

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра космічної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Леонід ЧОРНОГОР

“ 30 ” листопада 2025 року

Кваліфікаційна робота магістра
на тему:

**«Характеристики інфразвукових сигналів,
згенерованих вибухом супервулкана Тонга 15 січня 2022 р.»**

Виконала: студентка II курсу магістратури, група РР-66
Спеціальності 105 Прикладна фізики та наноматеріали
Освітньо-професійна програма Радіофізика і електроніка

Барабанова Дарина В'ячеславівна

Керівник: доцент кафедри космічної радіофізики,
старший науковий співробітник,
Шевелев Микита Богданович



Харків 2025

УДК 534.321.8

Барабанова Д. В. Характеристики інфразвукових сигналів, згенерованих вибухом супервулкана Тонга 15 січня 2022 р. / Д. В. Барабанова. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2025. – 41 с.

У даній роботі представлено системний аналіз наукових даних щодо поширення інфразвукових коливань, згенерованих як природними, так і антропогенними джерелами. Сфокусовано увагу на висвітленні результатів емпіричних спостережень акустичних явищ, які виникли внаслідок потужного виверження супервулкану Тонга. Ці дані було отримано за допомогою вимірювальної інфраструктури української мережі моніторингових станцій. Було встановлено ключові параметри зареєстрованого інфразвукового сигналу. На основі системного спектрального аналізу отриманих сигналів виконано розрахункову оцінку характеристик збурень, які виникають у радіоканалі атмосфери.

19 іл., 1 табл., 25 бібл., 46 с.

Barabanova D. V. Characteristics of infrasound signals generated by the Tonga supervolcano eruption on January 15, 2022 / D. V. Barabanova. – Kharkiv, Kharkiv V. N. Karazin National University, 2025. – 79 p.

This master's thesis presents a system analysis of scientific data on the propagation of infrasound oscillations generated by both natural and anthropogenic sources. The focus is on highlighting the results of empirical observations of acoustic phenomena that arose as a result of the powerful eruption of the Tonga supervolcano. These data were obtained using the measuring infrastructure of the Ukrainian network of monitoring stations. The key parameters of the registered infrasound signal were established. Based on the systematic spectral analysis of the received signals, a calculated assessment of the characteristics of disturbances that arise in the atmospheric radio channel was performed.

19 Figures, 1 Tables, 25 References, 46 p.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	6
1.1. Загальні відомості	6
1.2 Інфразвукові ефекти	7
1.3 Джерела інфразвуку	9
1.3.1 Природні джерела	9
1.3.2 Антропогенні джерела	12
1.4 Використання інфразвуку у сейсмології	13
1.5 Методи обробки інфразвукових сигналів	18
РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ ОБРОБКИ	21
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	29
3.1 Результати попередньої обробки фільтрації	29
3.2. Результати смугової фільтрації	31
3.3. Результати системного спектрального аналізу	33
ВИСНОВКИ	40
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	44

ВСТУП

Дослідження інфразвуку — коливань, що перебувають за межами чутності людського вуха, — є значущим через його широкий спектр застосування. Вивчення інфразвуку сприяє отриманню глибинного розуміння природних процесів та відкриває перспективи для нових розробок [1].

Джерела інфразвукових (акустичних) ефектів є численними і можуть бути класифіковані як ті, що мають природне походження, так і ті, що виникають внаслідок діяльності людини (антропогенне походження).

Джерела звуку природного походження

Природа є невичерпним генератором різноманітних звукових явищ. Ключові природні джерела звуку можна систематизувати таким чином:

- **Атмосфера:** Вітер, грозові розряди, дощ і град — формують широкий акустичний діапазон, від тихого шелесту до інтенсивного гуркоту.
- **Водна стихія (Гідросфера):** Звукові пейзажі, що створюються шумом хвиль, водоспадами та рухом льодовиків.
- **Біоакустика:** Звуки, що видаються живими організмами (від птахів до комах), які є важливими для комунікації та виживання.
- **Геологічні явища:** Потужні звукові та сейсмічні хвилі, які є наслідком землетрусів, вивержень вулканів та обвалів.

Джерела звуку антропогенного походження

Господарська діяльність людини генерує велику кількість **штучних звуків** і вібрацій. До основних джерел, створених людиною, належать:

- **Транспортні засоби:** Основне джерело **шумового забруднення** у населених пунктах (автомобілі, залізничний транспорт, авіація, морські судна).
- **Виробництво та промисловість:** Шум, що виникає при роботі промислових підприємств, машин та устаткування.

- **Інфраструктура та побут:** Акустичні ефекти від роботи комунальних систем (вентиляції, кондиціонування) та побутових приладів.
- **Будівельні роботи:** Інтенсивний шум, пов'язаний з використанням будівельної техніки та інструментів.

Дослідження інфразвуку є критично важливим для атмосферної фізики. Аналіз інфразвукових хвиль дає змогу дистанційно вивчати процеси у верхніх шарах атмосфери, зокрема, визначати висотні профілі температури та швидкості атмосферного вітру. Крім того, вивчення поглинання та розсіювання цих хвиль дозволяє оцінити інтенсивність турбулентних процесів.

Проблематиці впливу джерел інфразвуку та особливостям його поширення присвячено низку фундаментальних праць [1, 2], а також значний масив оглядових та експериментальних статей [3–30].

Об'єкт дослідження – інфразвук, який поширюється в атмосфері та іоносфері як фізичне явище.

Предмет дослідження – статистичні характеристики інфразвукових сигналів і потужних геофізичних явищ як низькочастотних джерел.

Методи досліджень – експериментальне вимірювання та комп'ютерне моделювання. Для аналізу статистичних характеристик сигналів та джерел застосовувалися методи математичної статистики та статистичної радіофізики.

Мета роботи – встановлення головних характеристик інфразвукового сигналу, який був згенерований вибухом супервулкану Тонга; дослідження варіацій низькочастотного сигналу на станціях інфразвукової мережі, розташованих в різних півкулях.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальні відомості

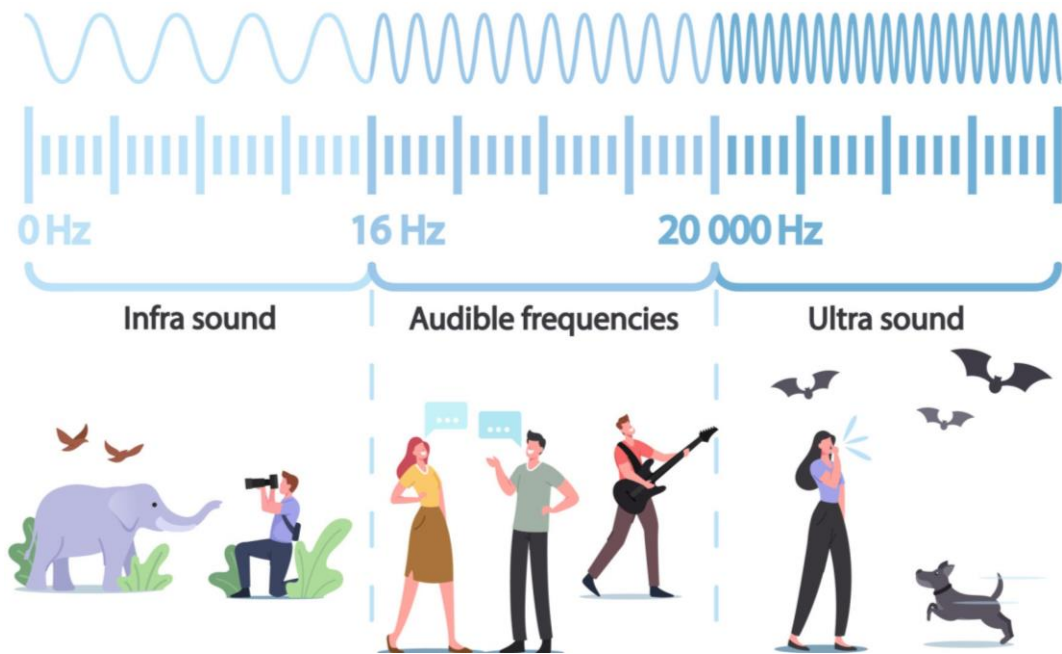
Для поглибленого розгляду інфразвукових явищ необхідно дати чітке визначення цьому феномену.

Інфразвуком називають акустичні коливання, частота яких лежить нижче порогу чутності людського вуха (як правило, нижче 20 Гц). Незважаючи на те, що інфразвук не розпізнається слуховою системою людини, він є невід'ємною складовою широкого спектра акустичних явищ і відіграє важливу роль у багатьох природних процесах. Сучасна наука дозволяє ефективно реєструвати та досліджувати ці коливання, що має значні технічні застосування.

Акустичні ефекти — це сукупність явищ, пов'язаних із генерацією, поширенням та взаємодією звукових хвиль (або акустичних коливань) із середовищем. Ці ефекти мають широкий діапазон проявів, виникаючи як унаслідок природних процесів, так і в результаті антропогенної діяльності [3].

Інфразвук правомірно класифікується як акустичний ефект на основі низки фізичних ознак, що об'єднують його зі звуковими хвилями (чутним діапазоном). До цих ознак належать:

- **Механічна природа коливань:** Інфразвук є прямим результатом механічних коливань частинок середовища (газу, рідини або твердого тіла). Ці коливання поширюються у формі хвиль стиснення та розрідження.
- **Спільність фізичної сутності:** Незважаючи на те, що частотний діапазон інфразвуку $f < 20$ Гц знаходиться поза межами чутності людини, він належить до того самого фізичного явища, що й чутний звук — поздовжніх звукових хвиль.



- Закономірності поширення: Як і чутний звук, інфразвукові хвилі поширюються в різних середовищах із певною швидкістю, яка безпосередньо залежить від пружних властивостей та густини цього середовища.
- Взаємодія з матерією: Інфразвук зберігає здатність до взаємодії з матеріалами, що проявляється у виклику їхньої резонансної вібрації, поглинанні або деформації.

З огляду на ці фундаментальні подібності, перейдемо до детального розгляду інфразвуку та його специфічних ефектів.

Інфразвук вважається акустичним ефектом за декількома ознаками, а саме:

- **Механічна природа коливань:** Інфразвук являє собою механічні хвилі, які виникають внаслідок коливань частинок пружного середовища (повітря, води, твердих тіл). Ці коливання поширюються у вигляді хвиль стиснення та розрідження.
- **Частотний діапазон:** Хоча інфразвук має нижчу частоту, ніж звук, який ми чуємо (менше 20 Гц), він все ж належить до того ж фізичного явища – звукових хвиль.

- **Поширення в середовищі:** Інфразвук, як і звук, поширюється в різних середовищах зі швидкістю, яка залежить від властивостей цього середовища.
- **Взаємодія з матеріалами:** Інфразвук може взаємодіяти з матеріалами, викликаючи їх вібрацію або деформацію.

Розглянемо детальніше інфразвук та інфразвукові ефекти.

1.2 Інфразвукові ефекти

Інфразвук — це пружні звукові хвилі з частотою, що знаходиться нижче порогу чутності людського вуха, зазвичай нижче 16–20 Гц. Незважаючи на свою нечутність, інфразвук має значний вплив на біологічні системи та відіграє важливу роль у моніторингу навколишнього середовища [3].

Розглянемо **наукову цінність інфразвуку** на прикладі дослідження [4], присвяченого складним **динамічним процесам у верхніх шарах атмосфери Землі**. У цій статті описано метод дослідження **гравітаційних хвиль** — ключових елементів для розуміння атмосферної динаміки.

Інфразвук слугує у цьому дослідженні своєрідним атмосферним зондом для вивчення характеристик гравітаційних хвиль у середній атмосфері.

Основні причини використання інфразвуку:

1. Велика дальність поширення:
 - Інфразвукові хвилі здатні поширюватися на тисячі кілометрів у атмосфері. Це дозволяє реєструвати їхнє проходження на великих відстанях від джерела, що робить його ідеальним для глобального моніторингу.
2. Слабке атмосферне поглинання:
 - На відміну від високочастотних звукових хвиль, інфразвук менше поглинається атмосферою, що дозволяє йому ефективно проникати у верхні шари (мезосферу та термосферу).

3. Взаємодія з гравітаційними хвилями:

○ При зустрічі з гравітаційною хвилею інфразвукова хвиля вступає з нею у взаємодію, що призводить до змін її власних характеристик (амплітуди, фази, напрямку). Аналіз цих змін дозволяє вченим отримати діагностичну інформацію про властивості та параметри гравітаційних хвиль.

Використання інфразвуку для діагностики атмосферних гравітаційних хвиль

Інфразвукова акустика застосовується як діагностичний зонд для дослідження атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) у середній атмосфері. Цей метод ґрунтується на аналізі змін характеристик інфразвукового сигналу внаслідок взаємодії з АГХ.

Основні етапи дослідження варіацій

1. Генерація інфразвукового імпульсу:

Для дослідження використовують потужні інфразвукові імпульси, які генеруються великомасштабними природними явищами (наприклад, вулканічні виверження, землетруси) або контрольованими вибухами. Ці імпульси поширюються у тропосфері та стратосфері.

2. Взаємодія в середній атмосфері та іоносфері:

Під час проходження крізь середню атмосферу (стратосферу та мезосферу) інфразвукові хвилі взаємодіють з наявними гравітаційними хвилями. Ця взаємодія призводить до модуляції інфразвукового сигналу, змінюючи його форму, амплітуду та фазу.

3. Реєстрація модульованого сигналу:

Змінені інфразвукові сигнали реєструються спеціалізованими інфразвуковими станціями (мікробарометрами), розташованими на земній поверхні.

4. Аналіз та інтерпретація даних:

Отримані дані піддаються складному математичному аналізу та обробці за допомогою числових моделей. Це дозволяє виділити та інтерпретувати специфічні зміни, спричинені АГХ.

Аналіз інфразвукових даних дозволяє отримати важливі параметри АГХ:

Просторовий розподіл та інтенсивність АГХ: визначення областей генерації та найбільшої активності гравітаційних хвиль.

Швидкість поширення АГХ: вимірювання цієї швидкості дозволяє оцінити температурний профіль та склад атмосфери на різних висотах проходження хвилі.

Період та амплітуда: визначення цих характеристик є критично важливим для оцінки енергії та імпульсу, які переносяться гравітаційними хвилями в атмосфері.

Вивчення гравітаційних хвиль за допомогою інфразвуку має високе наукове та практичне значення:

- Розуміння атмосферних процесів: гравітаційні хвилі є ключовим механізмом вертикального переносу енергії та імпульсу в атмосфері, впливаючи на загальну циркуляцію.
- Удосконалення прогнозування погоди: точніше знання про динаміку АГХ дозволяє вдосконалити чисельні моделі прогнозу погоди, особливо для середньо- та довгострокових прогнозів.
- Дослідження кліматичних змін: АГХ опосередковано впливають на температурний режим та циркуляцію у верхній атмосфері, що робить їх важливим фактором у моделях глобальних кліматичних змін.

