

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 ” серпня 2024 року

Кваліфікаційна робота магістра
на тему:

«Інфразвукові ефекти вибуху супервулкана Тонга»

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



Хан Віктор Костянтинівич

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



Харків 2024

УДК 534.321.8

Хан В. К. Інфразвукові ефекти вибуху супервулкана Тонга / В. К. Хан. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. – 41 с.

Наведено аналітичний огляд результатів дослідження поширення інфразвукових хвиль від природніх і техногенних джерел. Описано результати експериментальних досліджень акустичних ефектів від виверження супервулкану Тонга за даними вимірювань на мережі українських станцій. Визначено основні характеристики інфразвукового сигналу. За результатами системного спектрального аналізу сигналу оцінено параметри збурень у атмосферному радіоканалі.

18 іл., 1 табл., 25 бібл., 43 с.

Khan V. K. The statistical characteristics of the infrasound signals propagated in the atmosphere / N. B. Shevelev. – Kharkiv, Kharkiv V. N. Karazin National University, 2024. – 79 p.

An analytical review of the research results on the propagation of infrasonic waves from natural and anthropogenic sources is presented. The results of experimental studies of acoustic effects from the eruption of the Tonga supervolcano based on measurements from the network of Ukrainian stations are described. The main characteristics of the infrasonic signal are determined. Based on the results of a systematic spectral analysis of the signal, the parameters of disturbances in the atmospheric radio channel are assessed.

18 Figures, 1 Tables, 25 References, 43 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	25
3.1 Результати смугової фільтрації	25
3.2. Результати системного спектрального аналізу	31
ВИСНОВКИ	40
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	41

ВСТУП

Актуальність дослідження

Інфразвук, як нечутна для людського вуха вібрація, має широкий спектр застосування та досліджень, які відкривають перед нами нові можливості та розуміння природних явищ.[1]

Існує цілий ряд різних типів джерел акустичних ефектів, а саме джерела природного та антропогенного походження.

Природні джерела звуку та їхні ефекти

Природа є потужним джерелом різноманітних звуків. До основних природних джерел звуку належать:

- **Атмосферні явища:** вітер, грози, дощ, град створюють широкий спектр звуків, від шелесту листя до гучних гроз.
- **Вода:** шум морських хвиль, дощ, водоспади, рух льодовиків – все це створює характерні звукові пейзажі.
- **Живі організми:** звуки тварин (птахи, звірі, комахи) слугують для спілкування, попередження про небезпеку та інші цілі.
- **Геологічні процеси:** землетруси, вулканічні виверження, обвали породжують потужні звукові хвилі.

Антропогенні джерела звуку та їхні ефекти

Діяльність людини створює велику кількість штучних звуків. До основних антропогенних джерел звуку належать:

- **Транспорт:** автомобілі, літаки, потяги, судна є основними джерелами шуму в містах.
- **Промисловість:** робота заводів, фабрик, будівельних майданчиків створює високий рівень шуму.
- **Комунальне господарство:** робота вентиляційних систем, кондиціонерів, побутової техніки.
- **Будівництво:** шум від будівельних робіт, використання інструментів.

Дослідження інфразвуку дозволяють вивчати процеси в атмосфері, зокрема такі, як висотні варіації температури атмосфери, швидкість і напрям атмосферного вітру, поглинання та розсіяння інфразвукових хвиль і пов'язані з цим турбулентні процеси.

Впливу джерел інфразвуку та особливостям поширення інфразвуку присвячено книги [1, 2], а також ряд оглядових статей [3 – 30].

Об'єкт дослідження – атмосферний інфразвук.

Предмет дослідження – статистичні характеристики інфразвукових сигналів і метеороїдів як джерел інфразвуку.

Методи досліджень – експериментальне, комп'ютерне моделювання. Під час аналізу статистичних характеристик інфразвукових сигналів та метеороїдів використовувалися методи математичної статистики та статистичної радіофізики.

Мета роботи – експериментальні дослідження параметрів інфразвукового сигналу, що був згенерованих вибухом супервулкану Тонга.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальні відомості

Для більш детального огляду інфразвукових ефектів дамо визначення більш загальному явищу – інфразвуку.

Інфразвук є невід'ємною частиною широкого спектра акустичних явищ, або **акустичних ефектів**. Людське вухо, не здатно почути та розрізнити цей звук, але він відіграє важливу роль у багатьох природних процесах та має ряд технічних застосувань. Завдяки науці людство навчилося розпізнавати та досліджувати ці звуки.

Акустичні ефекти – це явища, пов'язані з поширенням звукових хвиль та їхньою взаємодією з середовищем. Акустичні ефекти мають широкий спектр проявів у природі та антропогенній діяльності. Звуки можуть виникати як унаслідок природних процесів, так і через вплив діяльності людини [3].

Інфразвук вважається акустичним ефектом по декількам ознакам, а саме:

- **Природа коливань:** Інфразвук є результатом механічних коливань частинок середовища (повітря, води, твердих тіл). Ці коливання поширюються у вигляді хвиль.
- **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 звукові хвилі з частотою нижче 16 герц, тобто такі, які людське вухо не здатне сприйняти. Незважаючи на свою нечутність, інфразвук має значний вплив на організм людини та навколишнє середовище [3].

Розглянемо корисність інфразвуку на прикладі наукової статті [4]

Ця стаття присвячена дослідженню складних процесів, що відбуваються у верхніх шарах атмосфери Землі. Вона, описує новий метод дослідження гравітаційних хвиль, які є важливими для розуміння динаміки атмосфери.

Інфразвук – це ключовий елемент дослідження, описаного у статті. Його роль полягає в тому, щоб слугувати своєрідним зондом для вивчення гравітаційних хвиль у середній атмосфері.

Основні причини використання інфразвуку:

- **Велика дальність поширення:** Інфразвукові хвилі можуть поширюватися на тисячі кілометрів, що дозволяє реєструвати їх на великих відстанях від джерела.
- **Слабке поглинання:** На відміну від звукових хвиль, які ми чуємо, інфразвук менше поглинається атмосферою, тому він може проникати в верхні шари атмосфери.
- **Взаємодія з гравітаційними хвилями:** Коли інфразвукова хвиля зустрічається з гравітаційною хвилею, вони можуть взаємодіяти, змінюючи свої характеристики. Аналізуючи ці зміни, вчені можуть отримати інформацію про властивості гравітаційних хвиль.

Як інфразвук використовується для дослідження гравітаційних хвиль?

1. **Генерація інфразвуку:** Вибухи створюють потужні інфразвукові імпульси, які поширюються в атмосфері.

2. **Проходження через середню атмосферу:** Під час проходження через середню атмосферу, інфразвукові хвилі взаємодіють з гравітаційними хвилями, що призводить до зміни їхньої форми та амплітуди.
3. **Реєстрація інфразвуку:** Спеціальні інфразвукові датчики, розташовані на земній поверхні, реєструють змінені інфразвукові сигнали.
4. **Аналіз даних:** Вчені аналізують отримані дані за допомогою складних математичних моделей, щоб виділити характеристики гравітаційних хвиль.

Яку інформацію можна отримати?

- **Розподіл гравітаційних хвиль:** Де і з якою інтенсивністю виникають гравітаційні хвилі.
- **Швидкість поширення гравітаційних хвиль:** Це дозволяє оцінити температуру і склад атмосфери на різних висотах.
- **Період і амплітуда гравітаційних хвиль:** Ці характеристики пов'язані з енергією, що переноситься хвилями.

Чому це важливо?

- **Розуміння атмосферних процесів:** Гравітаційні хвилі відіграють важливу роль у формуванні погоди і клімату.
- **Прогнозування погоди:** Дослідження гравітаційних хвиль може допомогти вдосконалити моделі прогнозу погоди.
- **Дослідження кліматичних змін:** Гравітаційні хвилі можуть впливати на загальну циркуляцію атмосфери і, таким чином, на клімат Землі.

Висновки:

Використання інфразвуку для дослідження гравітаційних хвиль є перспективним методом, який дозволяє отримати нову інформацію про процеси, що відбуваються у верхніх шарах атмосфери. Ці дослідження мають важливе значення для розуміння нашої планети і прогнозування майбутніх змін клімату.

