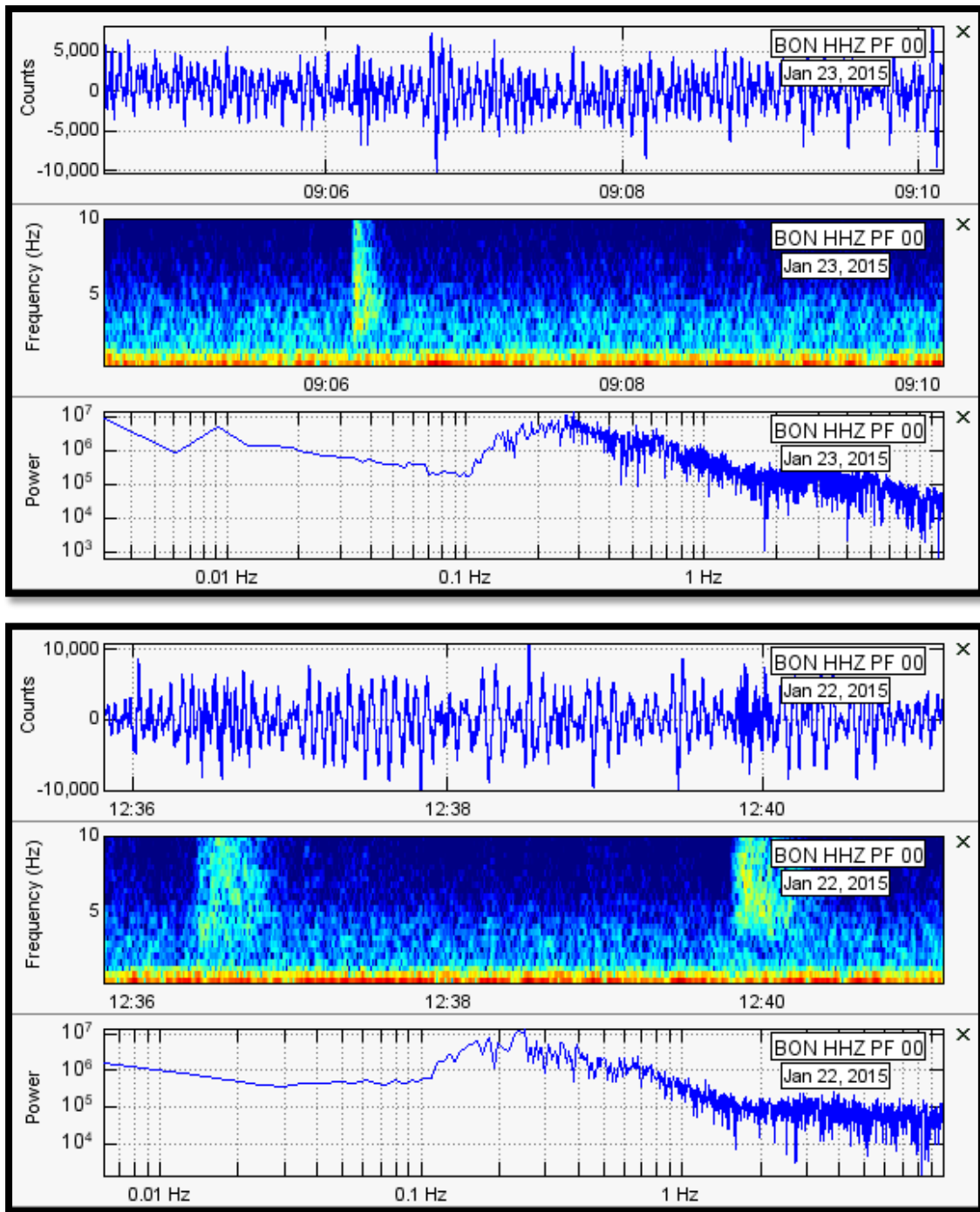
Εικόνα 60. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