Висновки:

Аналіз інфразвукових даних дозволяє отримати важливі параметри гравітаційних хвиль: просторовий розподіл та інтенсивність акустико-гравітаційних хвиль, що дає можливість для визначення області генерації та найбільшої активності гравітаційних хвиль; швидкість поширення АГХ, що дозволяє оцінити температурний профіль та склад атмосфери на різних висотах проходження хвилі; період та амплітуду: визначення цих характеристик є критично важливим для оцінки енергії та імпульсу, які переносяться гравітаційними хвилями в атмосфері.

1.3 Джерела інфразвуку

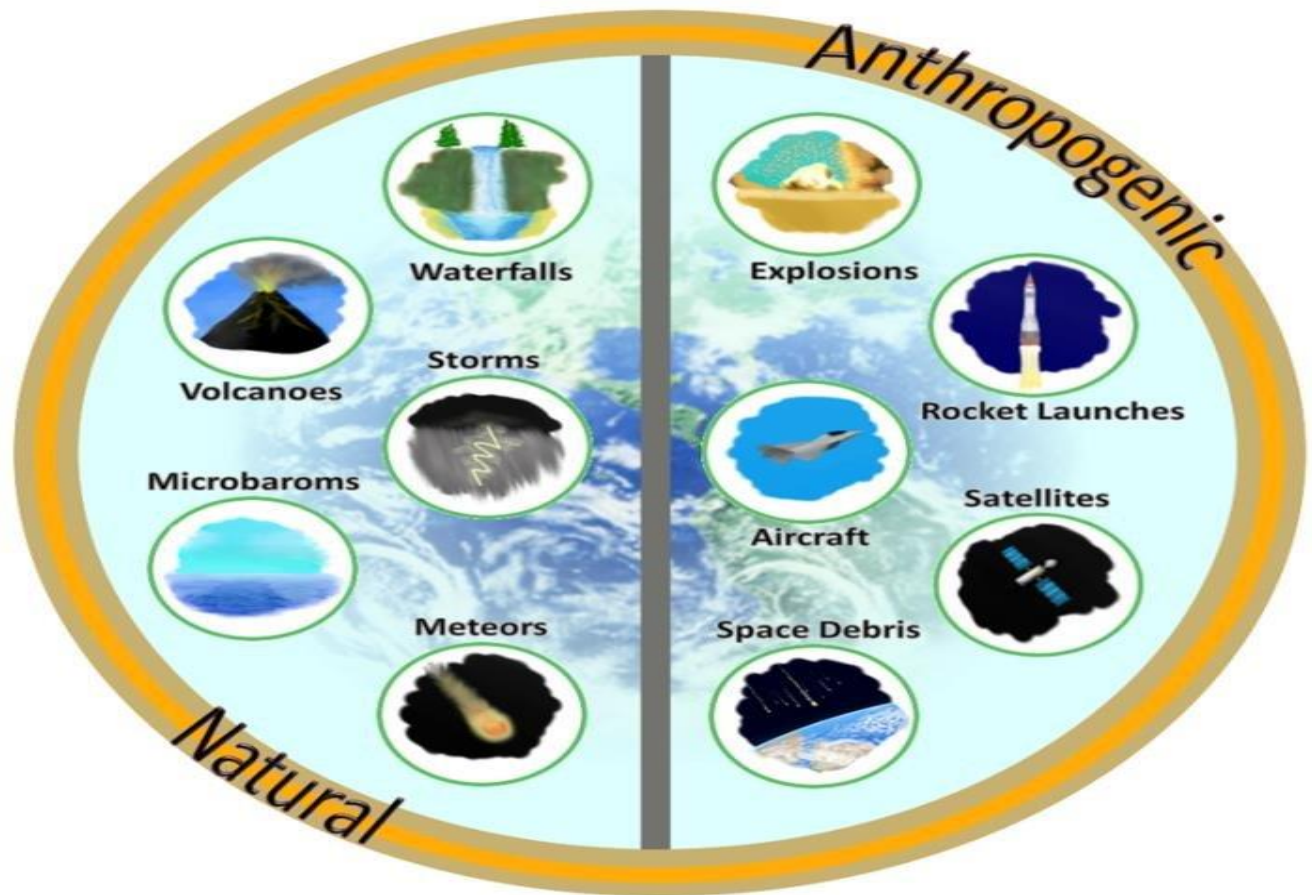


Рис 1.1 Приклади джерел інфразвуку
 [https://www.researchgate.net/figure/Sources-of-infrasound_fig4_263619765]

1.3.1 Природні джерела

Інфразвук виникає внаслідок низки природних явищ, до яких належать суворя погода, лавини, виверження вулканів, землетруси, водоспади, полярні сяйва, відколювання айсбергів, падіння метеорів та блискавки у верхніх шарах атмосфери. Поширені інфразвукові вібрації – **мікробароми** – мають частоту приблизно 0.2 Гц і є результатом нелінійних взаємодій океанських хвиль під час штормів. Інфразвукові системи можуть використовуватися для ідентифікації лавин у Скелястих горах, а

також для виявлення торнадо на великих рівнинах за кілька хвилин до їхнього виходу на сушу, як це реалізовано, наприклад, у програмі інфразвуку NOAA [5].

Інфразвукові та ультразвукові хвилі застосовуються тваринами для спілкування. Інфразвук використовують такі тварини, як кити, слони, бегемоти, жирафи та пави.

Інфразвук належить до звуку з низькими частотами, які знаходяться нижче діапазону чутності людини, що зазвичай становить близько 20 Гц. Тварини, що спілкуються за допомогою інфразвуку, мають нижчу чутливість порівняно з людьми, і їхні сенсорні органи вловлюють хвилі нижче 20 Гц. Водні тварини (наприклад, дельфіни та кити) потребують хвиль високої інтенсивності, оскільки звукові хвилі важче поширюються у воді. Як приклад, суматранський носоріг, як було показано, видає звуки з дуже низькими частотами, близькими до 3 Гц, що подібні до пісні горбатого кита. Пороги чутності в інфразвуковому та низькочастотному діапазоні ілюструються на рис. 2.2, де суцільна лінія вище 20 Гц є низькочастотним кінцем стандартного порогу ISO [6].

Мікробароми та гірські хвилі. Мікробароми являють собою інфразвукові коливання атмосферного тиску, спричинені взаємодією океанських хвиль [7]. Ці низькочастотні звуки генеруються океаном і здатні поширюватися на значні відстані в атмосфері. Вони утворюються, з одного боку, поверхневим рухом, що стискає верхнє повітря, а з іншого боку — океанським випромінюванням. Мікробароми поширюються в атмосфері, зокрема в стратосфері [8].

Гірські акустичні хвилі (MAW) є інфразвуковим явищем, що виникає в регіонах з високими горами або гірськими хребтами [9]. Вони є результатом атмосферних явищ, які з'являються, коли вітер перетинає гірський хребет. Підйом повітряного потоку, що натрапляє на бар'єр, призводить до його охолодження, конденсації водяної пари, і, як наслідок, до утворення хмар та можливих опадів. Інфразвукова мережа IMS дозволила визначити основні глобальні джерела MAW [10], серед яких виділяють південні Анди, а також високі гірські хребти в Центральній Азії,

Новій Зеландії та Північній Америці. Точний механізм виникнення МАВ наразі ще не повністю з'ясований.

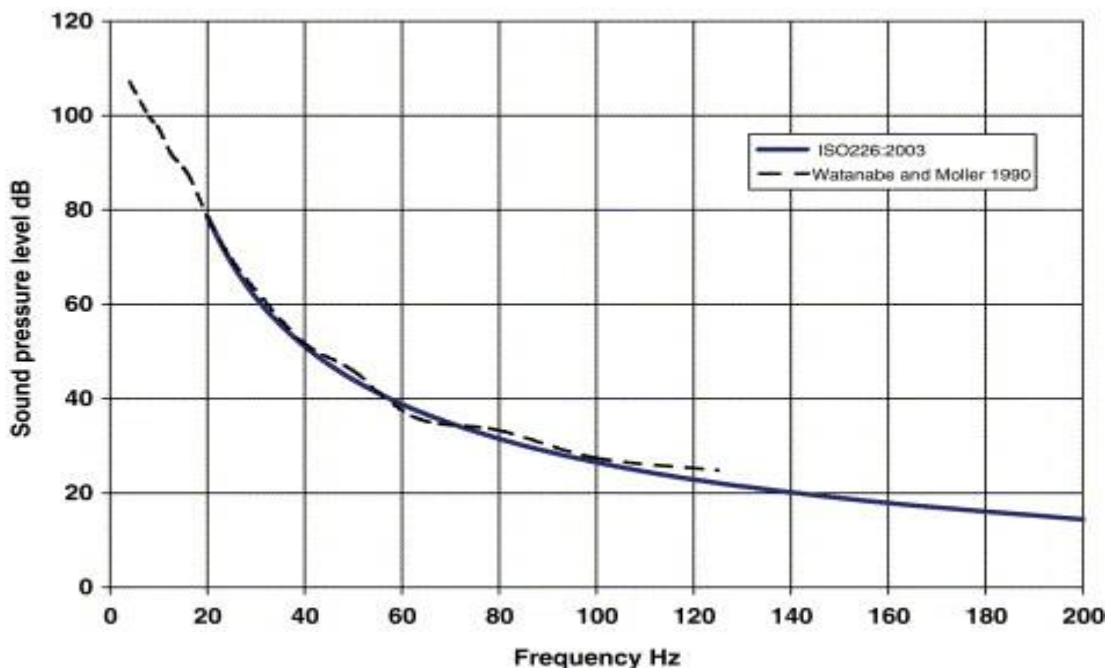


Рис 1.2 Сприйняття інфразвуку та низькочастотного шуму

[<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0079610706000848-gr2.jpg>]

Інфразвукові хвилі також можуть спостерігатися під час грозових блискавок. Акустичні викиди, що створюють хвилі як у чутному (тобто грім), так і в інфразвуковому діапазоні, виникають внаслідок взаємного відштовхування заряджених крапель води у заряджених областях хмари. Головним механізмом генерації акустичних хвиль вважається утворення ударної хвилі внаслідок швидкого теплового розширення каналу блискавки. Після цього розряду виникає акустичний імпульс розрідження, оскільки відновлюється рівновага атмосферного тиску [11]. Таким чином, інфразвукові сигнали від блискавки являють собою одиночні імпульси, що мають типову N-подібну форму — стиснення, за яким одразу слідує розрідження. Ці сигнали спостерігаються у діапазоні частот від 0.1 до 10 Гц, причому більшість спостережень припадає на діапазон між 0.2 та 2 Гц.

1.3.2 Антропогенні джерела

Антропогенні джерела інфразвуку включають хімічні та ядерні вибухи, запуски ракет і рух надзвукових літальних апаратів.

Хімічні та ядерні вибухи. Хімічні та ядерні вибухи, як атмосферні, так і підземні, генерують виявлявані інфразвукові хвилі, подібно до природних вулканічних джерел. Вибухові події можуть бути зафіксовані інфразвуковими датчиками на значних відстанях — від кількох сотень до тисяч кілометрів. Дальність виявлення залежить від потужності вибуху та переважаючих умов стратосферного вітру [12].

Виявлення є значно ефективнішим з підвітряного боку від джерела порівняно з навітряним напрямком або перпендикулярно до нього. Основне застосування інфразвукової технології в контексті Договору про всеосяжне заборону ядерних випробувань (СТВТ) полягає у виявленні атмосферних ядерних випробувань, хоча вони не проводилися понад 40 років. Проте, було встановлено, що підземні (ядерні) вибухи, проведені протягом останніх десятиліть, також викликають виявляваний інфразвук.

Запуски ракет. Інфразвукові сигнали генеруються під час запалювання, горіння та повторного входу ступенів ракети в атмосферу [13]. Основними джерелами є аероакустична енергія, яка генерується вихлопом надзвукового двигуна, та конус Маха, що утворюється, коли ракета досягає надзвукових швидкостей.

Реєструються два різні набори сигналів [14]:

1. Перша група представляє звук, що надходить із напрямку місця запуску.
2. Друга група представляє звук, що виходить від повторного входу першої або другої стадії.

Якщо приймач розташований уздовж траєкторії ракети, спочатку фіксується група сигналів повторного входу через високу складову швидкості ракети, що наближається до приймача.

Надзвукові літальні апарати. Об'єкти, такі як надзвукові літаки, космічні апарати, що повторно входять в атмосферу, та капсули повернення зразків, генерують інфразвук, коли рухаються через атмосферу з надзвуковими швидкостями. Рух зі надзвуковою або гіперзвуковою (що визначається як п'ятикратна швидкість звуку) швидкістю призводить до генерації ударної хвилі. Ця ударна хвиля створює типові сигнали N-подібної форми (наприклад, de Groot-Hedlin et al., 2010), які можуть бути зареєстровані на великих відстанях [15].

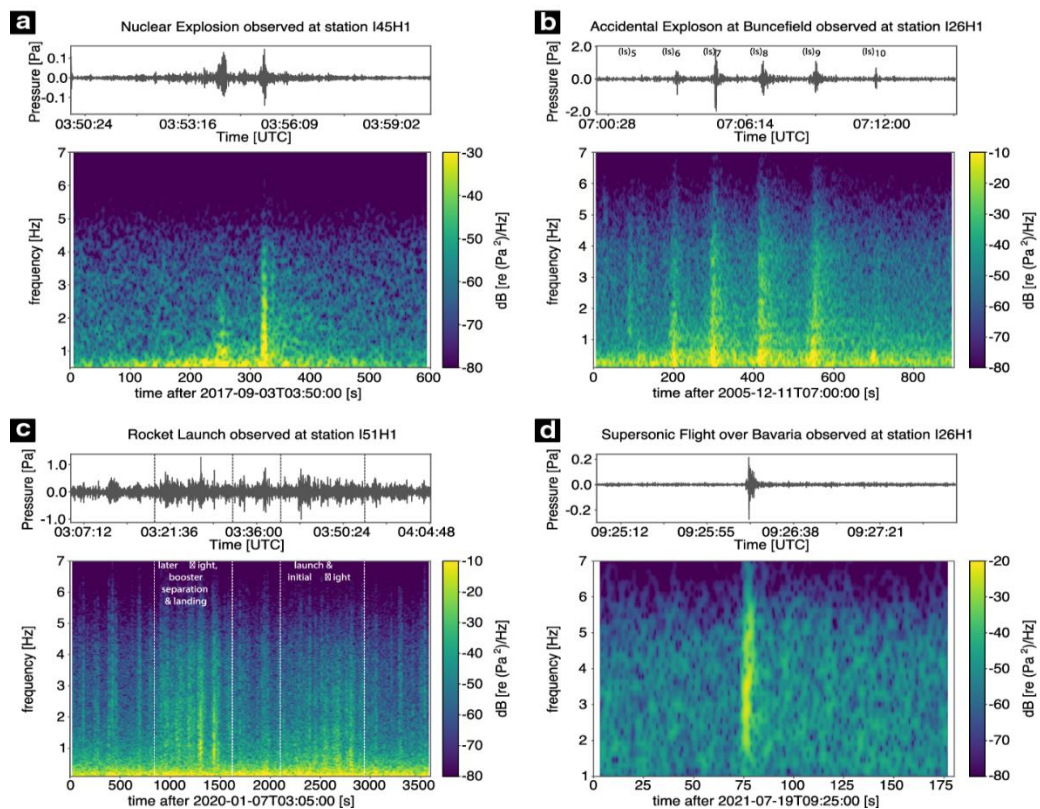


Рис 1.3 Спектрограма останнього підземного ядерного випробування (КНДР 6) у Північній Кореї [<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-022-09713-4/figures/6>]

1.4 Використання інфразвуку у сейсмології

З 1950 року суспільство пережило значний розвиток у сферах комунікацій і транспорту, що, водночас, збільшило його вразливість до впливу значних обсягів

атмосферного попелу, який розсіюється під час вулканічних вивержень як на локальному, так і на глобальному рівні.