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 в результаті природних явищ, таких як суворя погода, лавини, блискавки, вулкани, землетруси, водоспади, полярні сніга, відколювання айсбергів, метеори та блискавки у верхніх шарах атмосфери. Мікробароми є поширеними інфразвуковими вібраціями приблизно 0,2 Гц, що виникають внаслідок нелінійних взаємодій океанських хвиль під час океанських штормів. Інфразвукові системи

можуть бути використані для ідентифікації лавин у Скелястих горах та виявлення торнадо на великих рівнинах за кілька хвилин до їх виходу на сушу, як це робить програма інфразвуку NOAA [5].

Тварини також спілкуються за допомогою звукових хвиль. Звукові хвилі, такі як інфразвукові та ультразвукові, допомагають тваринам спілкуватися з іншими тваринами. Тварини, такі як кити, слони, бегемоти, жирафи, пави, спілкуються за допомогою інфразвуку.

Інфразвук працює на низьких частотах, як і в діапазоні чутності людини, який зазвичай становить від двадцяти герц. Таким чином, інфразвук відноситься до звуку нижче діапазону чутності людини. Тварини мають нижчу чутливість, ніж люди. Їхній сенсорний орган захоплює хвилі нижче двадцяти герц. Тваринам, які живуть у воді, таким як дельфіни, кити, потрібні хвилі високої інтенсивності, оскільки звукові хвилі важко поширюються у воді. Зокрема, суматранський носоріг був показаний, що видає звуки з дуже низькими частотами, такими як 3 Гц, які схожі на пісню горбатого кита.

Пороги чутності в інфразвуковому та низькочастотному діапазоні показано на рис. 2.2 Суцільна лінія вище 20 Гц є низькочастотним кінцем стандартного порогу ISO [6].

Мікробароми - це інфразвукові коливання атмосферного тиску, спричинені взаємодією океанських хвиль. Іншими словами, це низькочастотні звуки, які генеруються океаном і можуть поширюватися на великі відстані в атмосфері [7]. З одного боку, мікробароми генеруються поверхневим рухом, що стискає верхнє повітря, а з іншого боку, океанським випромінюванням. Вони поширюються в атмосфері, особливо в стратосфері. [8]

Гірські хвилі - це атмосферні явища, які виникають, коли вітер перетинає гірський хребет. Коли повітряний потік натикається на гірський бар'єр, він змушений підніматися вгору по схилу. Цей підйом призводить до охолодження повітря та конденсації водяної пари, що може утворювати хмари, а іноді й опади. (MAW) є

інфразвуковим явищем, що виникає в регіонах з високими горами або гірськими хребтами [9]. Інфразвукова мережа IMS дозволила визначити основні глобальні джерела MAW [10] серед яких є південні Анди, а також високі гірські хребти в Центральній Азії, Новій Зеландії та Північній Америці. Точний механізм виникнення MAW ще не повністю з'ясований.

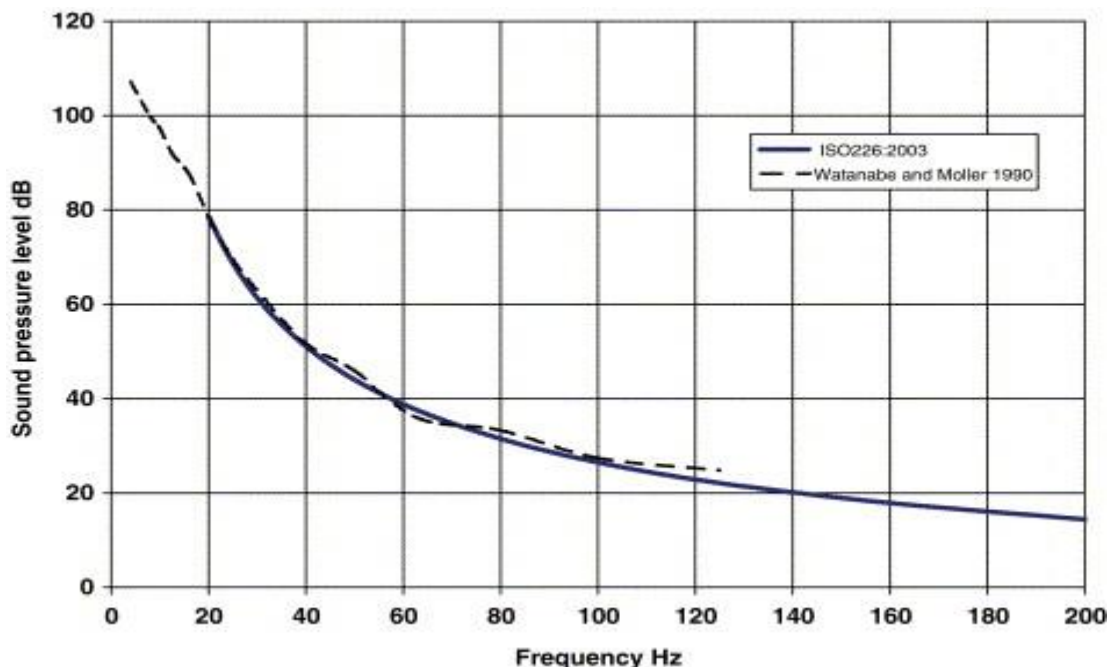


Рис 1.2 Сприйняття інфразвуку та низькочастотного шуму

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

Також інфразвукові хвилі можна спостерігати у **грозових блискавках**, що виникає внаслідок взаємного відштовхування заряджених крапель води в заряджених областях хмари, є відповідальною за значну частину акустичних викидів, створюючи як акустичні хвилі в чутному (тобто грім), так і інфразвуковому діапазоні. Головним механізмом, як вважається, є генерація ударної хвилі за рахунок швидкого теплового розширення каналу блискавки. Після розряду блискавки утворюється акустичний імпульс розрідження, оскільки відновлюється рівновага атмосферного тиску [11]. Сигнали від блискавки є, таким чином, одиночними імпульсами з типовою N-

подібною формою, тобто стисненням, за яким слід розрідження, спостережуваним у діапазоні частот від 0,1 до 10 Гц, з багатьма спостереженнями між 0,2 і 2 Гц.

1.3.2 Антропогенні джерела

Хімічні та ядерні вибухи. Подібно до природних джерел, таких як вулканічні виверження, хімічні та ядерні вибухи, як атмосферні, так і підземні, генерують виявляються інфразвукові хвилі. Вибухові події можуть бути виявлені на інфразвукових датчиках на великих відстанях від кількох сотень до тисяч кілометрів залежно від розміру вибуху та переважаючих умов стратосферного вітру. З підвітряного боку джерела виявляються значно краще, ніж з навітряного або перпендикулярно до джерела [12]. Основним застосуванням інфразвукової технології в контексті Договору про всеосяжне заборону ядерних випробувань (СТВТ) є виявлення атмосферних ядерних випробувань, які не проводилися вже понад 40 років. Однак було виявлено, що проведені в останні десятиліття підземні (ядерні) вибухи викликають виявляються інфразвук.

Запуски ракет. Інфразвукові сигнали генеруються при запалюванні, горінні та повторному вході ступенів ракети [13]. Основними джерелами є аероакустична енергія, що генерується вихлопом надзвукового двигуна, та конус Маха, який утворюється, коли ракета досягає надзвукових швидкостей. Реєструються два різні набори сигналів, де одна група представляє звук із напрямку місця запуску [14] а інша представляє звук, що виходить від повторного входу першої або другої стадії. Якщо приймач розташований уздовж траєкторії ракети, то спочатку спостерігається група сигналів повторного входу через високу складову швидкості ракети, що наближається до приймача.

Надзвукові літаки, гелікоптери. Об'єкти, такі як надзвукові літаки, повторно входять космічні апарати та капсули повернення зразків, генерують інфразвук, рухаючись через атмосферу з надзвуковими швидкостями. Рухаючись з надзвуковою

або гіперзвуковою (визначається як п'ять разів швидкість звуку) швидкістю, ці об'єкти генерують ударну хвилю, що призводить до типових сигналів N-подібної форми (наприклад, de Groot-Hedlin et al. 2010), які можуть бути зареєстровані на великих відстанях [15].