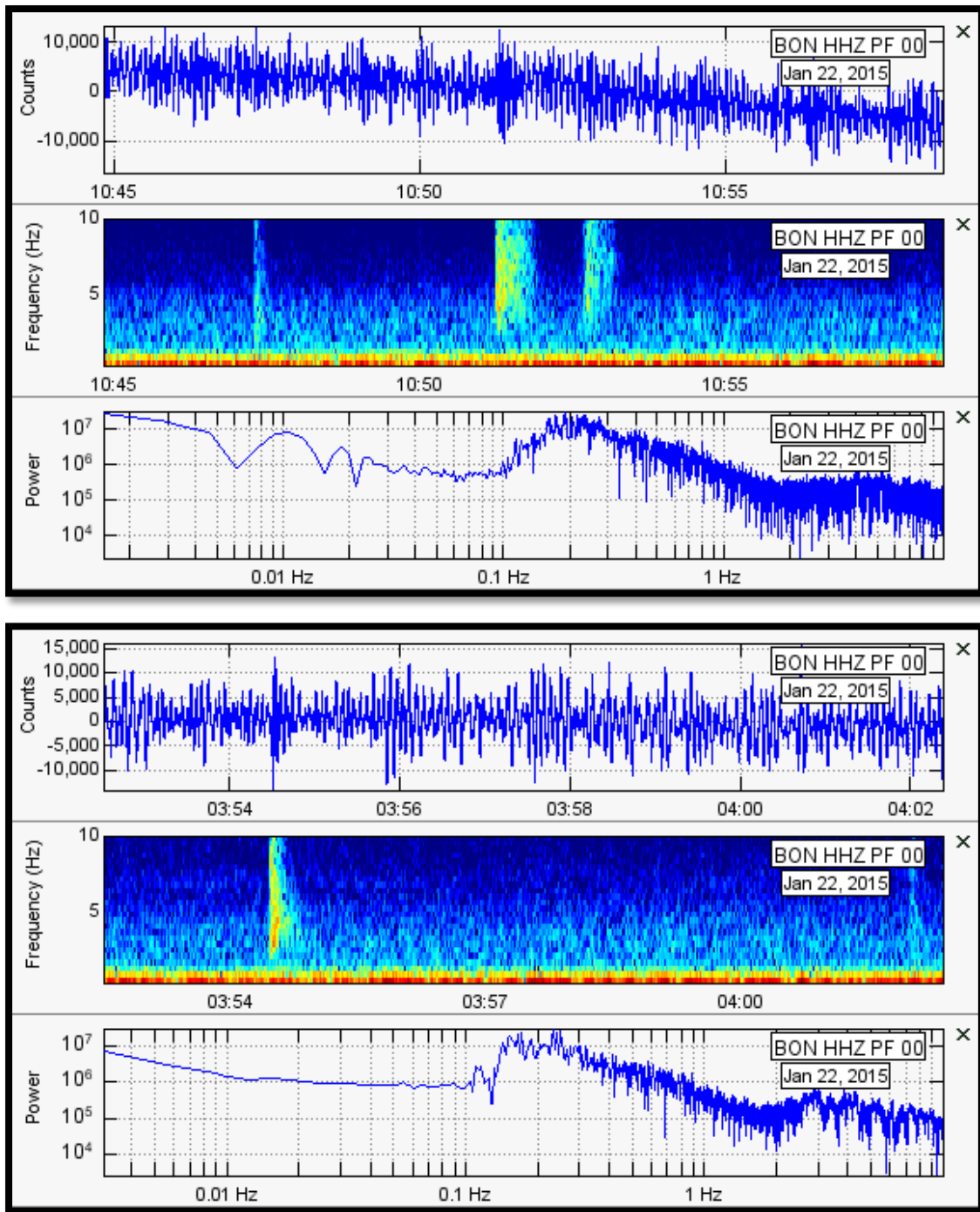
Εικόνα 61. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



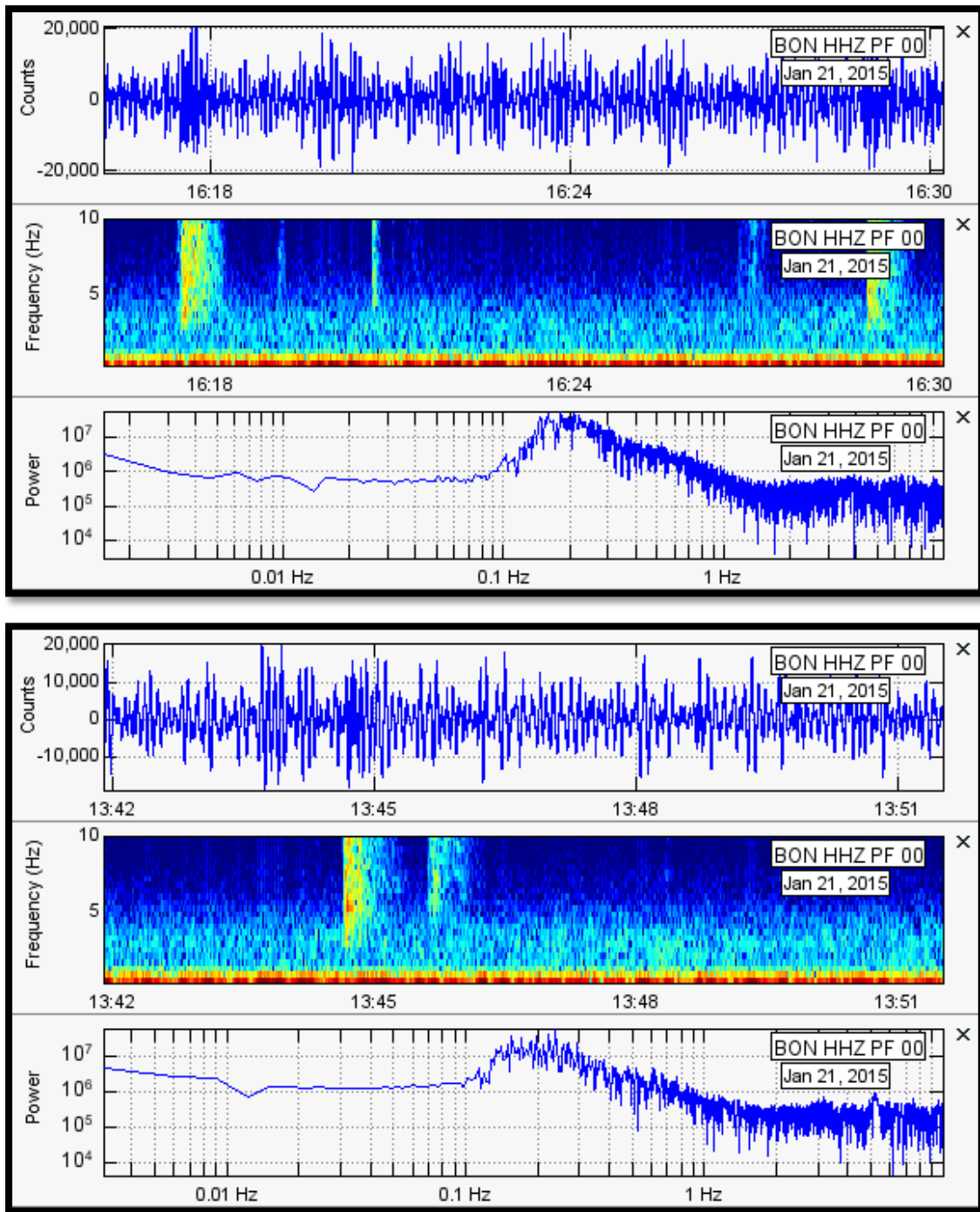
Εικόνα 62. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