Протягом останніх десятиліть зустрічі цивільної та військової авіації з вулканічним попелом неодноразово призводили до катастроф або критично небезпечних ситуацій. Потрапляння вулканічного попелу в реактивні турбіни може спричинити зупинку двигуна через згасання полум'я, оскільки температура плавлення силікатного попелу нижча за робочу температуру двигуна. Пошкодження були зафіксовані як після короткочасних польотів у щільних хмарах попелу (з концентрацією попелу понад 2 г/м^3), так і внаслідок тривалого впливу розведеного попелу [5]. Для запобігання подібним проблемам у майбутньому вирішальну роль можуть відіграти інфразвукові дослідження.

Інфразвук здатен надавати додаткову інформацію про джерело землетрусу, яку важко отримати лише за допомогою сейсмічних даних. Серед наземних методів моніторингу вулканів, інфразвук є єдиним засобом, здатним виявляти вибухові виверження на відстані тисяч кілометрів. Постійний аналіз інфразвукового масиву в атмосфері, який використовує акустичну амплітуду та стійкість виявлення, дозволяє здійснювати автоматичну ідентифікацію вивержень вулкану практично в режимі реального часу [16]. Крім того, інфразвук може бути чутливим до певних типів рухів земної кори, які можуть недостатньо реєструватися сейсмографами. Аналіз інфразвукових сигналів допомагає визначити розміри джерела землетрусу, оскільки амплітуда і тривалість інфразвукових хвиль корелюють з енергією, яка вивільняється під час сейсмічної події. Інфразвукові дані також можуть сприяти визначенню механізму руйнування гірських порід під час землетрусу. Коли вулкан вивергається, він вивільняє енергію в землю у вигляді сейсмічних хвиль та в атмосферу у вигляді акустичних (звукових) хвиль (рис. 1). Більша частина звуку, що генерується вулканами, є низькочастотною (нижче 20 Гц – порогу слуху людини) і визначається як інфразвук. Цю інформацію можна застосовувати для виявлення, локалізації, характеристики та визначення вулканічних вивержень, що забезпечує цінний моніторинг вулканів. Інтенсивні дослідження в цій сфері протягом останнього десятиліття продемонстрували

значущість взаємодій хвильового поля з топографією, зокрема явищ розсіяння та дифракції [17]. Наявність недорогих безпілотних літальних апаратів та доступного програмного забезпечення для побудови структури з руху розширила можливості дослідників у створенні високороздільних цифрових моделей висот (DEM) вулканічних споруд, які можуть бути використані для моделювання поширення інфразвуку.

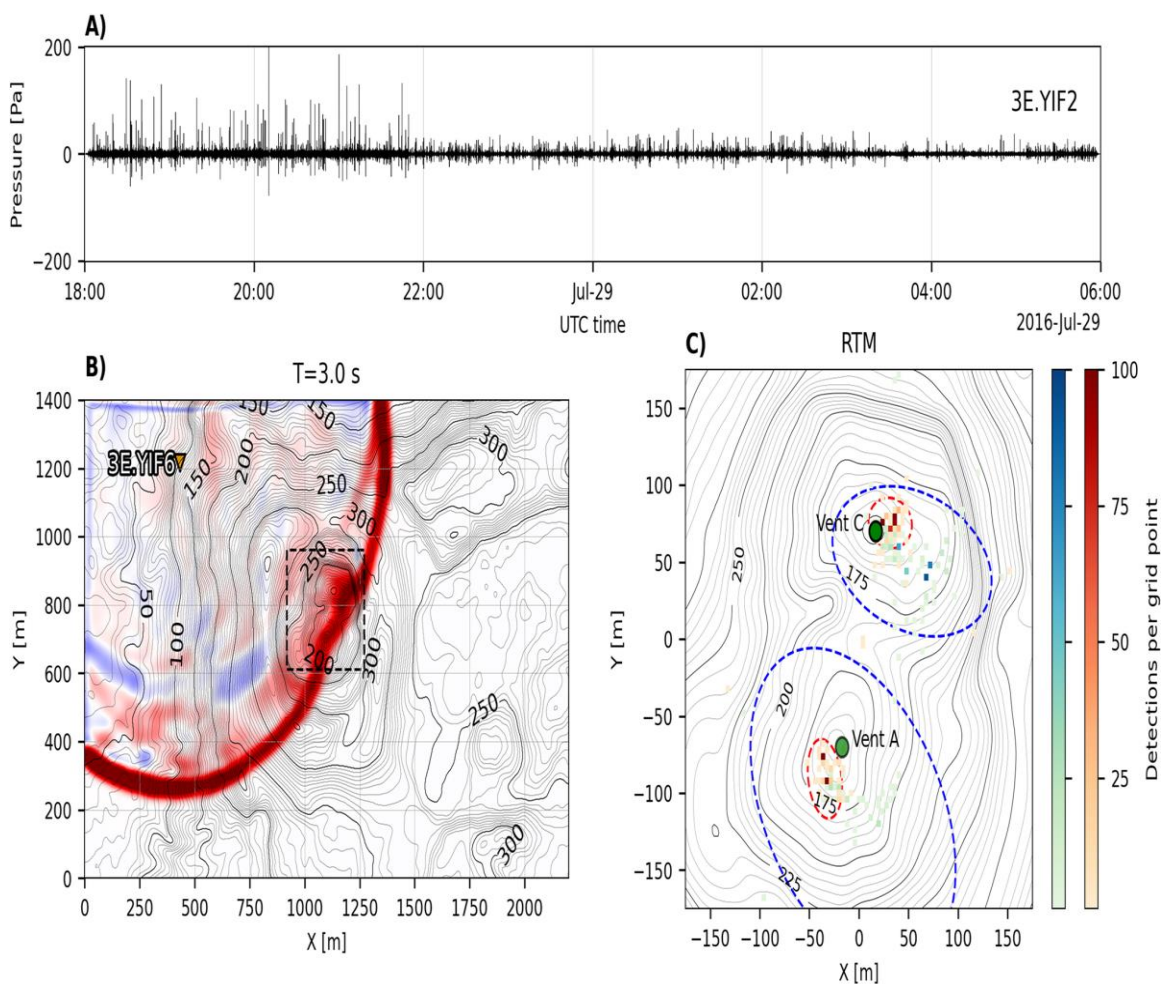


Рисунок 1.4 демонструє значний вплив топографії на інфразвукове хвильове поле та отримані інфразвукові локації на вулкані Ясур (Вануату).

1. Панель А (Інфразвукові Дані): Представлено дванадцять годин інфразвукових даних, зареєстрованих станцією, розташованою на краю кратера. Спостерігається, що кілька вибухів відбувається щохвилини.

2. Панель В (FDTD-Симуляція): Наведено знімок симуляції методу кінцевих різниць у часовій області (FDTD), зроблений через 3,0 секунди від моменту поширення хвилі від станції Ясур YIF6 по регіону дослідження. Червоний колір вказує на область позитивного тиску (стиснення), тоді як синій колір відображає негативний

тиск (розрідження) акустичної хвилі, що поширюється вздовж поверхні. Штриховані рамки ілюструють розмір області, показаної на панелі С.

3. Панель С (Гістограми Локацій): Показано 2D-гістограми дванадцяти годин ретропроекованих інфразвукових локацій. Сині кольори відповідають часам проходження, обчисленим за допомогою простих нахилених відстаней, тоді як червоні кольори відповідають результатам, отриманим на основі FDTD-моделювання. Два активних жерла позначені зеленими колами, а штриховані еліпси відображають 98,9% довірчих інтервалів. Одиниці контуру висоти подано в метрах.

Виверження вулкана Хунга (Тонга), яке розпочалося в середині грудня 2021 року, досягло кульмінації 15 січня 2022 року потужним вибухом близько 04:16 UT. Протягом наступної години вулканічний стовп піднявся до 58 км (вище стратопаузи), а хмарна «парасолька» розширилася на висоті близько 35 км, утворивши диск діаметром 600 км. Ці показники висоти викидів та масштабу хмарної "парасольки" встановили новий рекорд серед вулканічних вивержень за період супутникових спостережень, перевершивши вулкан Пінатубо (40 км). Стовп спричинив значні збурення стратосферного аерозольного шару та складу стратосфери (Millán et al., 2022), що, ймовірно, мало суттєві радіаційні наслідки (Sellitto et al., 2022).

Виверження 15 січня 2022 року генерувало широкий спектр атмосферних хвиль, деякі з яких обійняли всю планету. Серед приладів, що зафіксували цю подію, були стратосферні повітряні кулі, які дрейфували над тропічною частиною Тихого океану [18]. Ці апарати зібрали унікальні дані про прибуття інфразвукових хвиль, зафіксувавши п'ять повних обертів хвиль навколо Землі. Поєднання цих даних із наземними вимірюваннями, отриманими міжнародною мережею інфразвукових станцій, дозволяє детально розглянути сценарій виверження. Зокрема, була виявлена кореляція між спалахами інфразвуку та зростанням вулканічного стовпа. Дані, отримані від стратосферних повітряних куль, також розкрили раніше невідомі особливості поширення інфразвукових хвиль на великі відстані.

Більшість спостережень за хвилями від виверження Хунга були отримані за допомогою дистанційних інструментів або наземних мікробарометрів, оскільки стовп виверження поширився вище типових стратосферних висот. Дослідження також

включало таблицю координат приймачів та характеристики інфразвуку для наземних приладів і стратосферних повітряних куль.

Table 1*Receiver Coordinates and Infrasound Properties in Ground-Based and Balloon-Based Records*

Receiver	Distance (km)	Latitude °N	Longitude °E	Altitude (km)	c_g (m/s)	Observed T_L (30–40 mHz)		
						with respect to IS22 (dB)		
						WP1	WP2	WP3
IS07	5,227	-19.93	134.33	Ground	297.00	-15.66	-14.04	-37.19
IS22	1,849	-22.18	166.85	Ground	297.00	0.00	0.00	0.00
IS24	2,755	-17.75	-149.30	Ground	261.00	-28.27	ND	ND
IS36	2,699	-43.92	176.48	Ground	300.00	-15.82	-16.02	-28.11
IS40	3,957	-4.10	152.10	Ground	301.00	-22.72	-15.89	-28.67
IS57	8,645	33.61	-116.45	Ground	292.00	-35.72	-23.67	-33.18
STR1	2,238	-0.80	-171.64	20.5	279.00	-14.89	-12.68	-24.75
TTL4	7,640	15.70	-116.02	18.5	276.00	-26.41	-22.75	-36.62

Note. ND: Wavepacket not discernible at receiver.

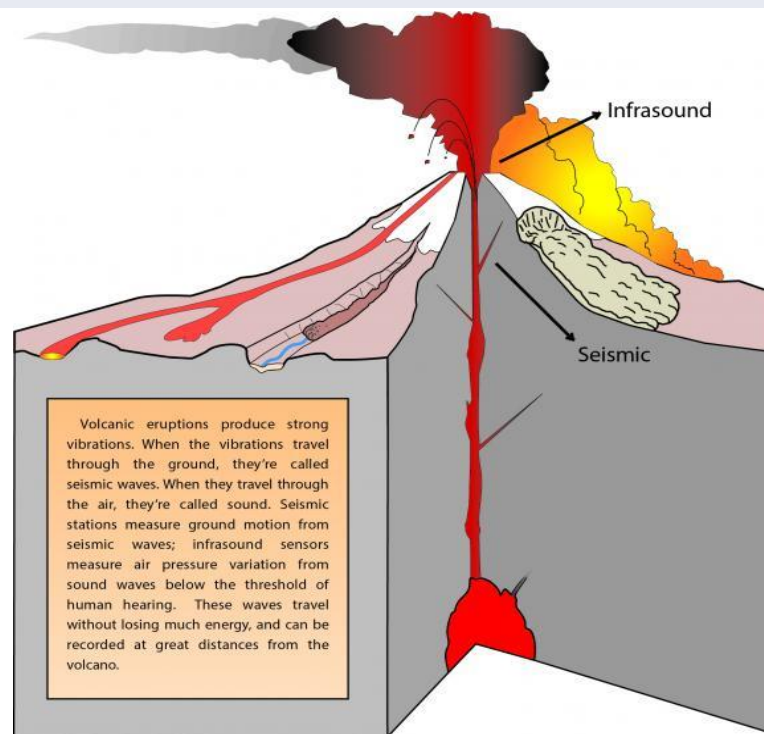


Рисунок 1.5. Інфразвук при виверженні вулкану [https://avo.alaska.edu/about/infrasound#:~:text=The%20majority%20of%20the%20sound, valuable%20tool%20for%20volcano%20monitoring].

Суть застосування цього підходу для дослідження землетрусу в Кіруні 2020 року [19] полягала у послідовній реалізації таких етапів. Насамперед, здійснювався запис інфразвукових сигналів за допомогою спеціалізованих датчиків, які були розташовані поблизу епіцентру сейсмічної події. Далі проводився аналіз частотних характеристик з метою ідентифікації діапазонів, у яких спостерігалася максимальна інтенсивність інфразвукових сигналів. Потім виконувалося порівняння отриманих інфразвукових даних із відповідними сейсмічними записами для встановлення кореляції між цими двома типами хвиль. Завершальним кроком було створення комп'ютерної моделі джерела землетрусу, яка базувалася на інтегрованому використанні як сейсмічних, так і інфразвукових записів з метою пояснення механізму події.

Поєднання симуляцій сейсмо-акустичних хвиль у ближньому полі та моделювання нормальних мод (або власних коливань) у далекому полі здатне створити практичну основу для повноцінного аналізу сейсмічно індукованого інфразвуку.

1.5 Методи обробки інфразвукових сигналів

Одним із сучасних та ефективних підходів до обробки інфразвукових сигналів є метод РМСС (Progressive Multi-Channel Correlation). Цей алгоритм, розроблений автором у роботі [20], спочатку був призначений для реєстрації землетрусів шляхом аналізу коливань земної поверхні. Основна концептуальна ідея методу полягає у вивченні послідовностей віконних сигналів, які надходять із географічно віддалених станцій. Такий механізм забезпечує виявлення когерентного сигналу, що є спільним для різних точок вимірювання, тоді як некогерентний за своєю природою шум ефективно виключається.