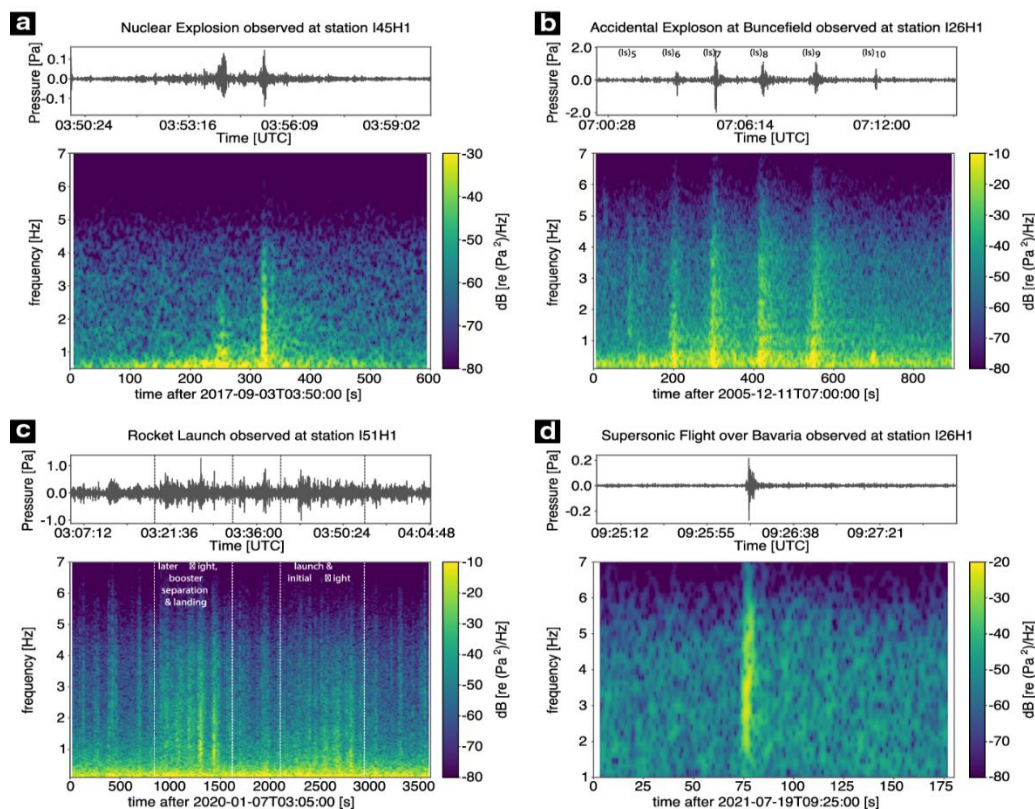


Рис 1.3 Спектрограма останнього підземного ядерного випробування (КНДР 6) у Північній Кореї [<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-022-09713-4/figures/6>]

1.4 Використання інфразвуку у сейсмології

Починаючи з 1950 року, наше суспільство зазнало великого стрибку у розвитку в комунікаціях і транспорті, стаючи більш вразливим до впливу великого атмосферного попелу, що розсіюється під час вулканічних вивержень як на локальному, так і на глобальному рівні.

За останні десятиліття від зустрічі цивільної та військової авіації з вулканічним попелом призводили до катастроф, або ситуацій дуже близьких до них. Вулканічний попіл, що потрапляє в реактивні турбіни літака, може спричинити згасання полум'я та

зупинку двигуна, оскільки температура плавлення силікатного попелу нижча за робочу температуру двигуна. Пошкодження були зафіксовані як для короткотривалих польотів у товстих хмарах попелу (з концентрацією попелу $>2 \text{ г/м}^3$), так і для тривалого впливу розведеного попелу [5]. Задля уникнення таких проблем у майбутньому людству можуть допомогти дослідження пов'язані з інфразвуком.

Інфразвук може надати додаткову інформацію про джерело землетрусу, яку важко отримати лише за допомогою сейсмічних даних. Серед наземних методів моніторингу вулканів інфразвук є єдиним, здатним виявляти вибухові виверження на відстані тисячі кілометрів. Постійний аналіз інфразвукового масиву в атмосфері, використовуючи акустичну амплітуду та стійкість виявлення, дозволяє автоматичну, майже в реальному часі ідентифікацію вивержень вулкану [16].

Також інфразвук може бути чутливим до певних типів рухів земної кори, які можуть не бути добре зареєстровані сейсмографами. Аналіз інфразвукових сигналів може допомогти визначити розміри джерела землетрусу, оскільки амплітуда і тривалість інфразвукових хвиль пов'язані з енергією, яка вивільняється під час землетрусу. Також інфразвукові дані можуть допомогти визначити, яким чином відбувалося 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 від вулканів є низькочастотною (нижче 20 Гц, порогу слуху людини) і називається інфразвуком. Цю інформацію можна використовувати для виявлення, локалізації, характеристики та визначення вулканічних вивержень, що забезпечує цінний вулканів. Інтенсивна робота в цій сфері протягом останнього десятиліття продемонструвала значущість взаємодій хвильового поля з топографією, таких як розсіяння та дифракція [17].

Наявність недорогих безпілотних літальних апаратів та доступного програмного забезпечення для побудови структури з руху дозволило більшій кількості дослідників створювати високороздільні цифрові моделі висот (DEM) вулканічних споруд, які можна використовувати для моделювання поширення інфразвуку