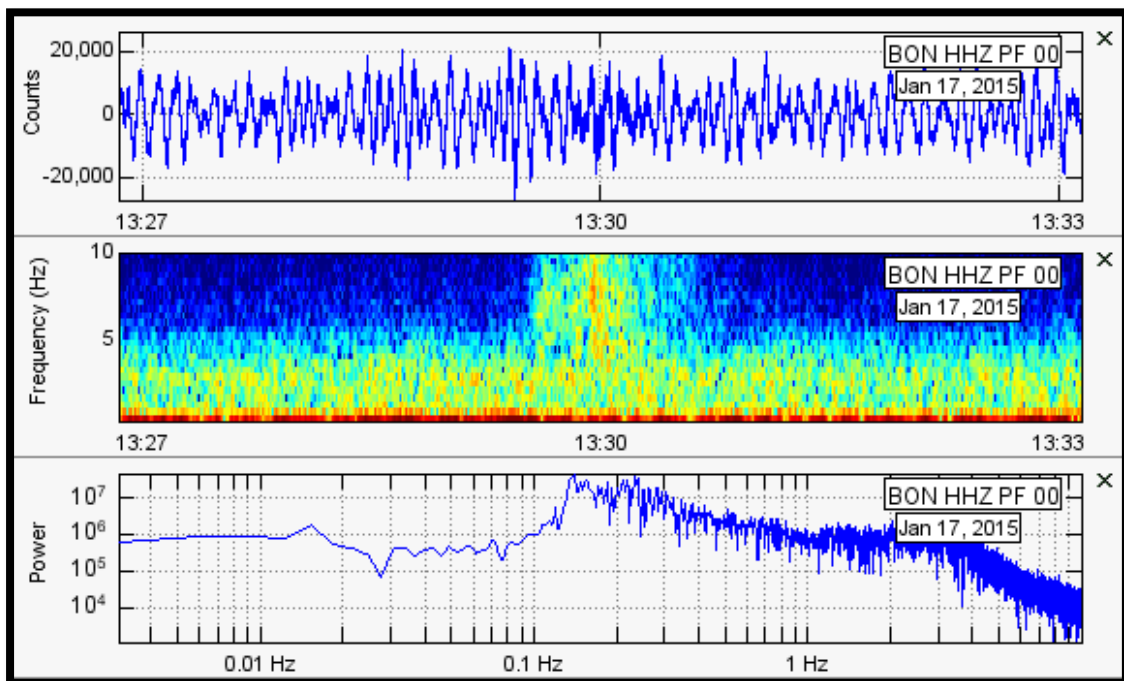
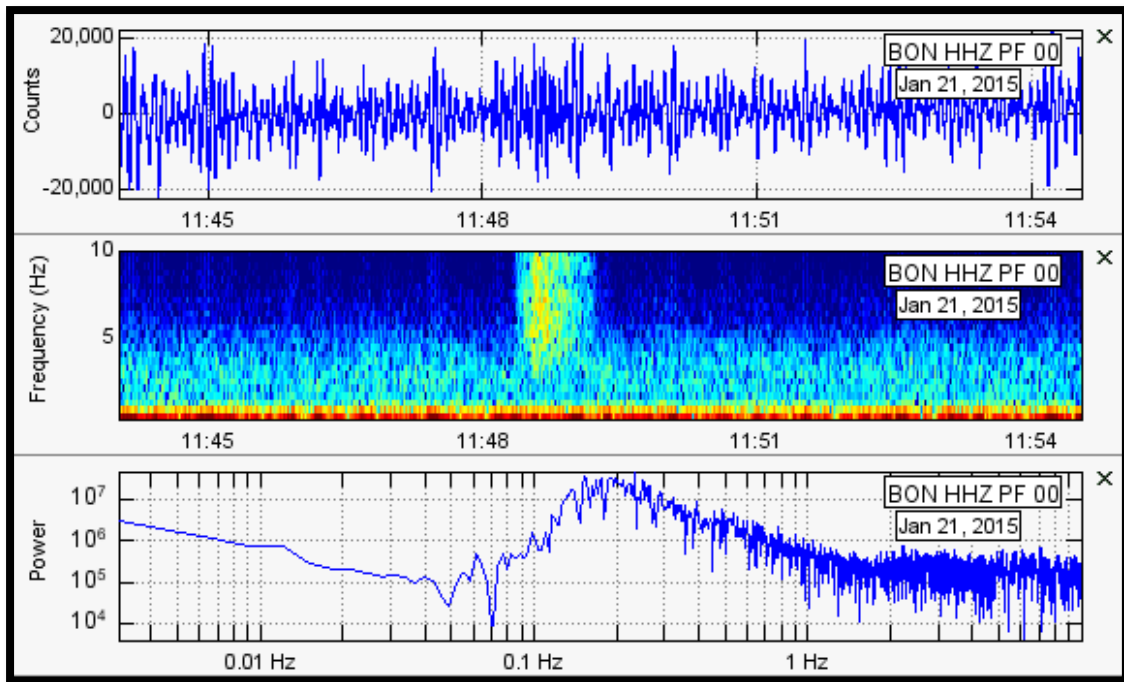
Εικόνα 63. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