Такий підхід забезпечує мінімізацію впливу корельованих шумів, які потенційно можуть спричиняти хибні виявлення, та водночас суттєво підвищує точність локалізації джерела сигналу. Цей результат досягається завдяки збільшенню апертури мережі та ефективному аналізу часових затримок сигналів, які були зареєстровані

різними станціями масиву. Подальша стадія обробки даних включає обчислення середньоквадратичних залишків, що дозволяє виконати уточнення параметрів джерела сигналу та його місцезнаходження

Цей факт записується як

$$r_{ijk} = \Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki},$$

де i, j та k -індекси позначають котрісь зі станцій, між якими визначаються величини Δt . У разі, якщо r_{ijk} дорівнює 0, місце розташування джерела визначається однозначно [21].

Перша реалізація алгоритму була здійснена на території центральної Франції у 1993 році. Аналіз сейсмічних сигналів, отриманих від трьох землетрусів, дозволив емпірично встановити швидкості поширення коливань у діапазоні від 2 до 6 км/с, а також визначити їхні азимути. У джерелі [22] наведено приклади застосування цього методу для обробки даних, зібраних сейсмічними мережами з різним просторовим охопленням, які включали конфігурації для реєстрації локальних та регіональних сейсмічних ефектів. Зокрема, було задіяно великомасштабну мережу з апертурою 500 км, сформовану з п'яти вертикальних довгоперіодичних сейсмометрів, що забезпечило проведення досліджень у значно ширшій географічній зоні (рис. 1.14).

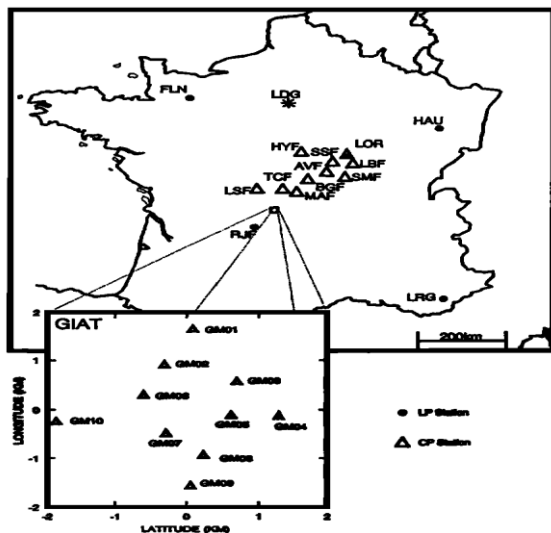


Рисунок 1.6. Географічне положення трьох мереж сейсмограм у Франції (згідно з роботою [22]). Крпки

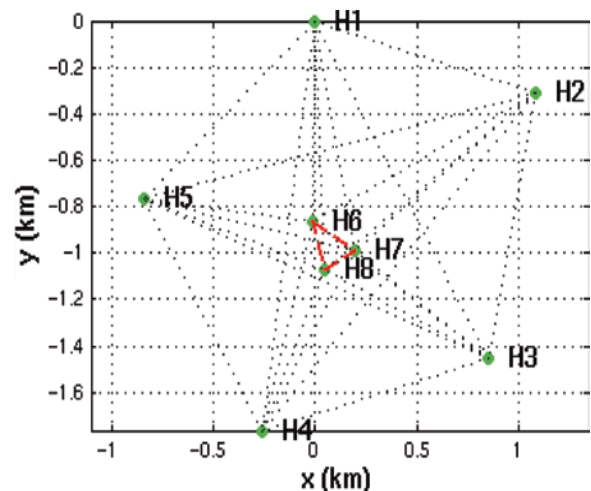


Рисунок 1.7 Замкнена конфігурація інфразвукових датчиків [23].

показують розташування
«довгоперіодних» станцій, трикутники
– «короткоперіодні».

Згідно з монографічними даними [23], найбільш оптимальним варіантом реалізації сенсорного масиву є конфігурація із вкладеною архітектурою, де менший за розміром масив розташований усередині більшої мережі. Така структура забезпечує підвищену ефективність селекції даних і сприяє надійному відокремленню корисного сигналу від шуму. Використання сенсорів, що розташовані на значних відстанях і входять до замкнутого контуру мережі, призводить до пропорційного збільшення апертури масиву, що безпосередньо корелює з підвищенням точності визначення хвильових параметрів. Кінцеві результати розв'язання теоретичних задач обґрунтовуються параметрами, які були обчислені на основі даних, отриманих від найбільшої сенсорної мережі, що володіє максимальною апертурою [23].

Визначення амплітуди аналізованого сигналу є ключовою частиною обробки даних. Згідно з монографією [23], для оцінки амплітуди, зокрема інфразвукового сигналу, застосовують три головні підходи. Цей метод базується на знаходженні різниці між найбільшим позитивним і найменшим негативним значеннями амплітуди сигналу. Це дає змогу визначити загальний розмах коливань. Другий спосіб передбачає розрахунок максимального середньоквадратичного значення (СКЗ), яке фактично представляє середню ефективну амплітуду сигналу, розраховану протягом заданого часового інтервалу. Третій підхід використовує максимальну миттєву амплітуду. Її обчислюють, застосовуючи аналітичне представлення сигналу, отримане за допомогою перетворення Гільберта. У цьому контексті аналітична амплітуда сигналу інтерпретується як миттєва амплітуда хвилі, що виражається відповідним математичним співвідношенням: $S(t) = s(t) + i s_1(t)$, де $s(t)$ – інфразвукова хвильова форма, i – уявна одиниця та $s_1(t)$ – гільбертове перетворення хвильової форми [1]. Для цього випадку миттєва амплітуда визначається як

$S(t) = \sqrt{s^2(t) + s_1^2(t)}$; миттєва фаза – $\theta(t) = \arctg(s_1(t)/s(t))$, а миттєва частота –
 $f(t) = \partial\theta(t)/\partial t$.

РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ ОБРОБКИ

Вимірювання інтенсивності інфразвукових сигналів вимагало розробки надзвичайно чутливих сенсорів. Піонерами у цій галузі були науковці Національного бюро стандартизації у Вашингтоні, які вже на початку 1950-х років [23] створили перші надчутливі мікрофони. Ці пристрої вирізнялися високою надійністю та були здатні забезпечувати безперебійну роботу, заклавши основу для подальшого інфразвукового моніторингу.

На сьогодні міжнародна мережа інфразвукового моніторингу використовує два основні, перевірені часом, типи мікробарометрів:

Таблиця 2.1 – Основні моделі мікробарометрів для реєстрації варіацій тиску

Характеристика	Модель MB2000	Chaparral Physics Model 5.1
Розробник	Геофізична лабораторія, Комісаріат з атомної енергетики (Франція)	Група фізиків у м. Альбукерке, Нью-Мексико (США)
Діапазон Смугової Фільтрації	0.01 до 27 Гц	До 50 Гц
Загальний Діапазон Реєстрації	0 до 40 Гц	Конструктивні особливості
Ключова Особливість	Забезпечує широкий діапазон реєстрації.	Обладнаний сенсорами з рівномірною імпульсною характеристикою на рівні 3 дБ.
Додаткові переваги	-	Термостійкість завдяки ізольованим електронним компонентам [23].

У монографії [23] детально розглянуто різні конфігурації інфразвукових станцій з метою забезпечення максимально точного визначення ключових параметрів інфразвукової хвилі. Встановлено, що оптимальною структурою для точного

визначення азимуту, швидкості приходу та просторової кореляції сигналу є масив із восьми станцій, який має таку конфігурацію:

- Центральний елемент: Три станції, розташовані у формі трикутника (триканальний кластер).

- Зовнішній елемент: П'ять станцій, розташованих навколо центру, формуючи п'ятикутну структуру.

У роботі також наведено приклади розташування каналів на реальних станціях (зокрема, IS04, IS05 та IS07). Автори підкреслюють, що варіації у схемах розташування каналів (відмінності від ідеальної конфігурації) зумовлені низкою зовнішніх факторів:

- Географічні особливості місцевості (рельєф, доступність).
- Кліматичні умови (вплив на шум та обладнання).
- Модернізація станцій, зокрема додавання нових каналів до тих, які спочатку склалися лише з чотирьох.

Ключовим завданням при інфразвуковому моніторингу, особливо під час спостережень за такими подіями, як ядерні вибухи, є зниження рівня сторонніх завад від інших джерел. Домінуючим джерелом цих завад є атмосферний вітер. Для ефективного зменшення шумового фону від вітру використовуються спеціальні шумознижуючі системи (фільтри), які являють собою мережі перфорованих трубок (портів), що розташовуються в різних напрямках навколо сенсора. Цей підхід забезпечує: нівелювання некорельованого вітрового шуму на датчику; отримання максимально чітких хвильових форм цільового інфразвукового сигналу. Такі шумознижуючі системи переважно використовуються на станціях Міжнародної системи моніторингу (IMS). Прикладами типових конфігурацій є системи з 96 портами та діаметром апертури 18 м, а також системи зі 144 портами та діаметром апертури 70 м (рис. 2.1).

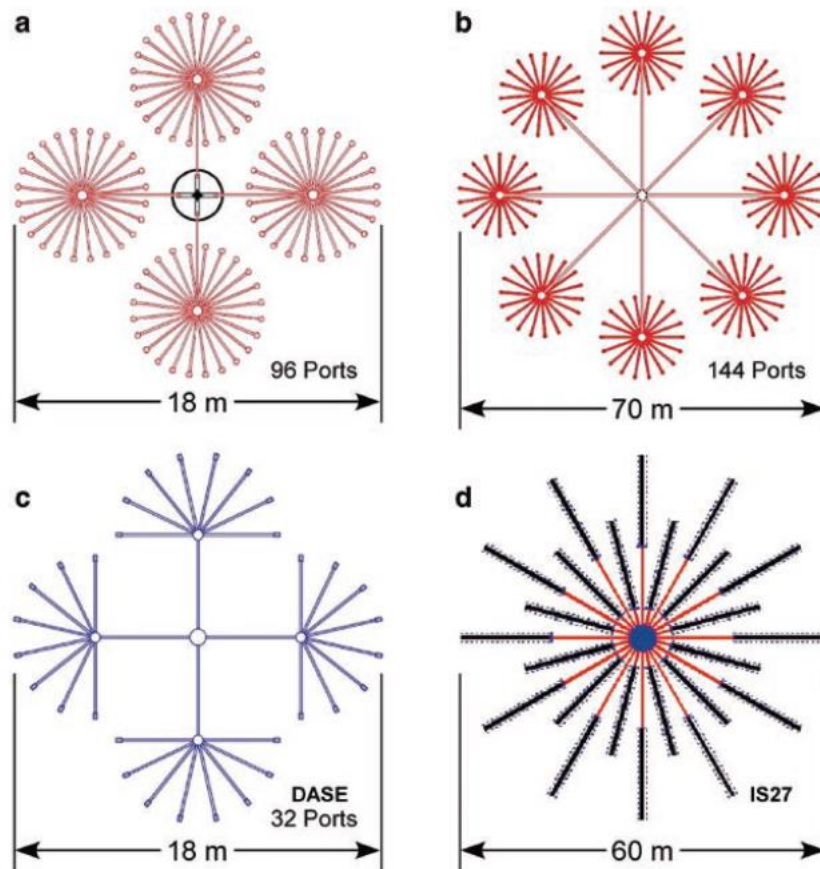


Рисунок 2.1. Типові приклади систем для придушення шумів від атмосферних вітрів.

Унікальні рішення застосовані в системі шумозаглушення німецької інфразвукової станції, розташованої в Антарктиді (див. рис. 2.1, d).

Конструктивною особливістю цієї станції є спіральна конфігурація, яку мають канали цієї станції [23]. Така структура робить її однією з найефективніших у світі для моніторингу. Серед переваг можна відзначити те, що спіральна структура дозволяє точно визначати напрямок (азимут) і швидкість приходу інфразвукових хвиль у частотному діапазоні до 0.7 Гц. Також обраний тип конфігурації забезпечує високоефективне придушення акустичних шумів, спричинених сильними вітрами та атмосферними неоднорідностями.

Для забезпечення надійної роботи в суворих антарктичних умовах застосовані спеціальні заходи захисту для сенсорів, а також для забезпечення живлення та

безперебійної передачі даних навіть в умовах погодної нестабільності. У кожній точці вимірювання встановлені мікробарометри та аналогово-цифрові перетворювачі. Вони захищені від впливу навколишнього середовища алюмінієвими контейнерами та занурені в ополонки (захисні колодязі) [23]. Передача даних до головної станції Ноймайер III здійснюється через Wi-Fi, а живлення забезпечується за допомогою кабелю довжиною 10 км.

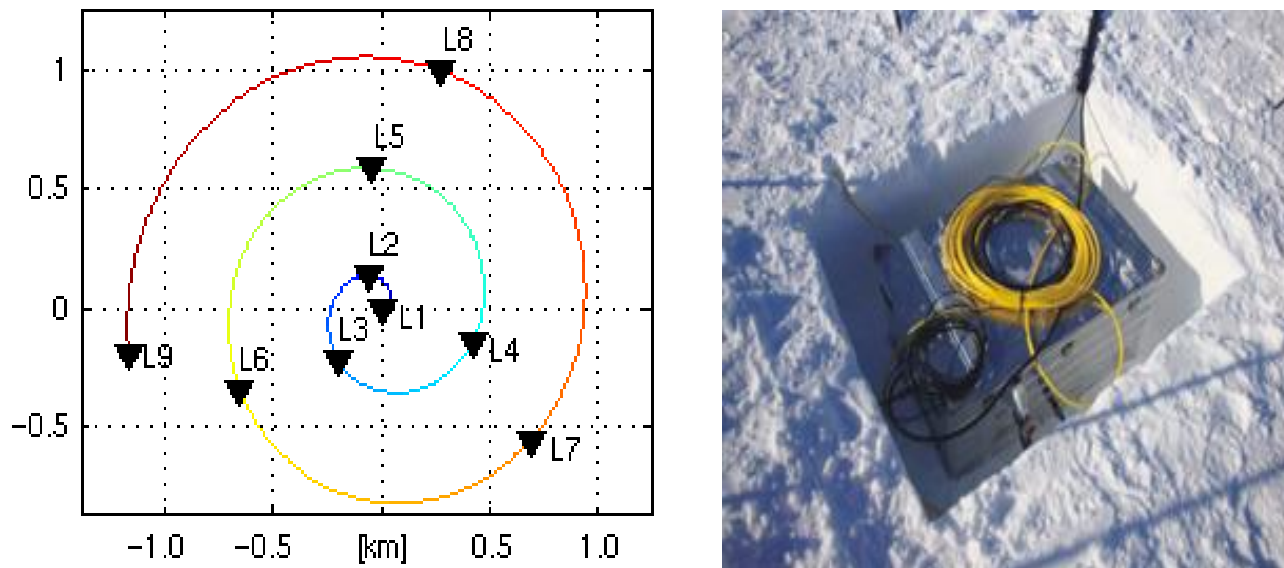


Рисунок 2.2. Конфігурація каналів німецької станції «Ноймаєр III», що розташована в Антарктиді (зліва); мікробарометри та перетворювачі в алюмінієвій ємності, що опущені в ополонку (справа).