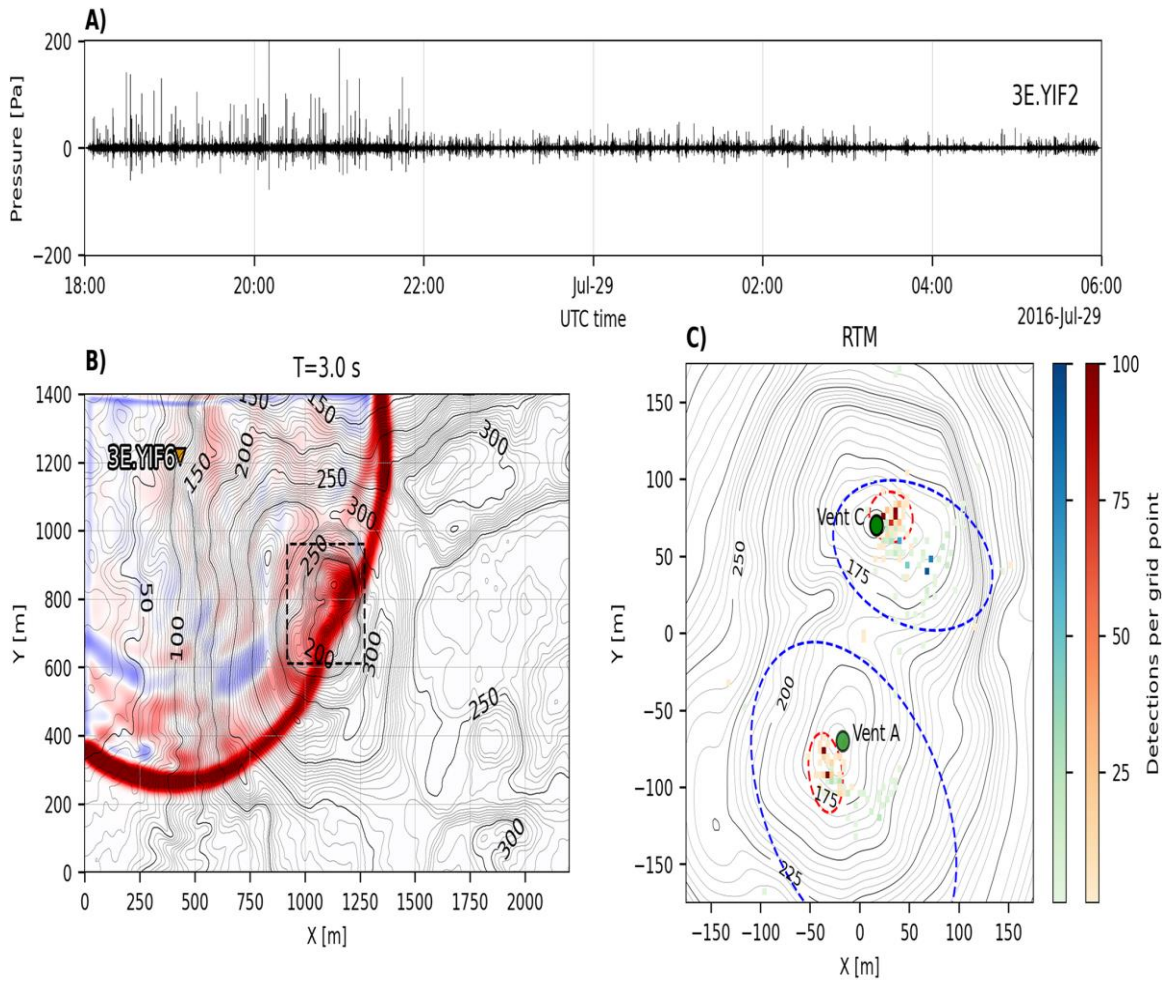


Рис 1.4 Демонстрація суттєвого впливу топографії на інфразвукове хвильове поле та локації, отримані з інфразвуку, на вулкані Ясур, Вануату. [<https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-022-01544-w/figures/1>]

А. Дванадцять годин інфразвукових даних від станції, розгорнутої на краю кратера. Кожну хвилину відбувається кілька вибухів.

В. Знімок симуляції методу кінцевих різниць у часовій області (FDTD) на 3,0 секунди від станції Ясур YIF6, що поширюється по регіону дослідження. Червоний колір вказує на позитивний тиск (стиснення), а синій – на негативний тиск (розрідження) поширюваної акустичної хвилі на поверхні землі. Штриховані рамки показують розмір області в С.

С 2D-гістограми 12 годин ретропроекованих інфразвукових локацій з часом проходження, обчисленим за допомогою простих нахилених відстаней (сині кольори) проти FDTD-моделювання (червоні кольори). Два активних жерла позначені зеленими колами, а штриховані еліпси представляють 98,9% довірчих інтервалів. Одиниці контуру висоти – метри.

Виверження вулкана Хунга (Тонга), яке почалося в середині грудня 2021 року, досягло кульмінації 15 січня 2022 року з потужним вибухом приблизно о 04:16 за всесвітнім часом (UT). Протягом наступної години вулканічний стовп піднявся високо в атмосферу, досягнувши стратопаузи і вище (до 58 км), тоді як хмарна "парасолька" поширилася на висоті приблизно 35 км, утворивши диск діаметром 600 км. Висота вулканічних викидів та масштаб хмарної "парасольки" встановили новий рекорд серед вивержень вулканів за час супутникових спостережень, перевершивши вулкан Пінатубо, максимальна висота виверження якого становила 40 км. Вулканічний стовп викликав значні збурення стратосферного аерозольного шару та складу стратосфери (Millán et al., 2022), що, ймовірно, мало суттєві радіаційні наслідки (Sellitto et al., 2022).

Виверження вулкану Тонга 15 січня 2022 року створило широкий спектр атмосферних хвиль, деякі з яких обійняли всю планету. Одними з приборів що зафіксували такий потужне виверження були стратосферні повітряні кулі, що дрейфували над тропічною частиною Тихого океану [18]. Ці апарати зафіксували унікальні дані про прибуття інфразвукових хвиль, спостерігаючи п'ять повних обертів навколо Землі. Поєднання цих даних з наземними вимірюваннями з міжнародної мережі інфразвукових станцій дозволяє детальніше розглянути сценарій виверження. Зокрема, спостерігається кореляція між спалахами інфразвуку та зростанням вулканічного стовпа. Дані від стратосферних повітряних куль також виявили раніше невідомі особливості поширення інфразвукових хвиль на великі відстані.

Більшість спостережень за хвилями від виверження Хунга були отримані за допомогою дистанційних інструментів або наземних (мікро)барометрів, тоді як стовп виверження поширився вище стратосферних висот

Таблиця координат приймачів та характеристики інфразвуку для наземних приборів 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.

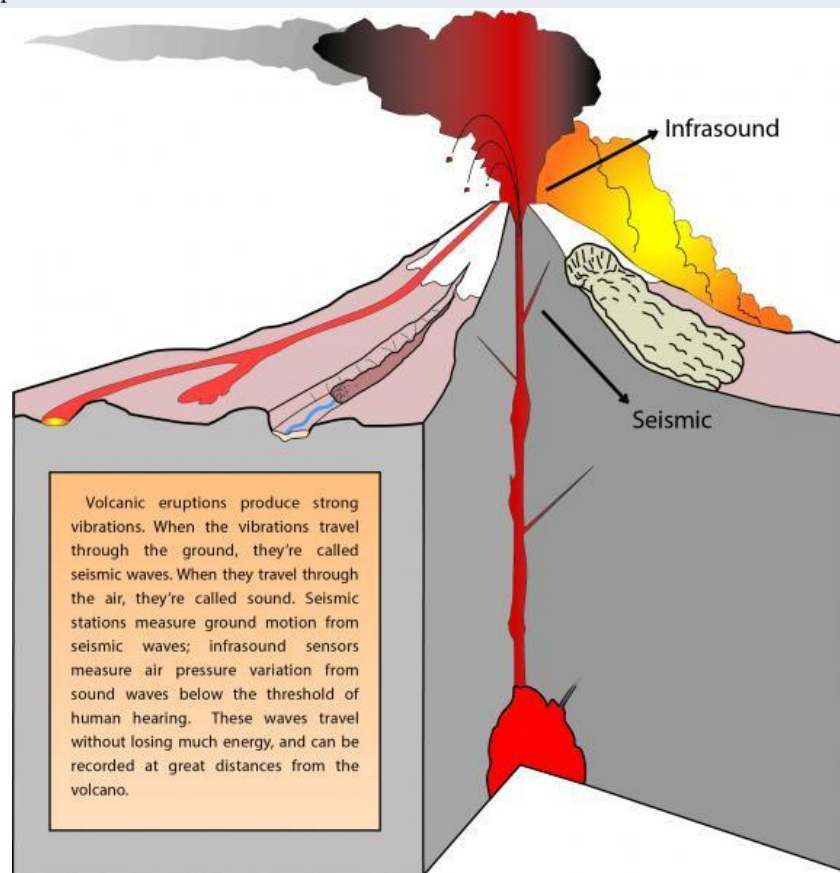


Рисунок 1.5. Інфразвук при виверженні вулкану

[<https://avo.alaska.edu/about/infrasound#:~:text=The%20majority%20of%20the%20sound,valuable%20tool%20for%20volcano%20monitoring>].

Розглянемо коротко цей підхід у дослідженні землетрусу в Кіруні 2020 року [19].

Основна суть дослідження та використання інфразвуку полягала у:

- **Записі інфразвукових сигналів:** вчені використовували спеціальні інфразвукові датчики, розташовані поблизу епіцентру землетрусу, для запису інфразвукових хвиль.
- **Аналізі частотних характеристик:** вчені визначили, на яких частотах спостерігалися найбільш інтенсивні інфразвукові сигнали.
- **Порівняні з сейсмічними даними:** науковці зіставили отримані інфразвукові дані з сейсмічними записами для визначення взаємозв'язку між цими двома типами сигналів.
- **Створені моделі джерела землетрусу:** використовуючи отримані дані, дослідники побудували комп'ютерну модель джерела землетрусу, яка б пояснювала як сейсмічні, так і інфразвукові записи.

Поєднання симуляцій сейсмо-акустичних хвиль у ближньому полі та симуляцій нормальних мод у далекому полі може забезпечити практичну основу для аналізу сейсмічно індукованого інфразвуку.