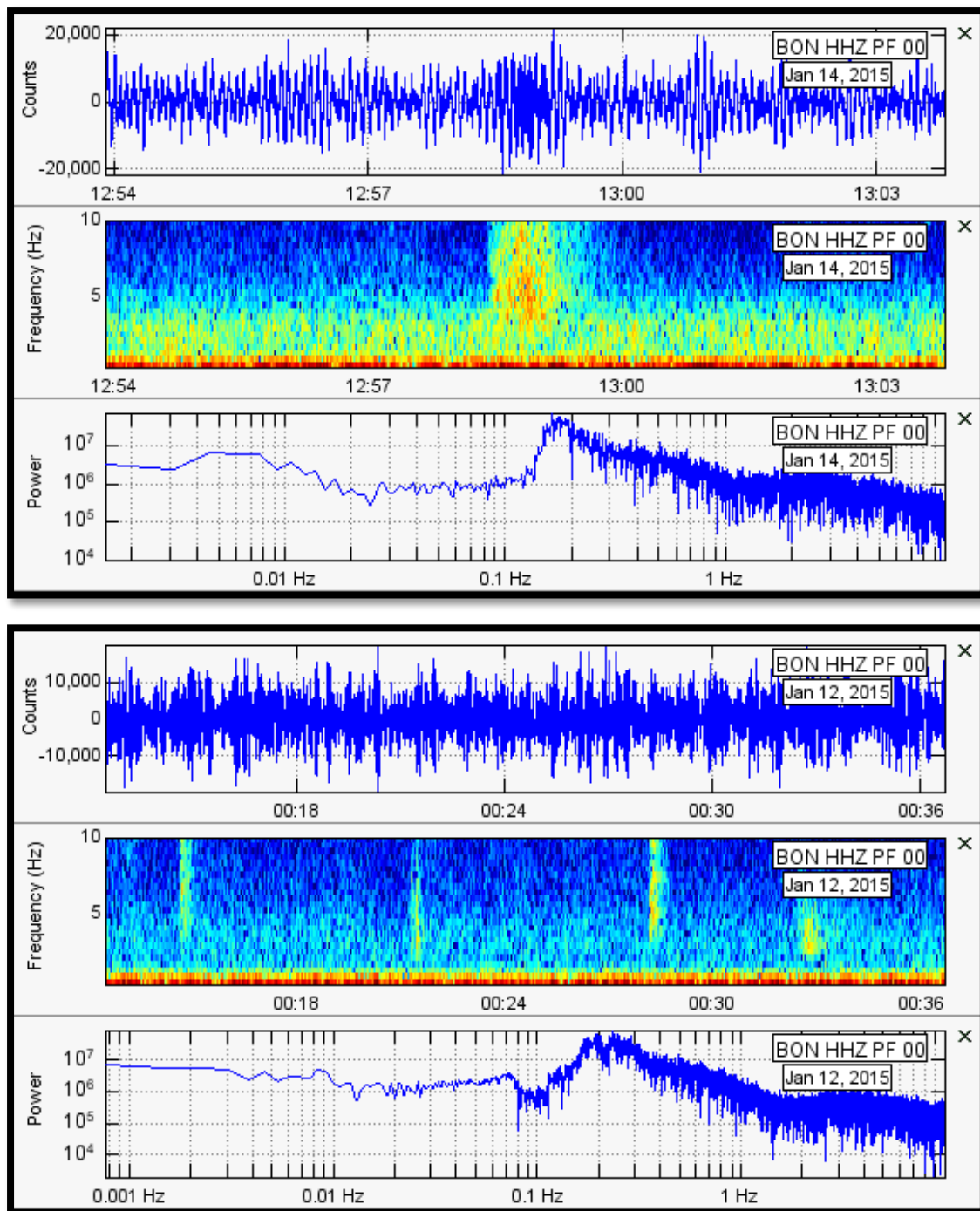
Εικόνα 64. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