Для забезпечення просторової селекції цільових інфразвукових сигналів та мінімізації впливу шумів, спричинених атмосферними неоднорідностями та турбулентністю, застосовуються спеціалізовані заводозахисні пристрої. Ці пристрої, виконані у формі хвилеводів (трубних ліній), ефективно придушують приземні акустичні завади.

Під час реєстрації інфразвукового сигналу від падіння Челябінського метеороїда використовувався комплекс обладнання Інституту сонячно-земної фізики СО РАН (ІСЗФ СО РАН). Основні елементи цього обладнання включали переносні павільйони,

оснащені мікробарографом і пристроєм калібрування, та систему шумозахисту, яка являє собою трубну лінію завдовжки 60 м з 20 вхідними капілярами діаметром 1 мм. Основні параметри мікробарографа, який реєстрував варіації тиску: динамічний діапазон – 80 дБ, чутливість – 0.5 В/Па, власний шум – 0.001 Па, смуга частот – від 0.01 до 3 Гц.

Сьогодні у світі функціонує Міжнародна система моніторингу (МСМ), яка є ключовим елементом системи контролю за дотриманням Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (ДВЗЯВ).

Мережа МСМ складається з 60 інфразвукових станцій, розташованих по всьому світу [1]. Ці станції забезпечують безперервний моніторинг інфразвукових явищ від різноманітних джерел, включно з атмосферними вибухами та природними подіями.

Далі обговорюються результати обробки варіацій інфразвукового тиску.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати попередньої обробки

Приклад результатів попередньої обробки для інфразвукових сигналів зі станції «Академік Вернадський» показано на рис. 3.1–3.3. Рис. 3.1 показує результати багатоканальної обробки варіацій інфразвукового тиску на цій станції. Видно, що принаймні протягом трьох днів спостерігалися значні сплески в амплітуді сигналу. Простежувалася тенденція до зменшення амплітуди від 400 тис. відн. од. до 50 тис. відн. од. на кожній реєстрації та збільшення тривалості сигналів від 3 до 8 годин.

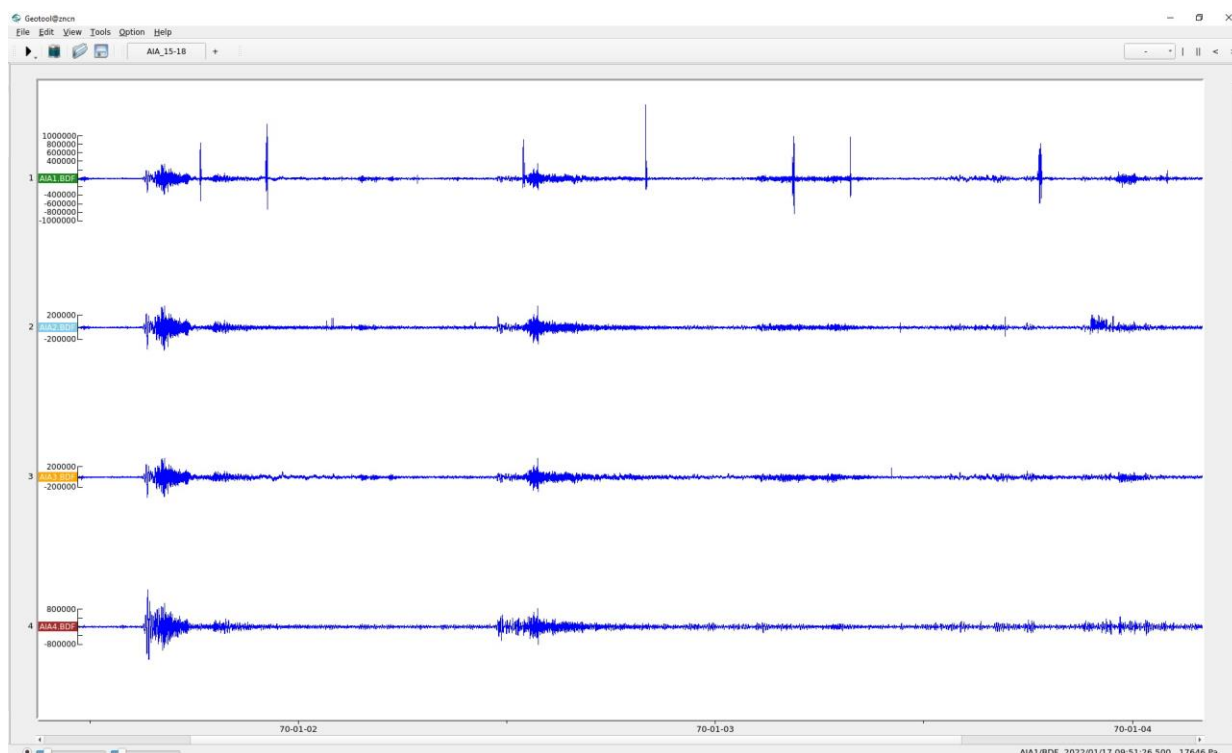
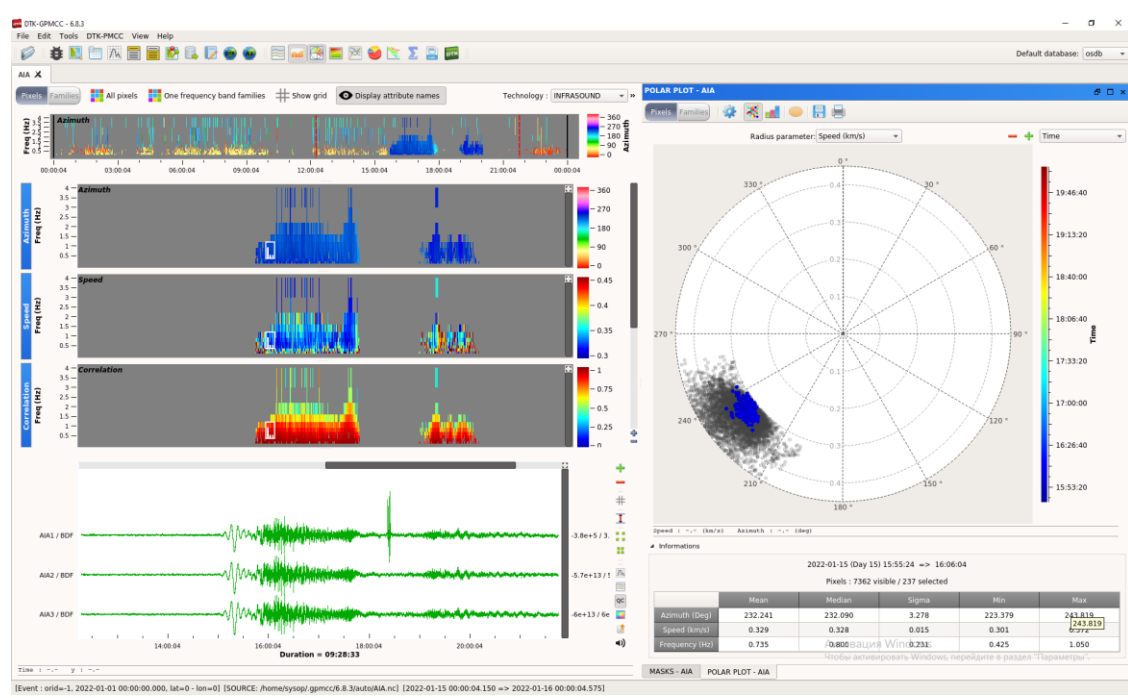


Рисунок 3.1 – Приклад вихідних даних для багатоканальної станції «Академік Вернадський» за 15–18 січня 2022 року

На рисунку 3.2 наведено приклад результатів мультисканальної спектральної обробки інфразвукових сигналів. Цей метод є ефективним для виявлення відмінностей у поведінці сигналів на кожному з каналів. Також за допомогою описаної вище

методики проведено спектральну обробку цих сигналів, визначено амплітуди та азимуту сигналів, а також швидкості приходу.



WinPMCC: Results of PMCC process

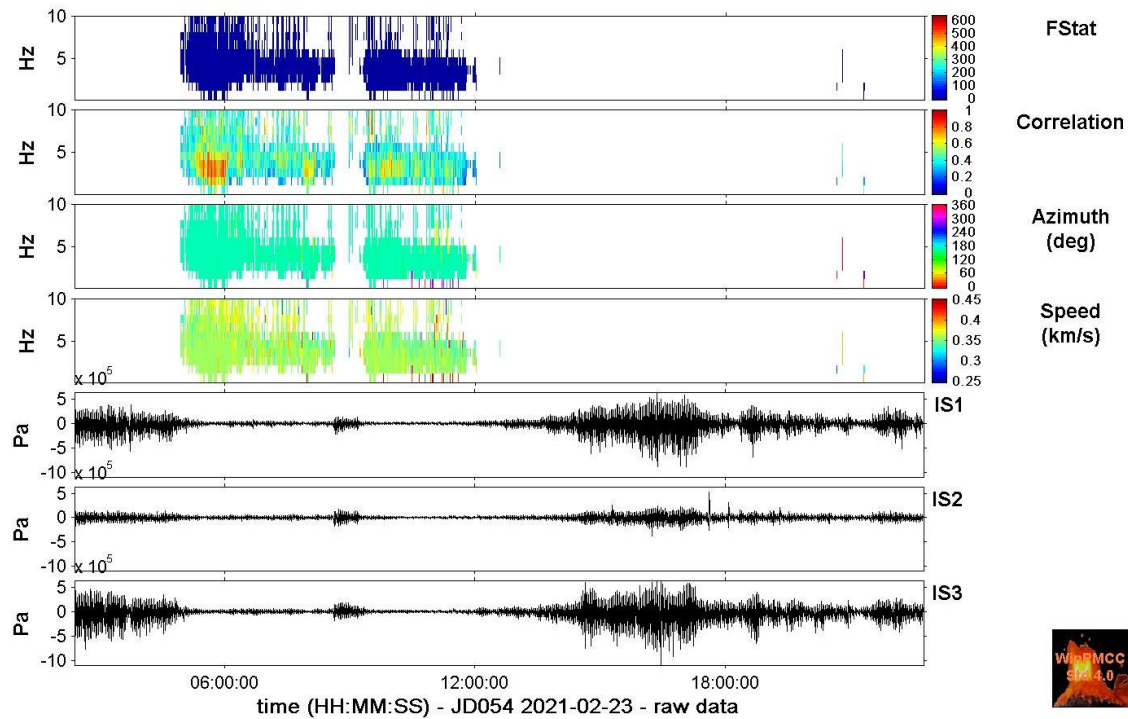


Рисунок 3.2 – Приклад мультिकанальної спектральної обробки даних на станції «Академік Вернадський»

3.2 Результати смугової фільтрації

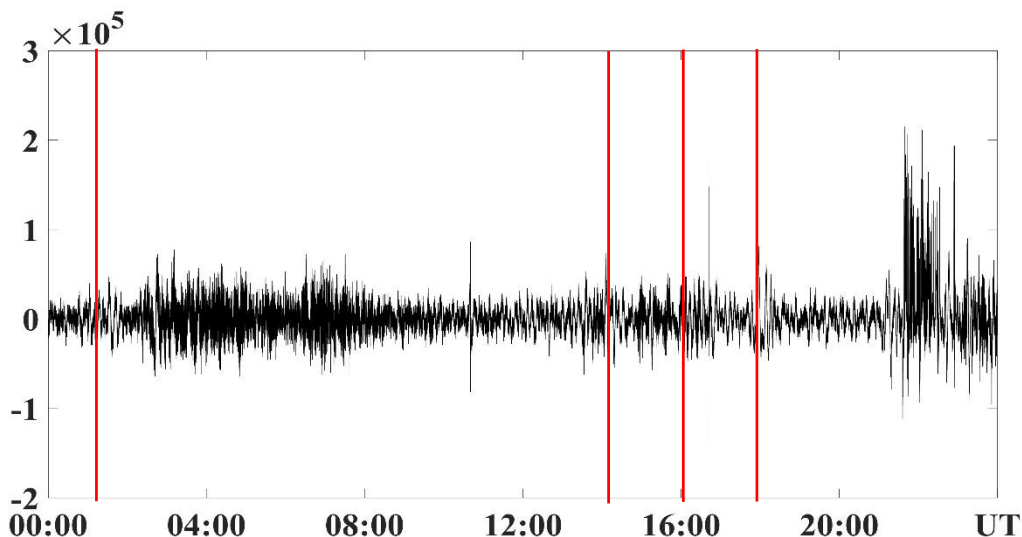


Рисунок 3.3 – Результати смугової фільтрації варіацій інфразвукового тиску для станції «Академік Вернадський» в діапазоні періодів 100–1000 с. Відстань від джерела до станції 8867 км

Станція: АІА

Червоними лініями позначено можливі часи приходу інфразвукової хвилі.

Відстань до епіцентру супервулкану складала 8867 км. Сигнали поширювалися короткою траєкторією, подовженою на довжину екватора (48867 км).

За припущення, що зміни характерів сигналів, які відбулися о 01:40, 14:05, 16:05 і 18:00 UT 17 січня 2022 року, дійсно пов'язані з поширенням акустичних, інфразвукових хвиль, хвиль атмосферного цунамі від вулкану Тонга, тоді маємо часи запізнювання 45.42, 57.83, 60.41 та 61.75 год. За відстані $R \approx 48867$ км отримаємо ймовірні швидкості поширення інфразвукових хвиль 299, 234, 227 і 219 м/с.