1.5 Методи обробки інфразвукових сигналів

Одним із сучасних та ефективних методів обробки інфразвукових сигналів є метод PMCC (Progressive Multi-Channel Correlation). Цей алгоритм, розроблений автором роботи [20], спочатку був створений для реєстрації землетрусів шляхом аналізу коливань земної поверхні. Основна ідея методу полягає у вивченні послідовностей віконних сигналів, що надходять із географічно віддалених станцій. Завдяки цьому забезпечується виявлення когерентного сигналу, який є спільним для різних станцій, на відміну від шуму, який зазвичай має некогерентний характер.

Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив корельованих шумів, які можуть призводити до хибних виявлень, а також суттєво підвищити точність локалізації джерела сигналу. Це досягається завдяки збільшенню апертури мережі та

ефективному аналізу часових затримок сигналів, зареєстрованих різними станціями. Подальша обробка передбачає обчислення середньоквадратичних залишків r_{ijk} , що дозволяє уточнити параметри 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 деякі станції, між якими визначаються величини Δt . У разі, якщо r_{ijk} дорівнює 0, місце розташування джерела визначається однозначно [21].

Вперше алгоритм було реалізовано в центральній Франції у 1993 році. На основі аналізу сигналів від трьох землетрусів були визначені швидкості поширення коливань (у межах 2–6 км/с) та їхні азимуту. У роботі [22] наведено приклади застосування методу для обробки даних, отриманих із сейсмічних мереж, які охоплювали різні масштаби. Перша мережа фіксувала ефекти землетрусів у локальному масштабі, друга — у регіональному, а третя, з апертурою 500 км, складалася з п'яти вертикальних довгоперіодних сейсмометрів і забезпечувала дослідження в значно ширшій зоні. (рис. 1.14).

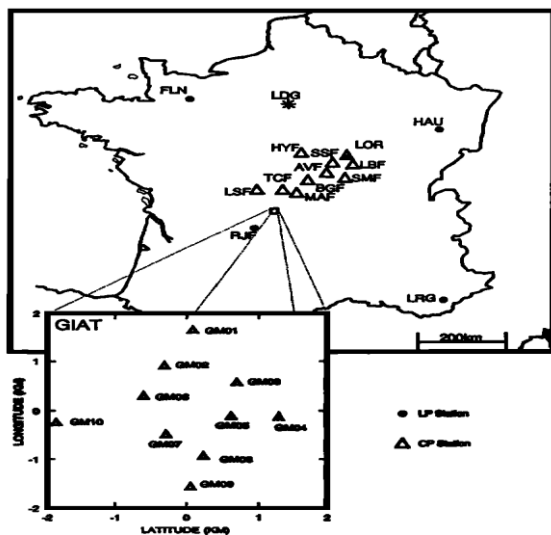


Рисунок 1.6. Розташування трьох мереж сейсмограм на території Франції (згідно з роботою [22]). Крпки показують розташування «довгоперіодних» станцій, трикутники – «короткоперіодні».

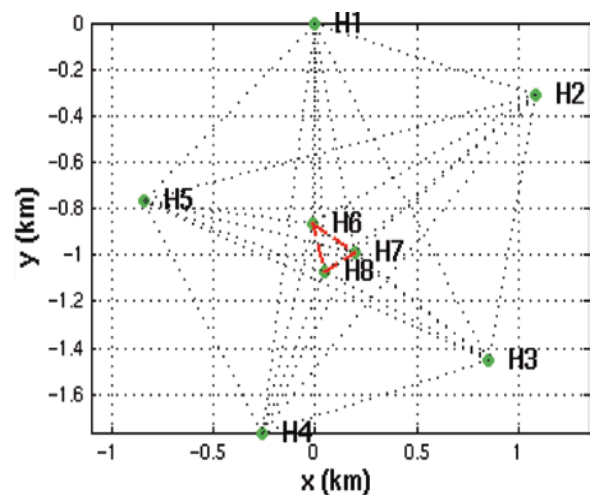


Рисунок 1.7 Замкнена конфігурація інфразвукових датчиків [23].

Як показано в монографії [23], найбільш вдалою реалізацією є розташування «малого» масиву (трикутника) Н6, Н7 та Н8 всередині великого масиву (п'ятикутник) для ефективної селекції даних та відокремлення корисного сигналу від завади (рис. 1.15). Використання все більш віддалених сенсорів (за умови, що вони входять до замкнутого масиву станцій) призводить до збільшення апертури, що, в свою чергу, підвищує точність визначення параметрів хвилі. Остаточне розв'язання теоретичних задач базуються на тих параметрах, що були обчислені за допомогою найбільшої мережі сенсорів, що має найбільшу апертуру [23].

Визначення амплітуди аналізованого сигналу є важливим аспектом обробки даних. Як зазначено в монографії [23], існує три основні методи визначення амплітуди інфразвукового сигналу. Перший — за максимальною амплітудою "від піку до піку", що є різницею між найвищим додатним і найнижчим від'ємним значеннями амплітуди. Другий метод базується на розрахунку максимального середньоквадратичного значення, яке визначає середню амплітуду сигналу за певний часовий інтервал. Третій спосіб використовує максимальну миттєву амплітуду, яка обчислюється за допомогою аналітичного представлення сигналу, отриманого через перетворення Гільберта. У цьому випадку аналітична амплітуда сигналу інтерпретується як миттєва амплітуда хвилі, що описується таким 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

Задля вимірювання інтенсивності інфразвукових сигналів застосовувалися різні моделі мікробарографів і інфразвукових сенсорів у різні періоди часу. Перші надчутливі мікрофони, які вирізнялися високою надійністю та забезпечували безперебійну роботу, були створені Національним бюро стандартизації у Вашингтоні ще на початку 1950-х років [23]. Наразі мережа інфразвукового моніторингу використовує два основні типи мікробарометрів. Перший – модель MB2000, розроблена геофізичною лабораторією при Комісаріаті з атомної енергетики у Франції. Другий – Chaparral Physics Model 5.1, створений у місті Альбукерке, Нью-Мехіко, групою фізиків. У моделі MB2000 смугова фільтрація сигналу здійснюється в діапазоні частот від 0.01 до 27 Гц, а в Chaparral Physics Model 5.1 – до 50 Гц. Перший пристрій дозволяє реєструвати сигнали у діапазоні частот від 0 до 40 Гц, тоді як другий обладнаний сенсорами з рівномірною імпульсною характеристикою на рівні 3 дБ. Завдяки ізольованим електронним компонентам ця модель є термостійкою. [23].

У монографії [23] розглянуто можливі конфігурації інфразвукових станцій, спрямовані на максимально точне визначення параметрів інфразвукової хвилі. Зокрема, встановлено, що оптимальною конфігурацією для визначення азимуту, швидкості приходу та просторової кореляції сигналу є п'ятикутна структура з трьома станціями, розташованими у формі трикутника в центрі (масив із восьми станцій). У роботі також наведено приклади існуючих розташувань каналів на станціях IS04, IS05 та IS07. Автори зазначають, що варіації у схемах розташування каналів зумовлені географічними особливостями, кліматичними умовами, а також модернізацією станцій, до яких додано нові канали, що раніше склалися лише з чотирьох.

У інфразвукових спостереженнях за ядерними вибухами ключовим завданням є зменшення рівня сторонніх завад від інших джерел інфразвуку, зокрема вітру. Для цього застосовуються спеціальні шумознижуючі трубки, які розташовують у різних напрямках. Такий підхід забезпечує ефективне зниження шумового фону від

атмосферних вітрів і дозволяє отримувати максимально чіткі хвильові форми. Приклади шумознижуючих систем наведено на рис. 2.1, де показано конфігурації з 96 портами та діаметром апертури 18 м, а також із 144 портами та діаметром 70 м. Переважно ці типи систем використовуються на станціях IMS.