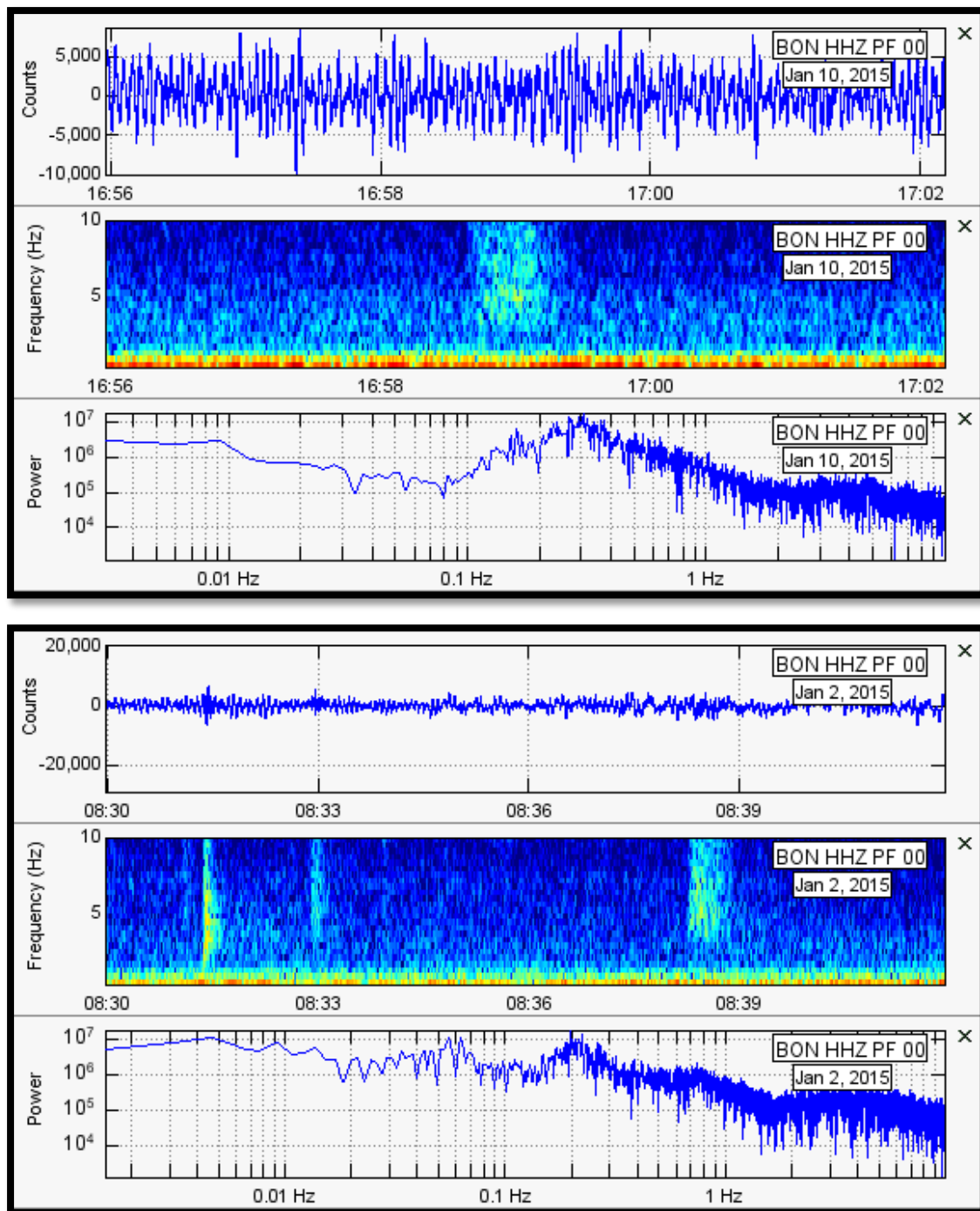
Εικόνα 65. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