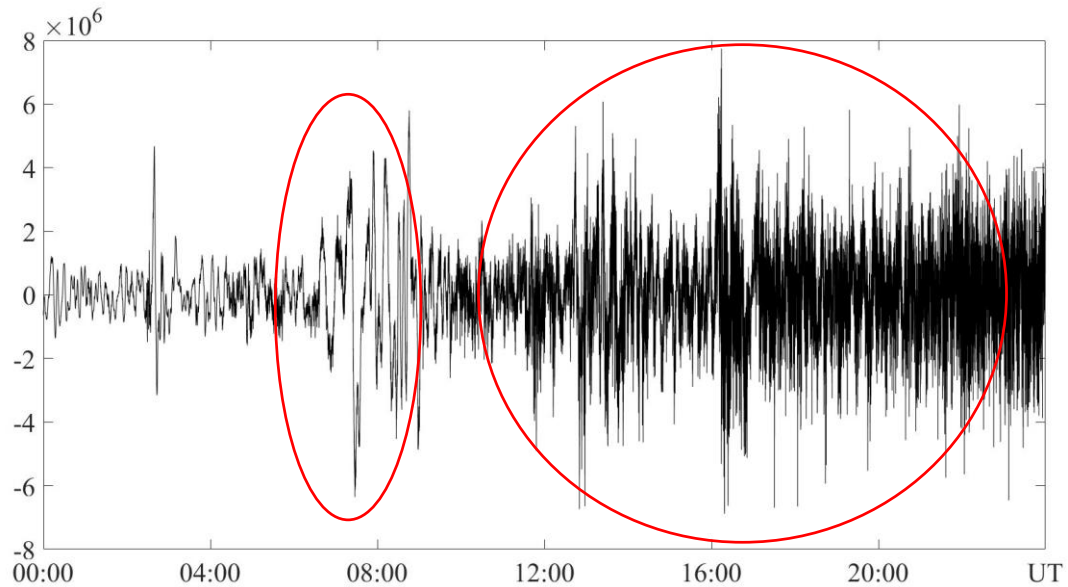
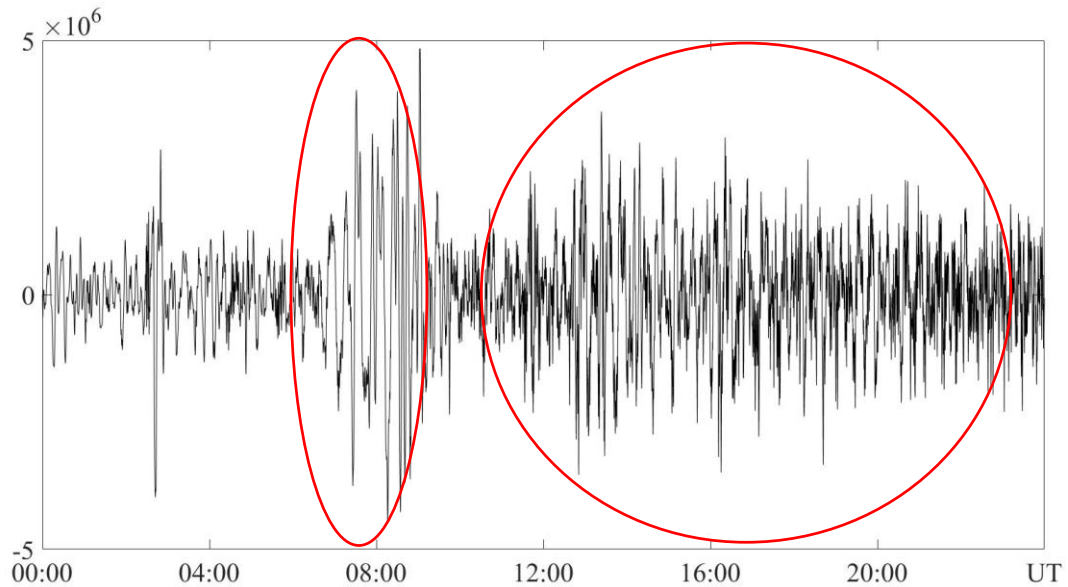


Рисунок 3.4 – Часові варіації флуктуацій тиску в хвилі, зареєстровані 17 січня 2022 року на станції «Кам’янець-Подільський» канал 1 (географічні координати 48.56°N , 26.46°E , відстань $R = 16330$ км). Початковий момент часу — 00:00:00 UT, кінцевий — 00:00:00 UT. Еліпсом позначено можливий ефект від вибуху супервулкану.

Час запізнювання першого сигналу складає $\Delta t_1 = 3045$ хв, його тривалість першого сигналу ΔT_1 — 120 хв. Якщо можливий ефект пов'язаний із вибухом вулкану, тоді швидкість $v = 309$ м/с. Час запізнювання приходу другого сигналу складає $\Delta t_2 = 3315$ хв, тривалість другого сигналу ΔT_2 — 750 хв. Якщо можливий ефект пов'язаний із вибухом вулкану, тоді швидкість $v \approx 297$ м/с. Амплітуда $\Delta p \sim 8 \cdot 10^6$ відн.од.



6

Рисунок 3.5 – Час запізнювання приходу першого сигналу складає $\Delta t_1 = 3045$ хв, тривалість першого сигналу ΔT_1 — 120 хв. Якщо можливий ефект пов'язаний із вибухом вулкану, тоді швидкість $v = 307$ м/с. Час запізнювання приходу другого сигналу складає $\Delta t_2 = 3315$ хв, тривалість другого сигналу ΔT_2 — 750 хв. Якщо можливий ефект пов'язаний із вибухом вулкану, тоді швидкість $v \approx 290$ м/с.

Амплітуда $\Delta p \sim 5 \cdot 10^6$ відн.од..

3.3. Результати системного спектрального аналізу

Для всебічного дослідження характеристик квазіперіодичних варіацій інфразвукового сигналу застосовувався системний спектральний аналіз (ССА) часових рядів $\Delta p(t)$ [24, 25]. Метод ґрунтується на комплексному використанні віконного перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивного перетворення Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворення (ВП) з материнськими функціями, близькими до форми шуканого сигналу. У даному дослідженні в якості материнського вейвлету застосовувалася функція Морле (див., наприклад, [24, 25]). З досліджень Чорногора

Л.Ф. відомо, що АПФ володіє кращою роздільною здатністю за періодами (частотами) порівняно з ВПФ, тоді як ВПФ має кращі характеристики для часової області.

Особливістю АПФ є постійність відносних (розділених на тривалість «вікна») вікон за часом і періодом при зміні значення відносного періоду, тоді як у ВПФ ці параметри змінюються приблизно на порядок. Вейвлет-перетворення є ключовим інструментом, оскільки воно дозволяє збалансувати (вирівняти) розділення між складовими з різними періодами (частотами). Це досягається завдяки тому, що ВП забезпечує хорошу часову роздільну здатність для високих частот і хорошу частотну роздільну здатність для низьких частот. Завдяки цьому поєднання ВПФ, АПФ і ВП дає змогу більш детально аналізувати частотно-часову (періодно-часову) структуру різноманітних фізичних процесів.

Після реєстрації інфразвукового сигналу від виверження супервулкану за допомогою фільтрації в діапазоні частот 100–1000 с було виконано ССА у аналогічному діапазоні періодів.

Нижче наведено результати ССА сигналів для мережі інфразвукових станцій, розташованої в Україні та на о. Галіндез (Антарктида).

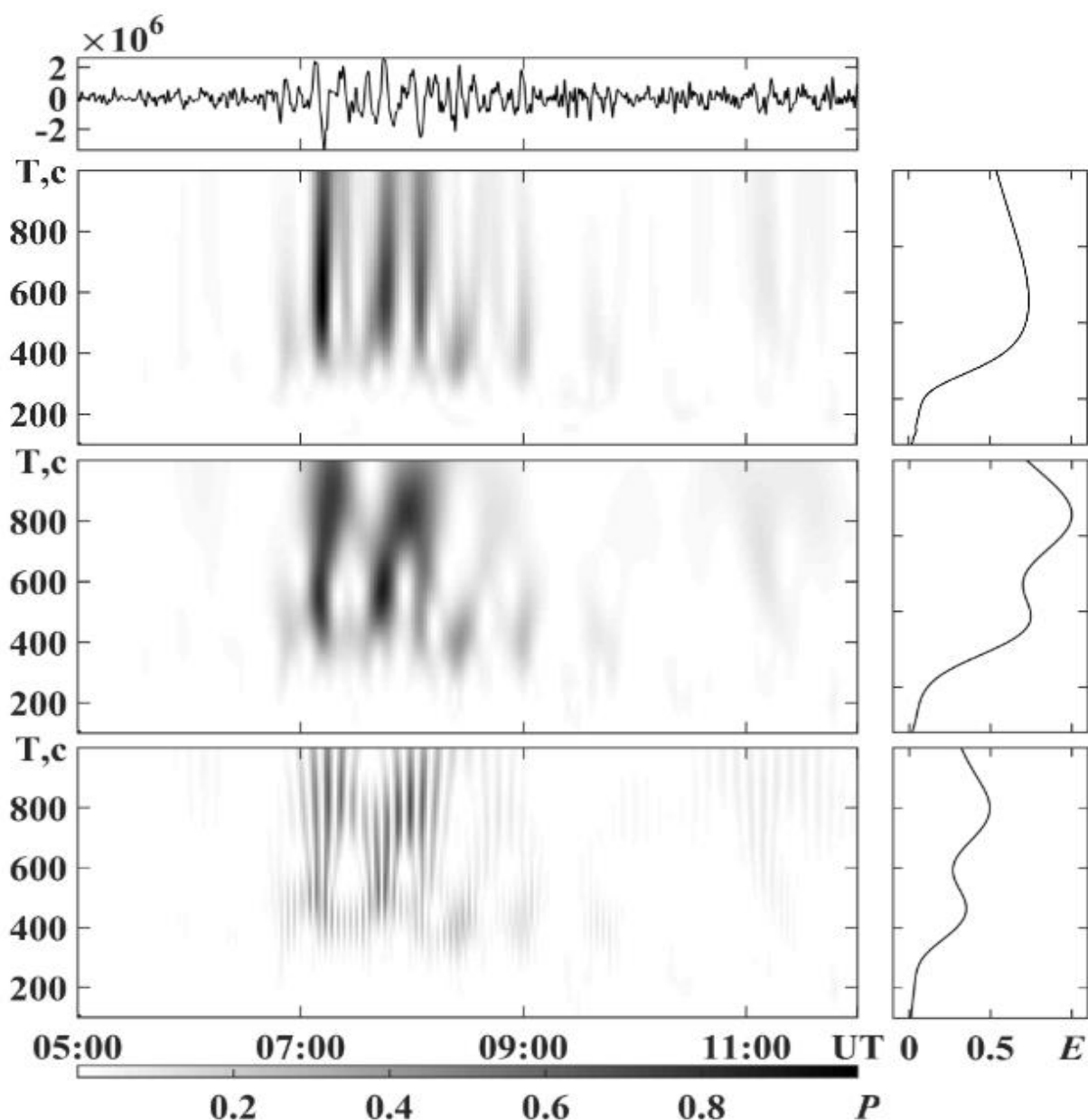


Рисунок 3.6 – Результати обробки вихідних даних і смугової фільтрації (дві верхні панелі), системного спектрального аналізу (попередньо — віконне та адаптивне перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення) варіацій тиску в інфразвуковій хвилі, зареєстровані на станції LUGA (відстань $r = 55576$ км) 17 січня 2022 року. Час початку реєстрації сигналу – 07:00 UT, кінцевий час реєстрації – 09:00, час запізнювання 50.75 год, швидкість 304.,2 м/с, тиск складає $\sim 2,5 \cdot 10^6$ відн.од., тривалість — 120 хв.

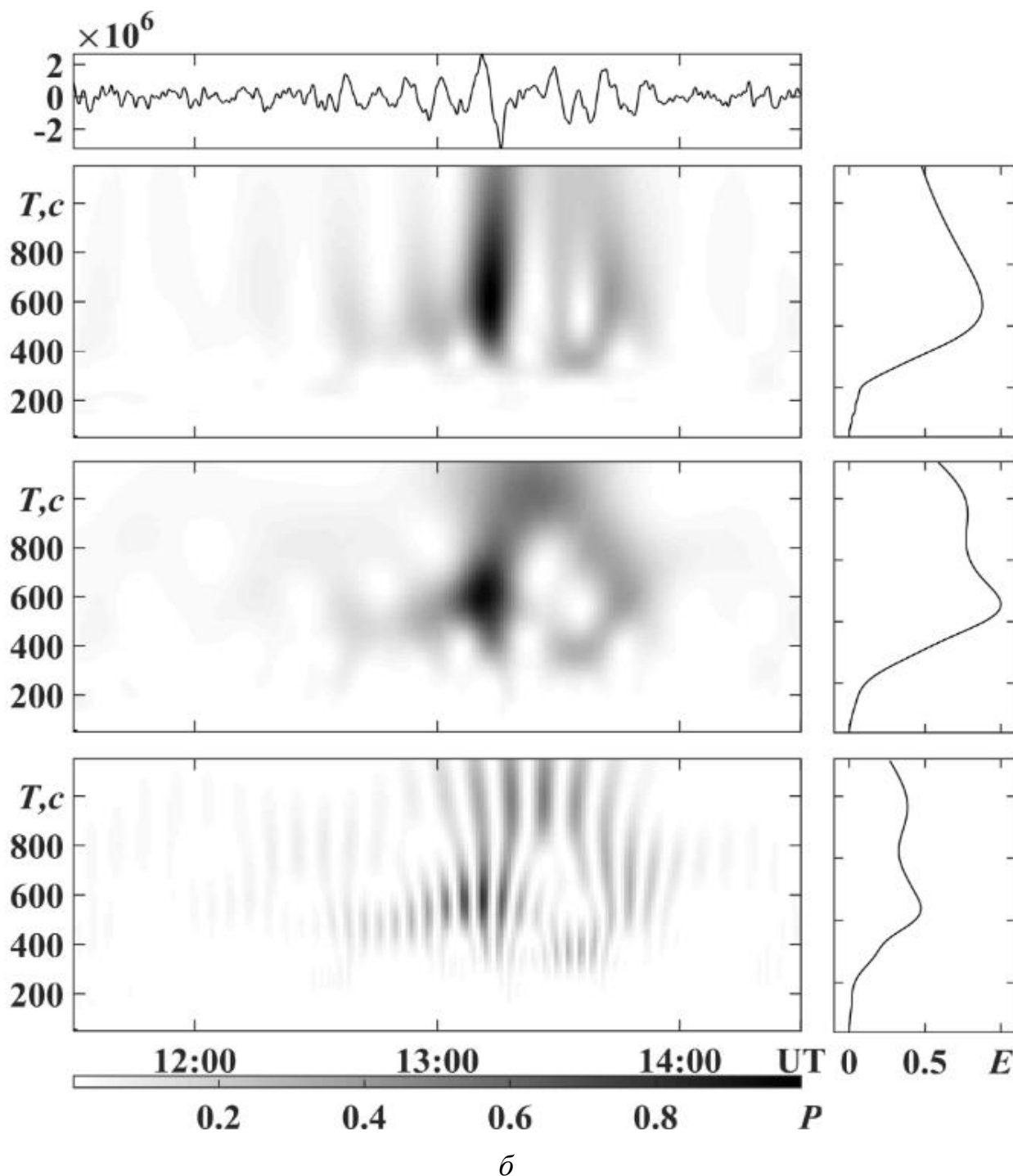


Рисунок 3.7 – Те саме, що й на рис. 1. Для другої групи сигналів зі станції LUGA початковий час 13:03, кінцевий – 13:18, час запізнювання 204480 с, швидкість 271,8 м/с, тиск складає $\sim 2,5 \cdot 10^6$ відн.од., тривалість – 15 хв.