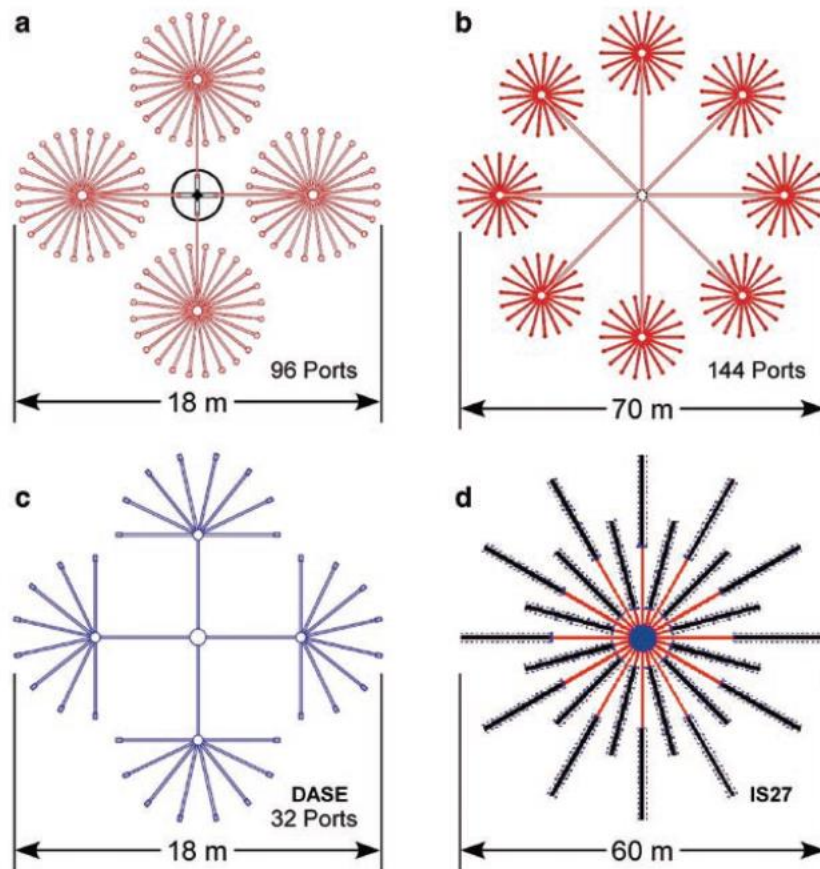


Рисунок 2.1. Типові приклади систем для придушення шумів від атмосферних вітрів.

На рисунку 2.1, d, показано систему шумозниження німецької інфразвукової станції, розташованої в Антарктиді. Канали цієї станції мають спіральну конфігурацію (див., наприклад, [23]), що робить її однією з найефективніших у світі. Така структура дозволяє точно визначати напрямок (азимут) і швидкість приходу інфразвукових хвиль у частотному діапазоні до 0.7 Гц, одночасно ефективно пригнічуючи шуми, викликані вітрами та атмосферними неоднорідностями. У кожній

точці вимірювання встановлено мікробарометри та аналогово-цифрові перетворювачі, захищені від впливу навколишнього середовища алюмінієвими контейнерами та занурені в ополонки [23]. Передача даних до головної станції Ноймайер III здійснюється через Wi-Fi, а живлення – за допомогою кабелю довжиною 10 км.

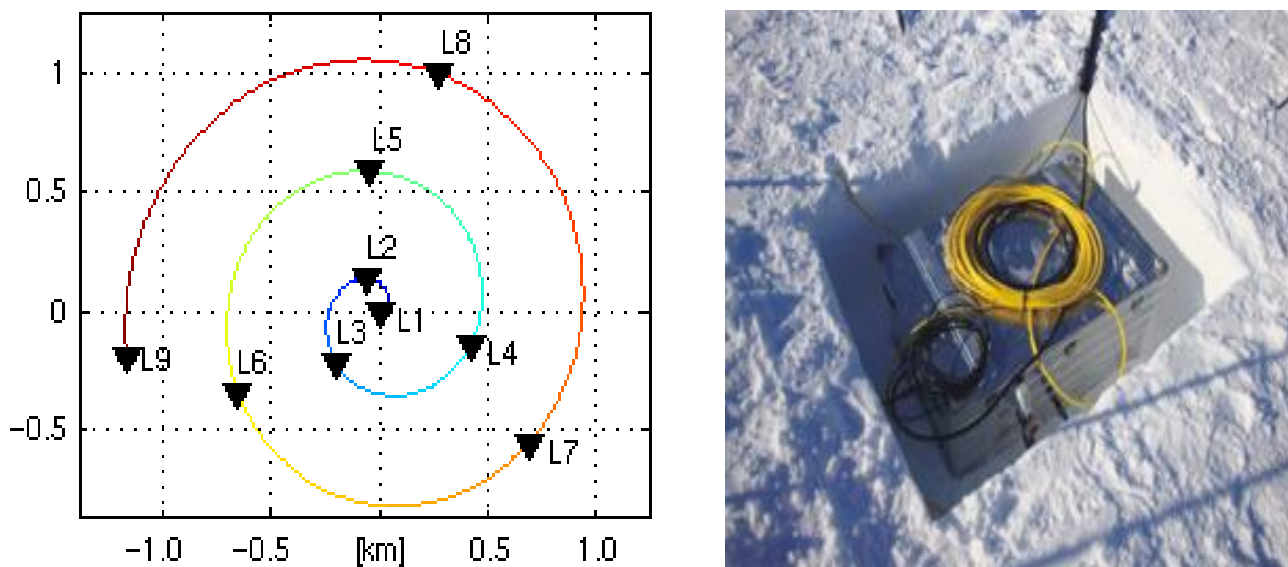


Рисунок 2.2. Конфігурація каналів німецької станції «Ноймаєр III», що розташована в Антарктиді (зліва); мікробарометри та перетворювачі в алюмінієвій ємності, що опущені в ополонку (справа).

Для просторової селекції сигналів застосовуються спеціальні заводозахисні пристрої у формі хвилеводів, які ефективно придушують шуми, спричинені неоднорідностями та турбулентностями приземної атмосфери.

Під час реєстрації інфразвукового сигналу від падіння Челябінського метеорита, що проводилася в Тункінському районі Бурятії, за 150 км від Іркутська, використовувалася інфразвукова апаратура Інституту сонячно-земної фізики СО РАН (ІСЗФ СО РАН). Це обладнання включає переносні павільйони, оснащені мікробарографом, пристроєм калібрування та системою шумозахисту, виконаною у вигляді трубної лінії завдовжки 60 м з 20 вхідними капілярами діаметром 1 мм.

Основні характеристики мікробарографа, який забезпечував реєстрацію сигналів: чутливість – 0.5 В/Па, динамічний діапазон – 80 дБ, смуга частот – від 0.01 до 3 Гц, власний шум – 0.001 Па.

Сьогодні у світі функціонує Міжнародна система моніторингу, що складається з мережі з 60 інфразвукових станцій, які досліджують інфразвукові явища від різних джерел [1]. Її діяльність регулюється Договором про всеосяжну заборону ядерних випробувань.

Далі наведено результати обробки інфразвукових досліджень.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати смугової фільтрації