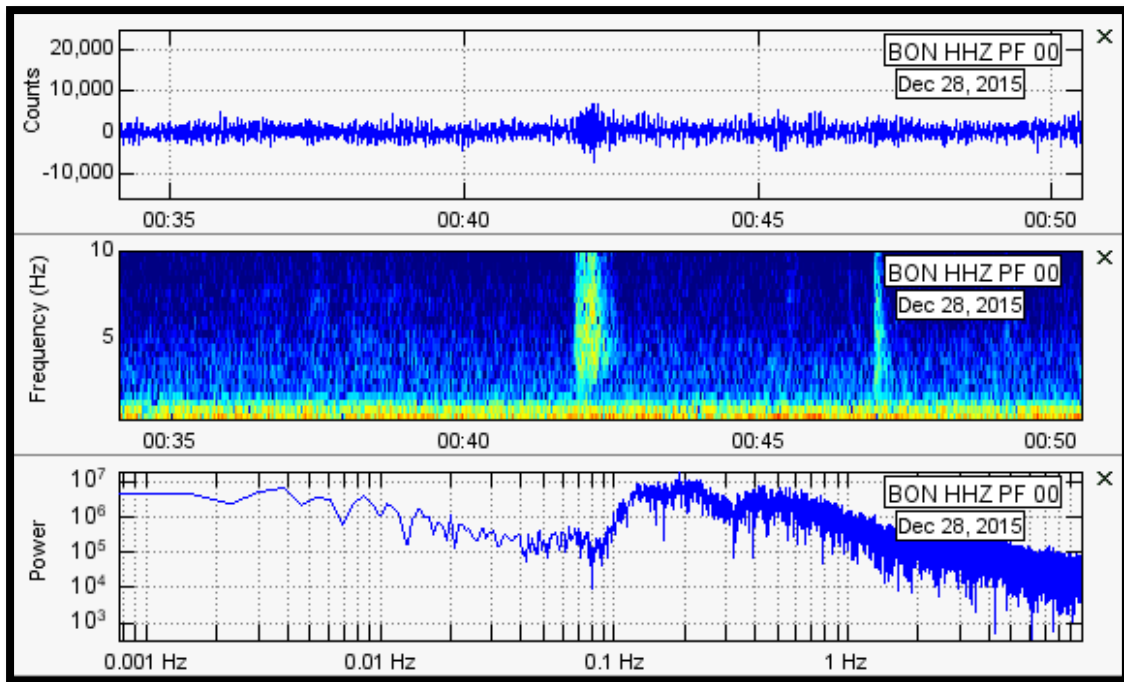
Εικόνα 66. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



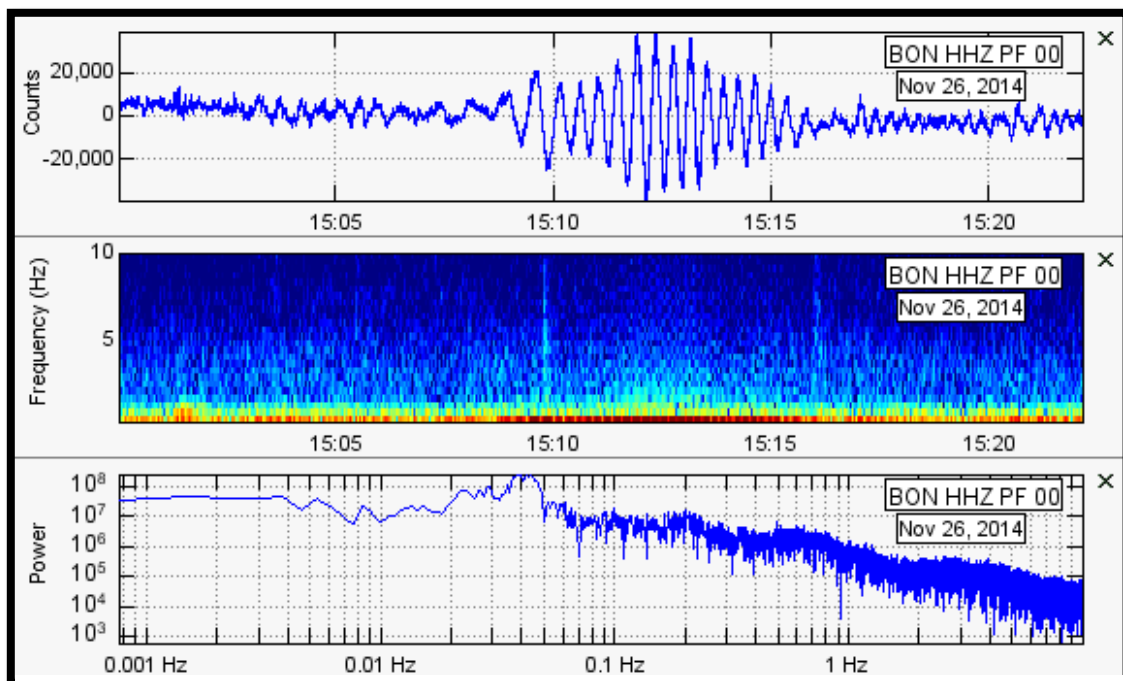
Εικόνα 67. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