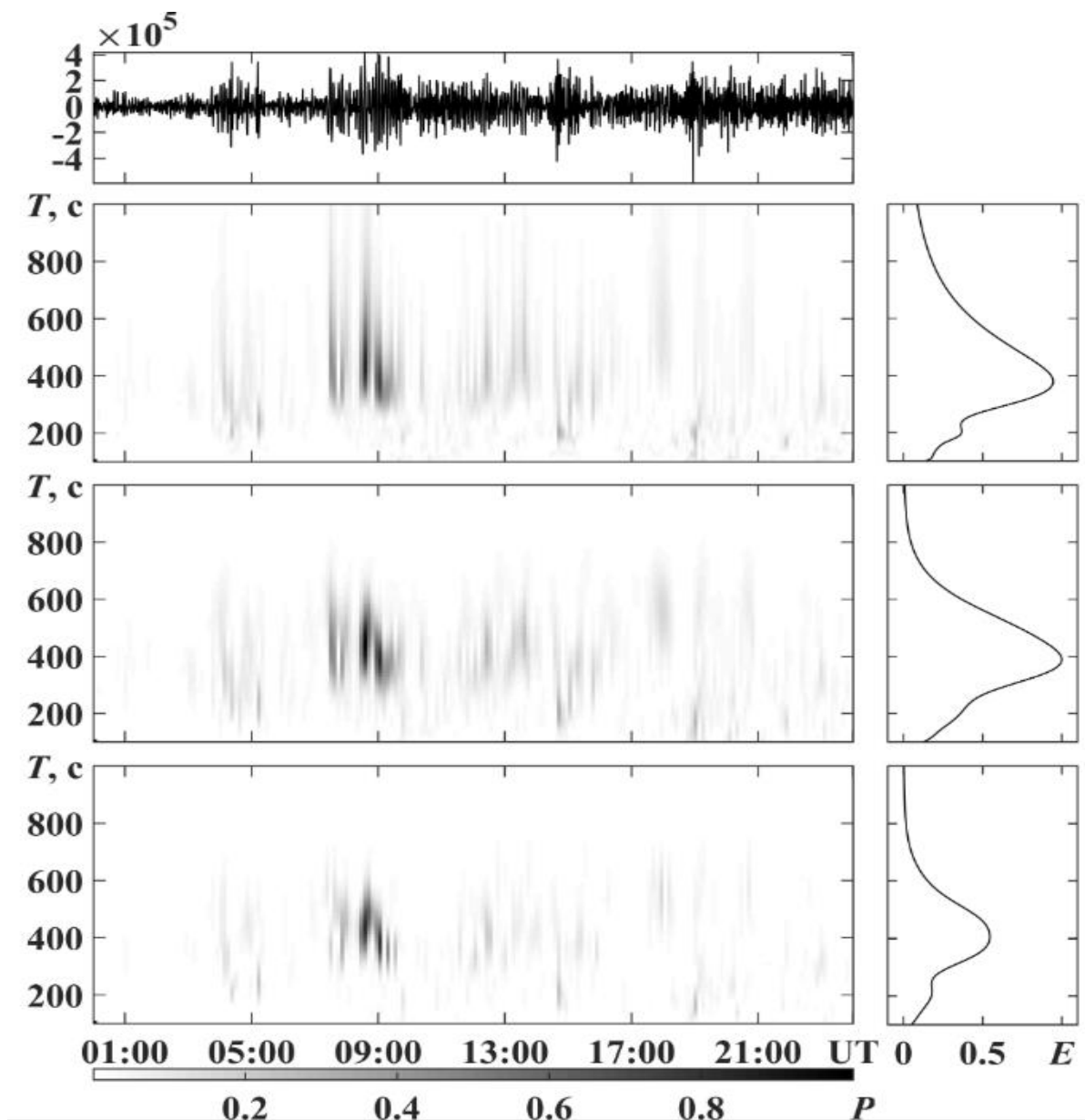


Рисунок 3.8 – Те саме, що й на рис. 1, для станції «Балта» ($r = 56225$ км). Початковий час першої групи сигналів 07:00, кінцевий — 09:00, час запізнювання 50.75 год, швидкість 307 м/с, тиск складає $\sim 4 \cdot 10^5$ відн.од., тривалість – 120 хв. Початковий час другої групи 11:30, кінцевий — 13:30, час запізнювання 55.25 год, швидкість 282.7 м/с, тиск складає $\sim 4 \cdot 10^5$ відн.од., тривалість — 120 хв. Початковий час третьої групи 14:30, кінцевий — 16:30, час запізнювання 58.25 год, швидкість 268 м/с, тиск складає $\sim 4 \cdot 10^5$ відн.од., тривалість — 90 хв. Початковий час четвертої групи 19:20, кінцевий — 20:20, час запізнювання 63.08 год, швидкість 247,6 м/с, тиск складає $\sim 4 \cdot 10^5$ відн.од., тривалість — 60 хв.

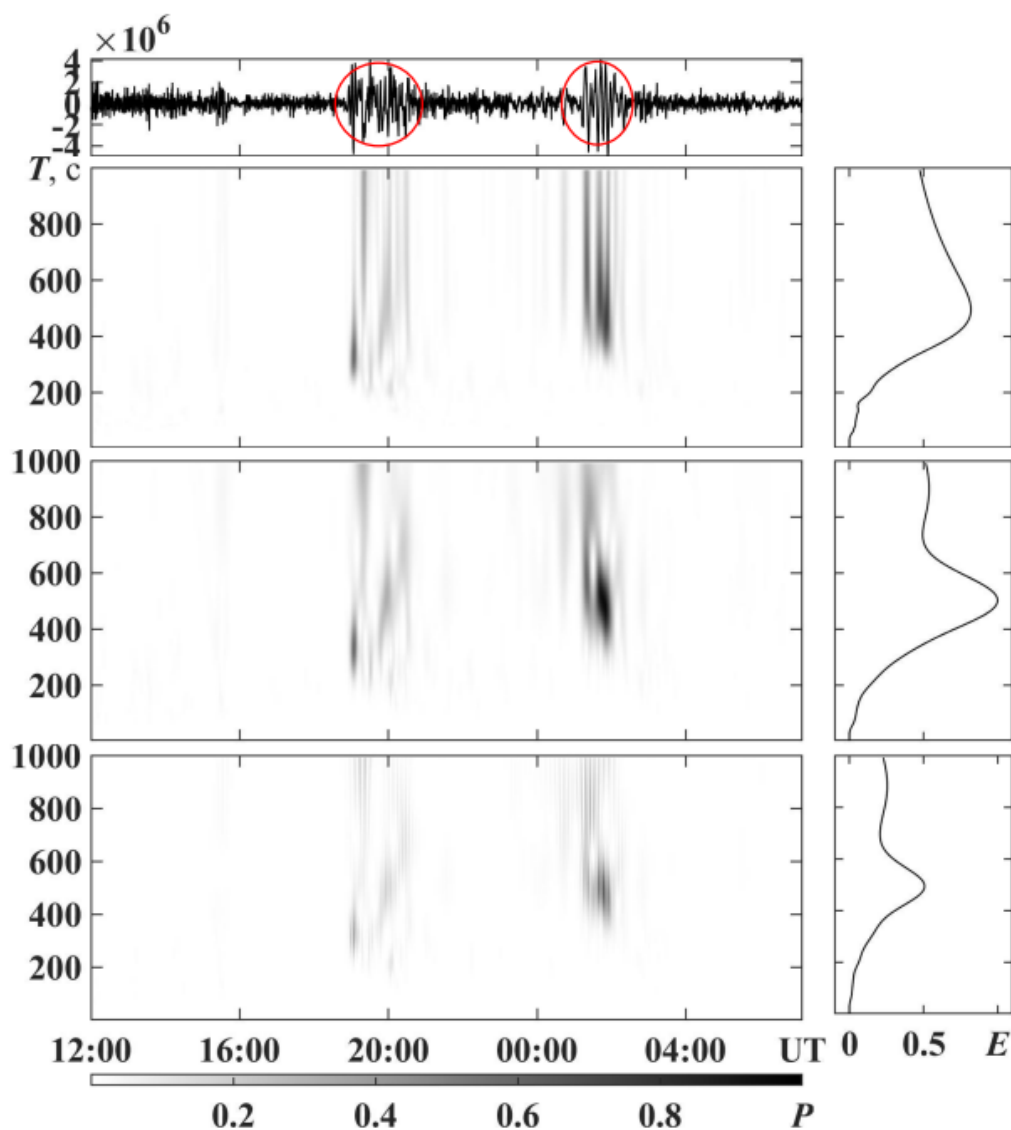
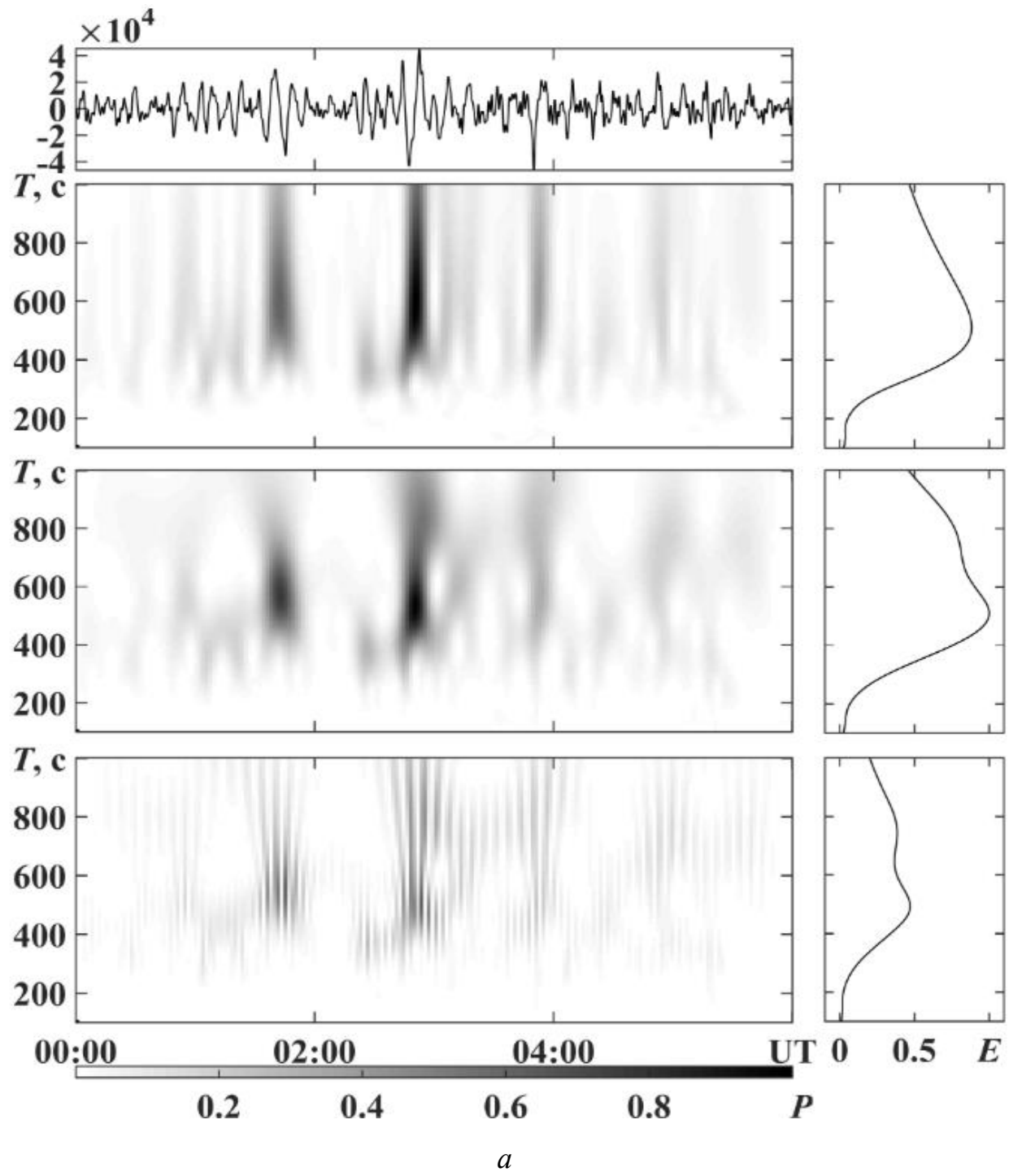


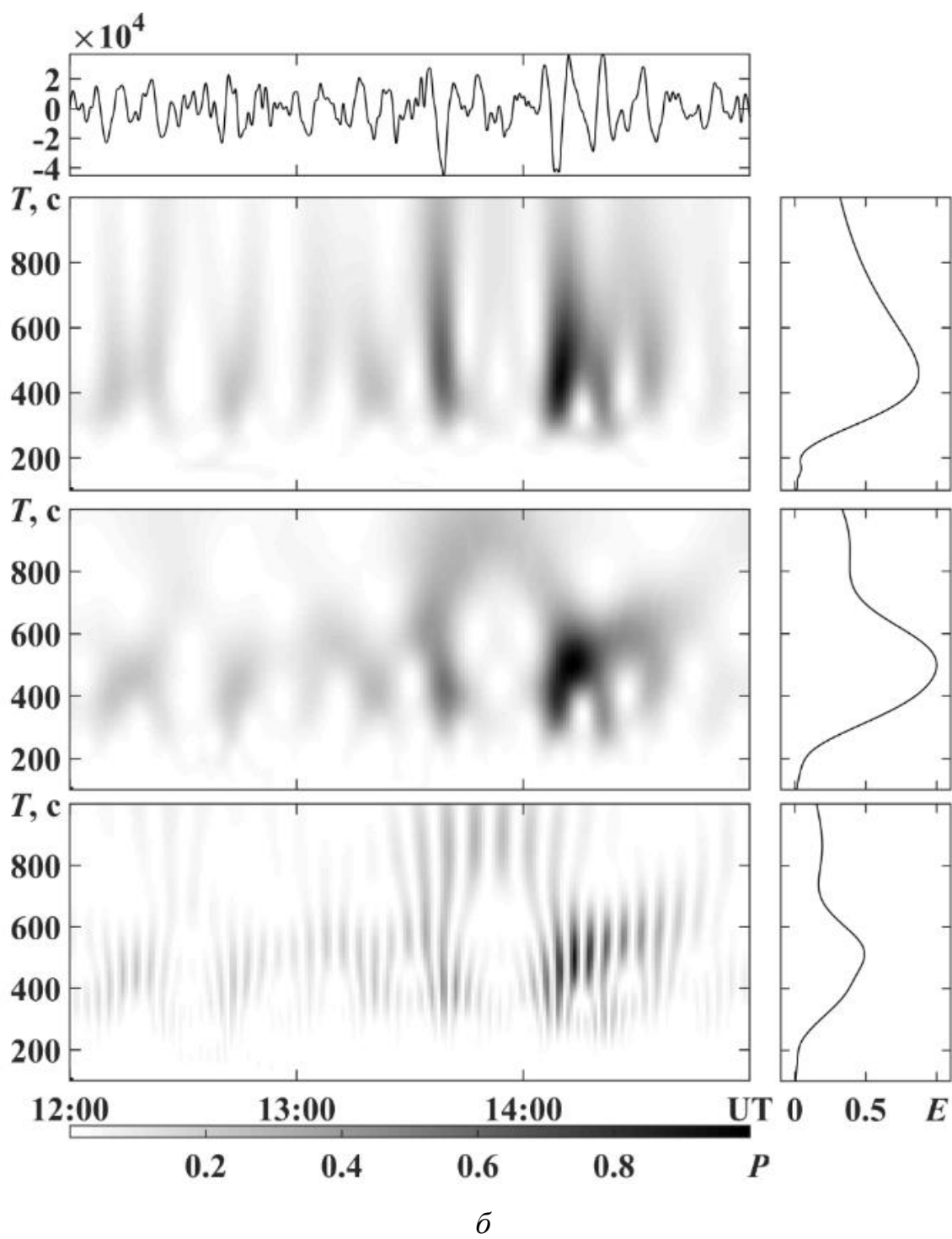
Рисунок 3.9 – Результати смугової фільтрації та системного спектрального аналізу часової залежності варіацій тиску в інфразвуковій хвилі, зареєстрованій 15 січня 2022 року на станції «GRDI», канал 1 (географічні координати 50.60°N , 29.45°E , відстань $R = 16018$ км). Тут і далі панелі зверху вниз: хвильова форма, результати ВПФ, АПФ та ВП. Праворуч показано енергограми. P – інтенсивність сигналу. Результати смугової фільтрації в діапазоні періодів 100–1000 с.