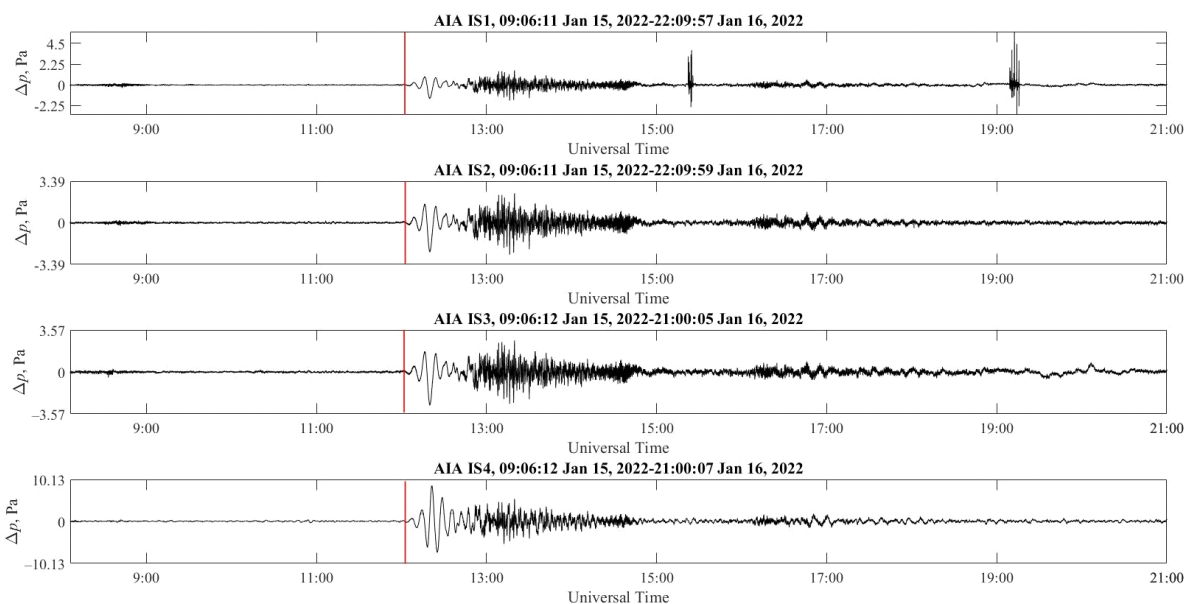


Рис. 3.1. Вихідні часові варіації акустичного тиску та результати смугової фільтрації цих варіацій в діапазонах періодів 1–10, 10–100 та 100–1000 с (панелі зверху вниз) для станції «Академік Вернадський». Відстань від джерела до станції 8867 км

Станція: AIA

Червоною лінією позначений можливий час ефекту.

Відстань до джерела 8867 км.

Якщо припустити, що зміна характеру сигналу, яка відбулася о 12:04 UT, дійсно пов'язана з поширенням акустичної хвилі від вулкану Тонга, тоді маємо час запізнення 28132 с. При відстані $R \approx 8867$ км отримаємо ймовірну швидкість поширення інфразвукових хвиль 315,19 м/с.

Припустимо, що виверження вулкану сталося о 04:15, тоді час запізнення 42 502 с. При відстані $R \approx 8867$ км отримаємо ймовірну швидкість поширення інфразвукових хвиль 207.62 м/с.

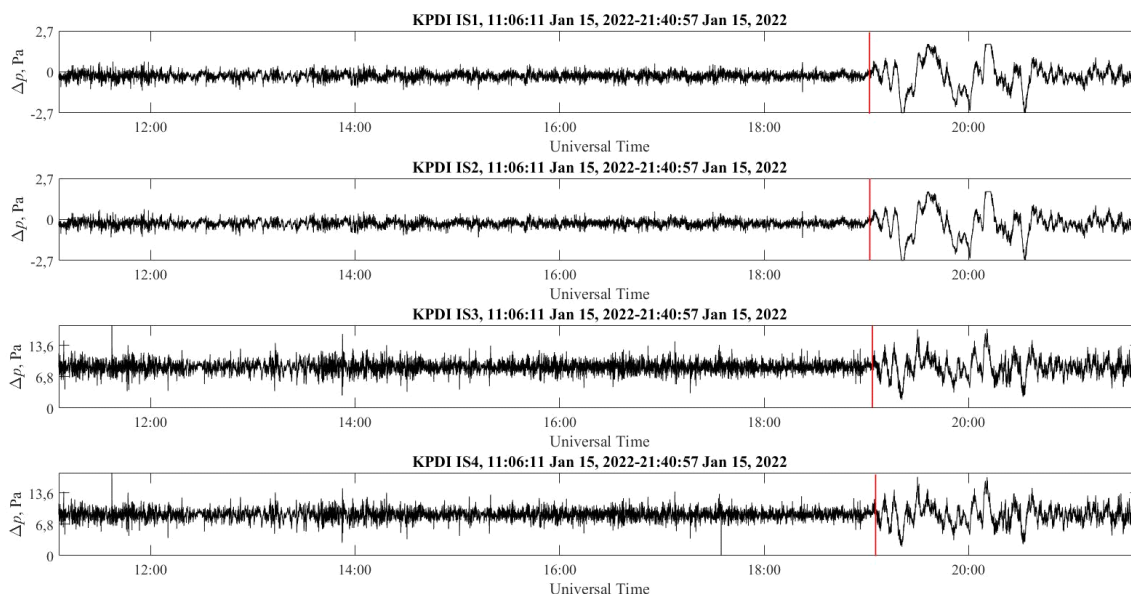


Рис. 3.2. Вихідні часові варіації акустичного тиску та результати смугової фільтрації цих варіацій в діапазонах періодів 1–10, 10–100 та 100–1000 с (панелі зверху вниз) для станції «Кам'янець-Подільський». Відстань від джерела до станції 16330 км

Станція: KPDI

Червоною лінією позначений можливий час ефекту.

Відстань до джерела 16330 км.

1. Якщо припустити, що зміна характеру сигналу, яка відбулася о 19:11 UT, дійсно пов'язана з поширенням акустичної хвилі від вулкану Тонга, тоді маємо час запізнення 53760 с. При відстані $R \approx 16330$ км отримаємо ймовірну швидкість поширення інфразвукових хвиль 303,76 м/с.
2. Якщо припустити, що зміна характеру сигналу, яка відбулася о 20:00 UT, тоді маємо час запізнення 56700с. При відстані $R \approx 16330$ км отримаємо ймовірну швидкість поширення інфразвукових хвиль 288 м/с.

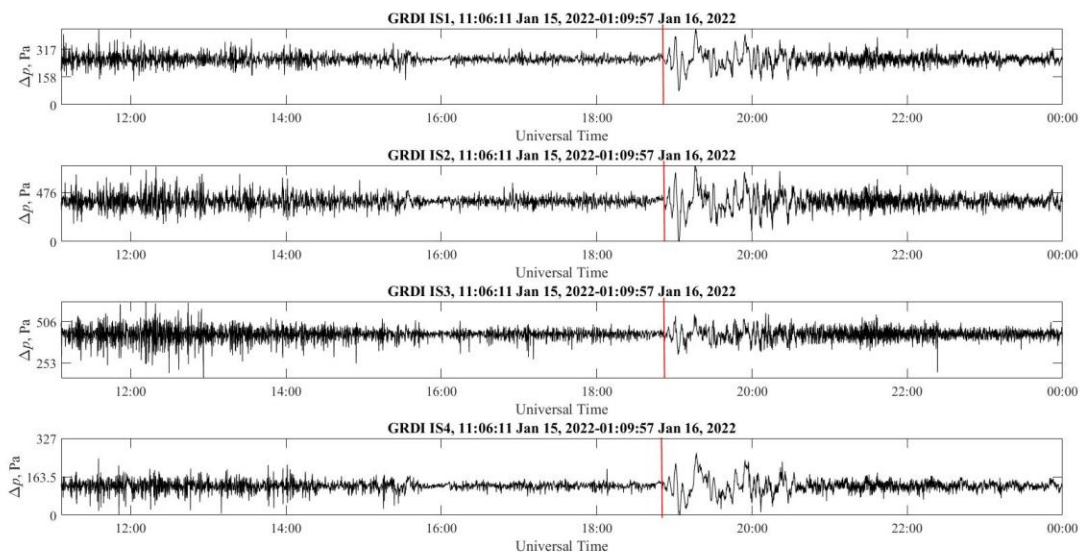


Рис. 3.3. Вихідні часові варіації акустичного тиску та результати смугової фільтрації цих варіацій в діапазонах періодів 1–10, 10–100 та 100–1000 с (панелі зверху вниз) для станції «Кам’янець-Подільський». Відстань від джерела до станції 16330 км Червоною лінією позначений можливий час ефекту.

Відстань до джерела 16018 км.

- Якщо припустити, що зміна характеру сигналу, яка відбулася о 18:50 UT, дійсно пов'язана з поширенням акустичної хвилі від вулкану Тонга, тоді маємо час запізнення 52500с. При відстані $R \approx 16018$ км отримаємо ймовірну швидкість поширення інфразвукових хвиль 305.1 м/с.