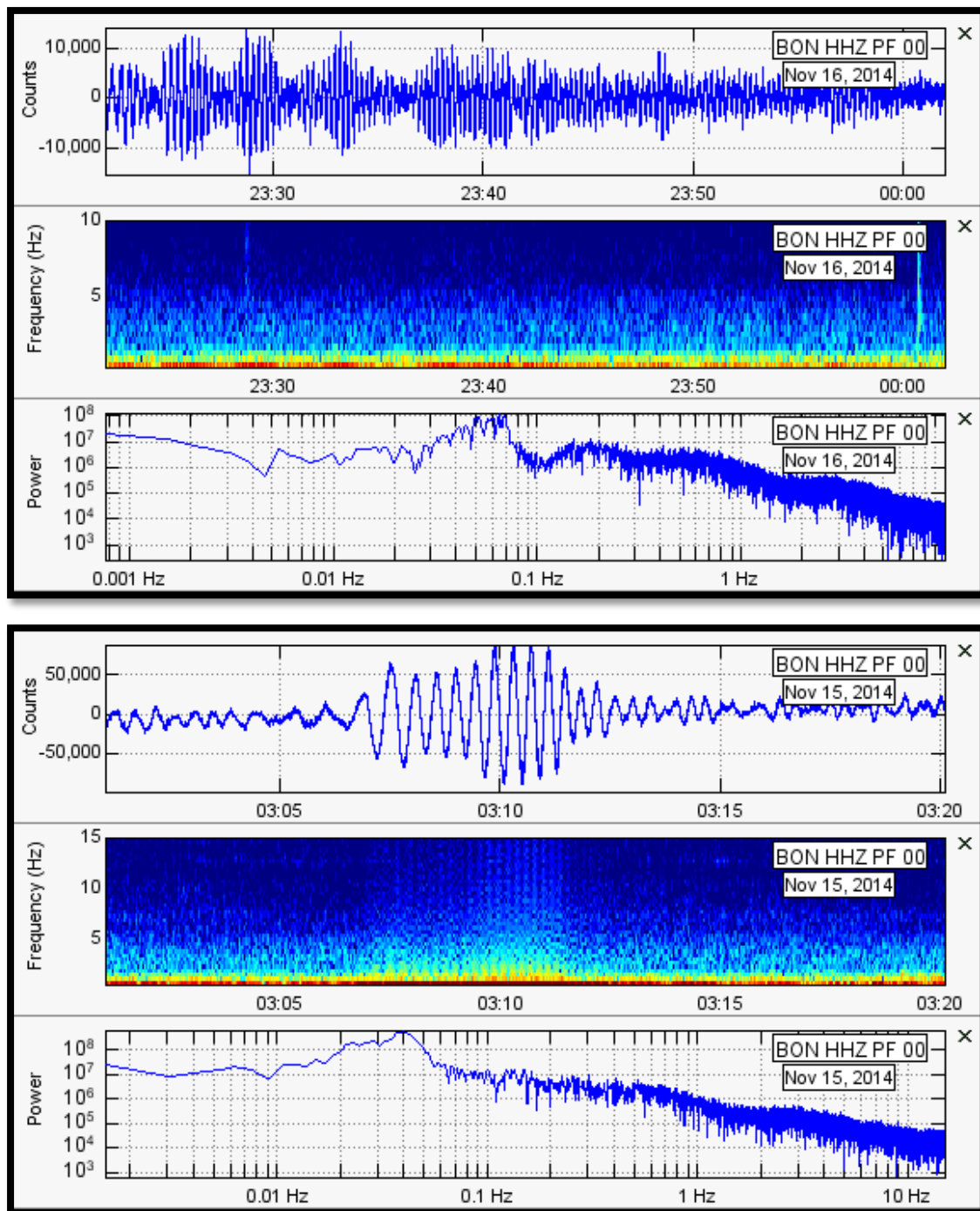
Εικόνα 68. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



Εικόνα 69. Παραδείγμα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.



Εικόνα 70. Παράδειγμα Κατηγορίας 5 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2Hz.