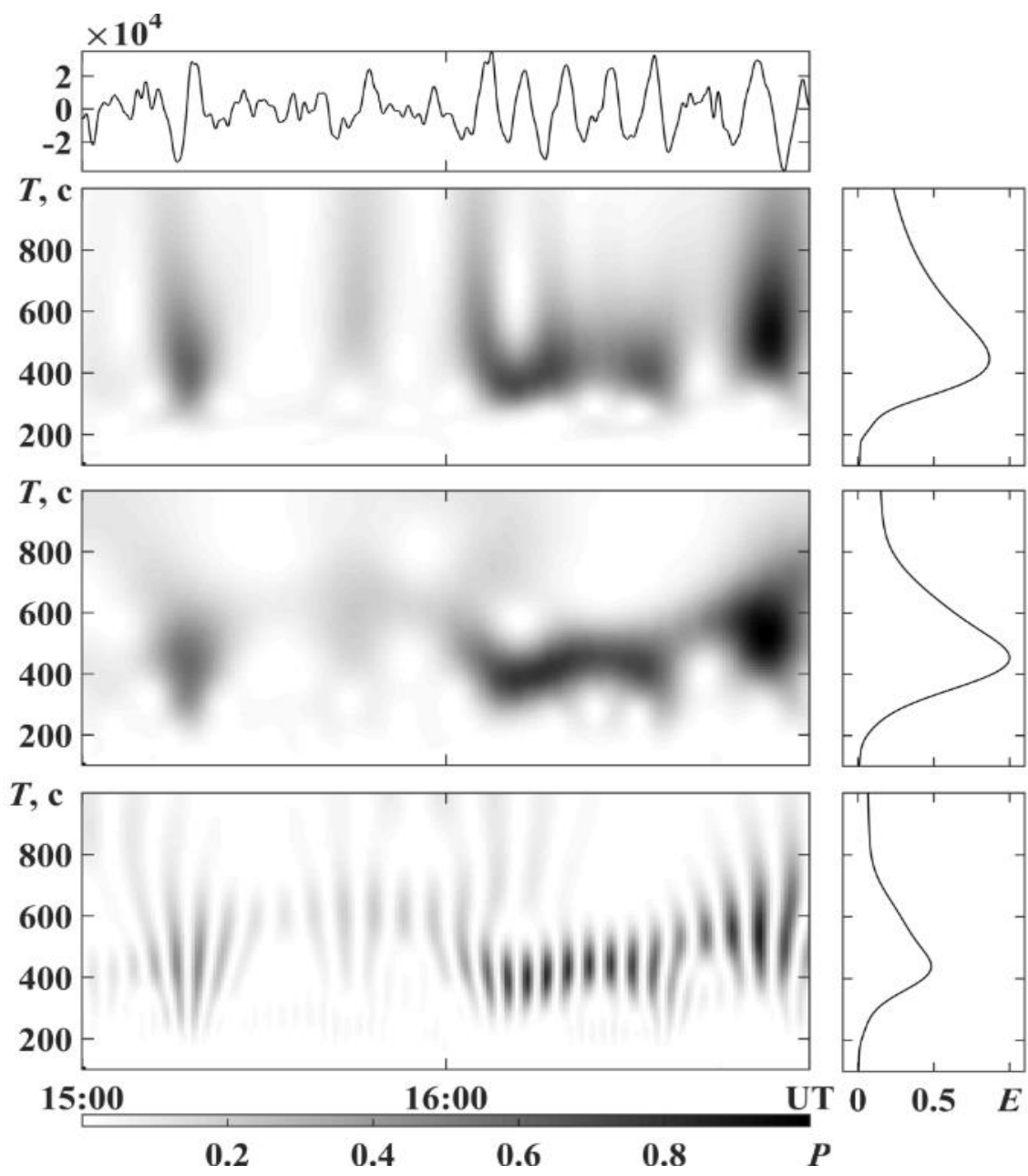
Час запізнювання приходу першого сигналу складає $\Delta t_1 = 875$ хв, $\Delta T_1 = 100$ хв. Якщо можливий ефект пов'язаний із вибухом вулкану, тоді швидкість $v = 296$ м/с. Час запізнювання приходу другого сигналу складає $\Delta t_1 = 1230$ хв, $\Delta T_1 = 50$ хв. Якщо можливий ефект пов'язаний із вибухом вулкану, тоді швидкість $v = 217$ м/с. $\Delta p \sim 4 \cdot 10^6$ відн.од. Період – 400–600 с.

Станція АІА («Академік Вернадський»)

Перший канал







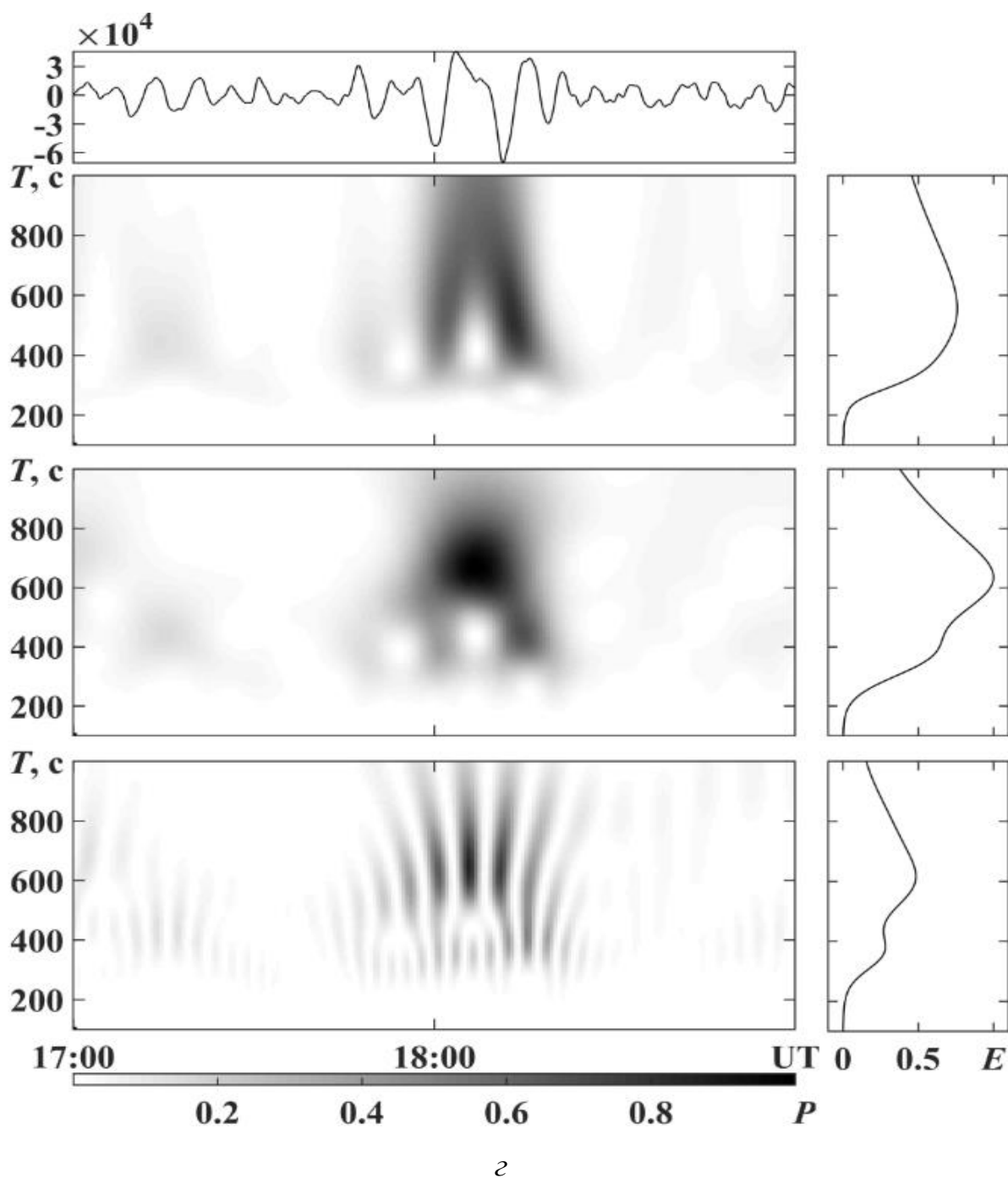


Рисунок 3.10 – Результати смугової фільтрації та ССА залежності $\Delta p(t)$, зареєстрованої 17 січня 2022 р. на станції “Академік Вернадський”: частини *a* – *c* – групи сигналів з першої по четверту, які реєструвалися протягом доби. Панелі зверху вниз: хвильова форма, результати ВПФ, АПФ та ВП. Праворуч показано енергограми. Енерговиділення вибуху – 53 т ТНТ

ВИСНОВКИ

1. Збурення атмосферного тиску, характерні для поширення АГХ глобального масштабу, було успішно виявлено та проаналізовано на станціях GRDI та LUGA, а також на низці інших станцій української інфразвукової мережі. Оцінено вплив на канали комунікацій виверження та вибуху потужного супервулкана.

2. Застосування методу ССА дозволило здійснити точну ідентифікацію домінуючих спектральних періодів та їхніх інтервалів. Ця ідентифікація має ключове значення для ефективного розрізнення різних типів джерел атмосферних хвиль, а також для розуміння механізмів їхнього поширення в атмосфері.

3. Отримані результати підтверджують наявність значної хвильової енергії у діапазоні АГХ, а саме з періодами до 800 секунд. Це свідчить про функціонування потужного джерела, яке генерує атмосферні варіації тиску на глобальних відстанях.

4. Встановлено, що найбільш потужними були коливання тиску в інфразвуковій хвилі з періодами НЧ коливань та хвилі Лемба (400–600 с) та АГХ (700–1000 с).

5. Збурення характеристик варіацій тиску (періодів, амплітуд, тривалостей) носило глобальний масштаб і могло значною мірою впливати на параметри радіохвиль різних діапазонів.

ПОСИЛАННЯ НА ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. eds., “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies,” / A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne eds. // Springer, New York, 2010. – 734 p.
2. Ponomarev E. A. Infrasonic waves in the Earth’s atmosphere (review) / E. A. Ponomarev, A. I. Erushchenkov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1977. – V. 20, №.12. – P. 1218 – 1229.
3. Marchetti E, Ripepe M, Olivieri G, Kogelnig A (2015) Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: towards a real-time early warning system. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 15:2545–2555.
4. Chunchuzov I.P., Kulichkov S.N., Popov O.E., Perepelkin V.G. Infrasound propagation through the atmosphere with mesoscale wind velocity and temperature fluctuations // *Waves in Random and Complex Media*. – 2023. – Vol. 33, Iss. 5–6. – Pp. 1250-1265.
5. Natural and Anthropogenic Sources of Seismic, Hydroacoustic, and Infrasonic Waves: Waveforms and Spectral Characteristics (and Their Applicability for Sensor Calibration) by Michaela Schwardt, Christoph Pilger, Peter Gaebler, Patrick Hupe & Lars Ceranna
6. Effects of ultrasound and infrasound relevant to human health by Alastair McKinlay
7. Albert S, Linville L (2020) Benchmarking current and emerging approaches to infrasound signal classification. *Seismol Res Lett* 91(2):921–929
8. Podglajen, A., Le Pichon, A., Garcia, R. F., G erier, S., Millet, C., Bedka, K., et al. (2022). Stratospheric balloon observations of infrasound waves from the 15 January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100833. <https://doi.org/10.1029/2022GL100833>

9. Landès M, Ceranna L, Le Pichon A, Matoza RS (2012) Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network. *J Geophys Res: Atmos* 117
10. Landès M, Le Pichon A, Shapiro NM, Hillers G, Campillo M (2014) Explaining global patterns of microbarom observations with wave action models. *Geophys J Int* 199:1328–1337
11. Cook RK (1969) Atmospheric sound propagation—In: Atlas D and others (eds.) *Atmospheric Exploration by Remote Probes*, volume 2. National Academy of Sciences, Rockville, USA, pp. 633–669
12. Blanc E, Ceranna L, Hauchecorne A et al (2018) Toward an improved representation of middle atmospheric dynamics thanks to the ARISE project. *Surv Geophys* 39:171–225
13. Dessler AJ (1973) Infrasonic thunder. *J Geophys Res* 78:1889–1896
14. Christie DR, Kennett BL, Tarlowski C (2005) Detection of regional and distant atmospheric explosions at IMS infrasound stations. *Proceedings of the 27th Seismic Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies*
15. Pilger C, Hupe P, Gaebler P, Ceranna L (2021a) 1001 rocket launches for space missions and their infrasonic signature. *Geophys Res Lett* 48
16. Balachandran NK, Donn WL (1971) Characteristics of infrasonic signals from rockets. *Geophys J Int* 26:135–148
17. Liszka L (1978) Long-distance focusing of Concorde sonic boom. *J Acoust Soc Am* 64:631–635
18. Matoza RS, Garcés MA, Chouet BA, D'Auria L, Hedlin MA, De Groot-Hedlin C, Waite GP (2009b) The source of infrasound associated with long-period events at Mount St. Helens. *J Geophys Res Solid Earth* 114(4).
19. Marchetti E, Walter F, Barfucci G, Genco R, Wenner M, Ripepe M, McArdell B, Price C (2019) Infrasound array analysis of debris flow activity and implication for early warning. *J Geophys Res Earth Surf* 124:567–587

20. Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method / Y. Cansi // *Geophysical research letters*. – 1995. – V. 22, №. 9. – P. 1021–1024.
21. Cansi Y., Pichon A.L. (2008) Infrasound Event Detection Using the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm. In: Havelock D., Kuwano S., Vorländer M. (eds) *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Springer, New York, NY – P. 1425 – 1435.
22. Cansi Y., Pichon A.L. (2008) Infrasound Event Detection Using the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm. In: Havelock D., Kuwano S., Vorländer M. (eds) *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Springer, New York, NY – P. 1425 – 1435.
23. *Infrasound monitoring for atmospheric studies* / A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (ed.). – Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2019. – XXVIII, 1167 p.
24. Лазоренко О. В. Надширокосмугові сигнали та процеси: Монографія / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Чорногор. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2009. — 576 с.
25. Chernogor L. F., *Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results*// *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2008. – V. 48, No 5. – Pp. 652 – 673.