Εικόνα 71. Παραδείγματα Κατηγορίας 5 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2 Hz.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Δομή Ηφαιστείου και πιθανοί κίνδυνοι (Πηγή: http://history-pages.blogspot.gr/2012/08/blog-post.html)	5
Εικόνα 2. Ενεργά Ηφαιστεια (Πηγή:USGS).....	6
Εικόνα 3. Αριστερά-Κάθετη τομή Ασπιδόμορφου ηφαιστείου. Δεξιά-Ηφαιστειο Mauna Loa, Χαβάη.	7
Εικόνα 4.Αριστερά-Κάθετη τομή στρωματοηφαιστειου. Δεξιά-MountFuji, Ιαπωνία.	8
Εικόνα 5.Ηφαιστειακοί Δόμοι στο εσωτερικό κρατήρα (Πηγή:USGS).....	9
Εικόνα 6. Υψίσυχνος σεισμός μαζί με το φασματογράφημά του καταγεγραμμένος στο ηφαιστειο Merapi στην Ινδονησία. Η χρωματική κλίμακα στο φασματογράφημα αντιπροσωπεύει το κανονικοποιημένο πλάτος φάσματος.	11
Εικόνα 7. Χαμηλόσυχνος ηφαιστειακός σεισμός καταγεγραμμένος σε δυο διαφορετικές περιοχές στο ηφαιστειο Redoubt στην Αλάσκα.	11
Εικόνα 8. Υβριδικό σήμα που καταγράφηκε στο ηφαιστειο Redoubt 8 Km μακριά από τον κρατήρα.....	12
Εικόνα 9. Ένας σεισμός έκρηξης που καταγράφηκε στο ηφαιστειο Stromboli στην Ιταλία. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή υποδηλώνει την άφιξη του κρουστικού κύματος στα 5 Hz.	12
Εικόνα 10. α)Σεισμός VLP που καταγράφηκε στο ηφαιστειο Catoraχί του Εκουαδόρ. β)Το φασματογράφημα του παραπάνω σεισμού.....	13
Εικόνα 11. Αρμονική ηφαιστειακή δόνηση καταγεγραμμένη στο ηφαιστειο Semeru στην Ινδονησία. Μπορούν να διακριθούν έως 6 αρμονικές αρχίζοντας από την κυρίαρχη συχνότητα στο 1 Hz περίπου.....	14
Εικόνα 12. Το ηφαιστειο PitondelaFournaise στον Παγκόσμιο χάρτη (Πηγή: GoogleMaps).	16
Εικόνα 13. Το ηφαιστειο PitondelaFournaise στην νήσο Reunion (Πηγή: GoogleMaps).	16
Εικόνα 14. Κρατήρας Dolomieux εντός της νεότερης καλδέρας (Πηγή: GoogleEarth).	17
Εικόνα 15. Κρατήρας Dolomieux (Πηγή:Google Earth-Damour Nicolas Antonn).....	17
Εικόνα 16. Τοπογραφικός χάρτης του PitondelaFournaise με τις ονομασίες κρατήρων και καλδέρων (Πηγή: https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020#bgvn_201502).....	24
Εικόνα 17. Καλδέρα Enclos Fouqué (Πηγή: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fournaise_rempart_Enclos_Fouqu%C3%A9.JPG).	25
Εικόνα 18. Έκρηξη 4ης Φεβρουαρίου του 2015 (Πηγή: https://lakazkozkoze.com/?p=31927&lang=en-Pierre Choukroun).	25
Εικόνα 19. Έκρηξη 4ης Φεβρουαρίου του 2015 (Πηγή: https://fournaise.info/eruption-4-fevrier-2015/).	26
Εικόνα 20. Ροή λάβας μετά την 8η Φεβρουαρίου (Πηγή: https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233020#bgvn_201502).	27
Εικόνα 21. Η νήσος Reunion αι οι θέσεις των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν (Πηγή: GoogleEarth).....	28
Εικόνα 22. Οι θέσεις των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν πάνω στο ηφαιστειο PitondelaFournaise (Πηγή: GoogleEarth).....	29
Εικόνα 23. Παράδειγμα Κατηγορίας 1(1-2,5 Hz).	30
Εικόνα 24. Παράδειγμα Κατηγορίας 2(2-7 Hz).	31
Εικόνα 25. Παράδειγμα Κατηγορίας 3(3-8 Hz).	31
Εικόνα 26. Παράδειγμα Κατηγορίας 4(2->10 Hz).	32
Εικόνα 27. Παράδειγμα Κατηγορίας 5(1-2 Hz).	32

Εικόνα 56. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	67
Εικόνα 57. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	68
Εικόνα 58. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	69
Εικόνα 59. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	70
Εικόνα 60. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	71
Εικόνα 61. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	72
Εικόνα 62. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	73
Εικόνα 63. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	74
Εικόνα 64. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	75
Εικόνα 65. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	76
Εικόνα 66. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	77
Εικόνα 67. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	78
Εικόνα 68. Παραδείγματα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	79
Εικόνα 69. Παραδείγμα Κατηγορίας 4 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 2- >10 Hz.	80
Εικόνα 70. Παράδειγμα Κατηγορίας 5 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2 Hz.	80
Εικόνα 71. Παραδείγματα Κατηγορίας 5 των LF και Tremors σημάτων, όπου η ενέργεια του φάσματος εκτείνεται σε ένα πλάτος συχνότητας από 1-2 Hz.	81

Πίνακας Εξισώσεων

Εξίσωση 1. Εξίσωση υπολογισμού μεγέθους χρονικής διαρκείας M_d	36
Εξίσωση 2. Εξίσωση RMS.	36
Εξίσωση 3. Εξίσωση υπολογισμού ERH.	37

Πίνακας Χαρτών

Χάρτης 1. Οι θέσεις και το υποκεντρικό βάθος των σεισμών έπειτα από την ανάλυση στο νησί Reunion.	34
Χάρτης 2. Οι θέσεις και το υποκεντρικό βάθος των σεισμών έπειτα από την ανάλυση στο νησί Reunion, στο ηφαίστειο PitondelaFournaise.	35
Χάρτης 3. Οι θέσεις και το μέγεθος των σεισμών έπειτα από την ανάλυση στο νησί Reunion, στο ηφαίστειο Piton de la Fournaise.....	36