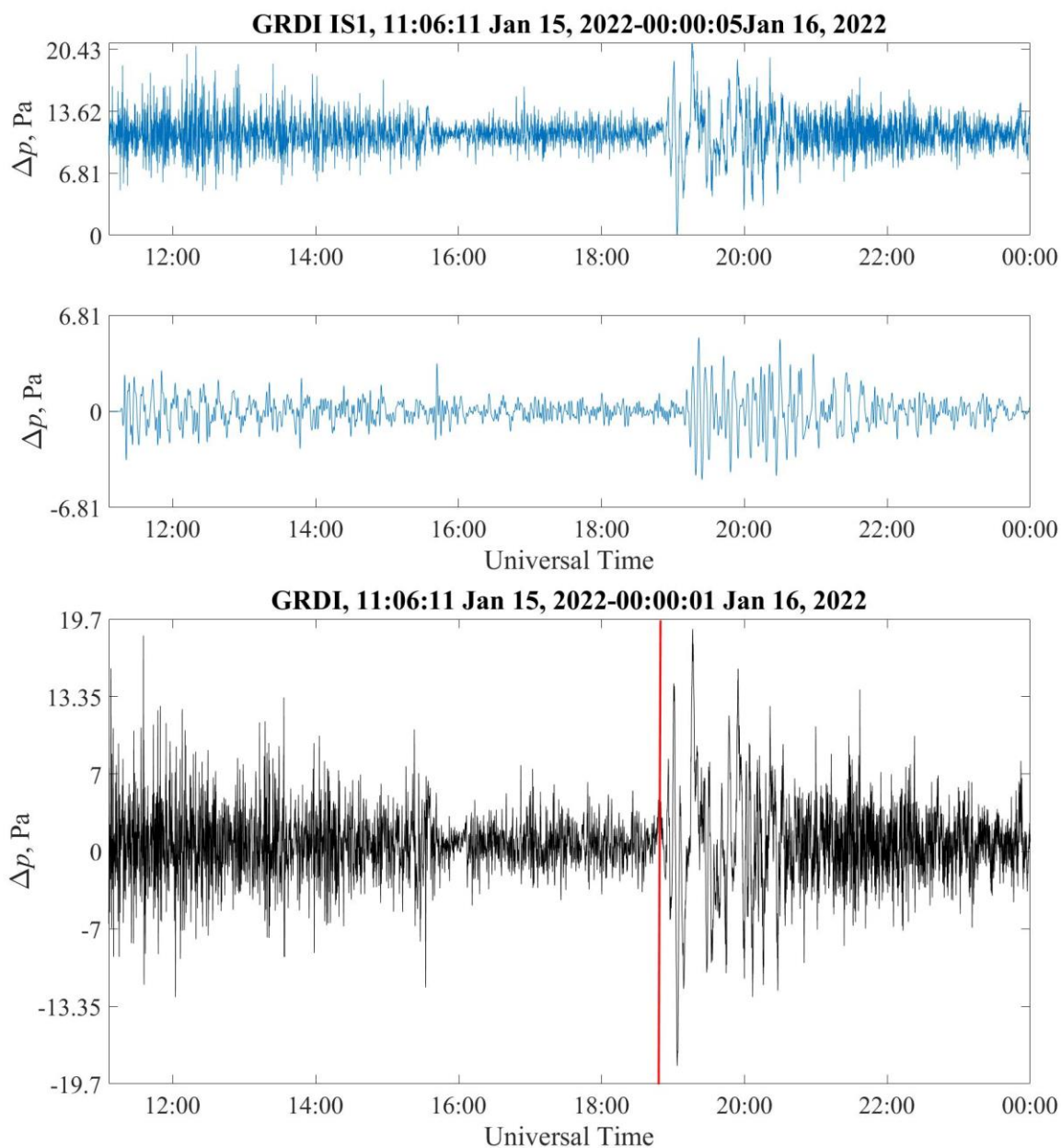
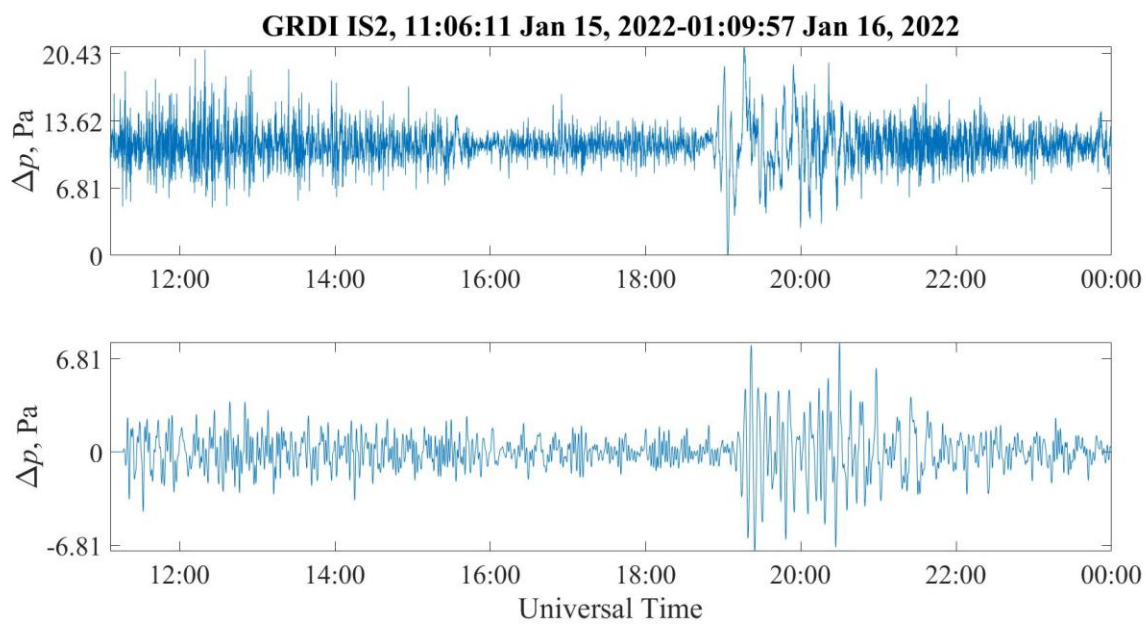
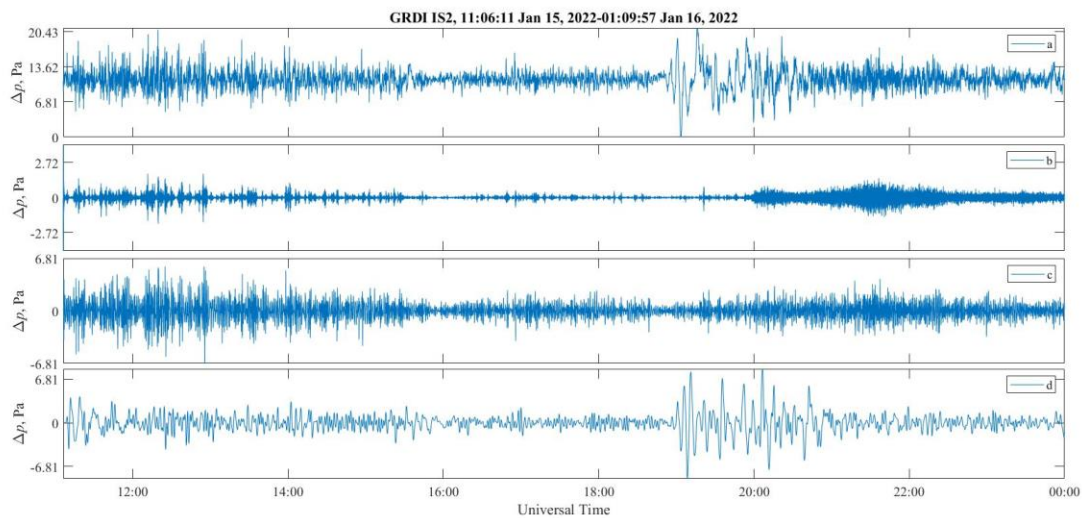


Рис. 3.4. Вихідні часові варіації акустичного тиску та результати смугової фільтрації цих варіацій в діапазонах періодів 1–10, 10–100 та 100–1000 с (панелі зверху вниз) для станції «Кам'янець-Подільський». Відстань від джерела до станції 16330 км

Файл 169



Файл 173

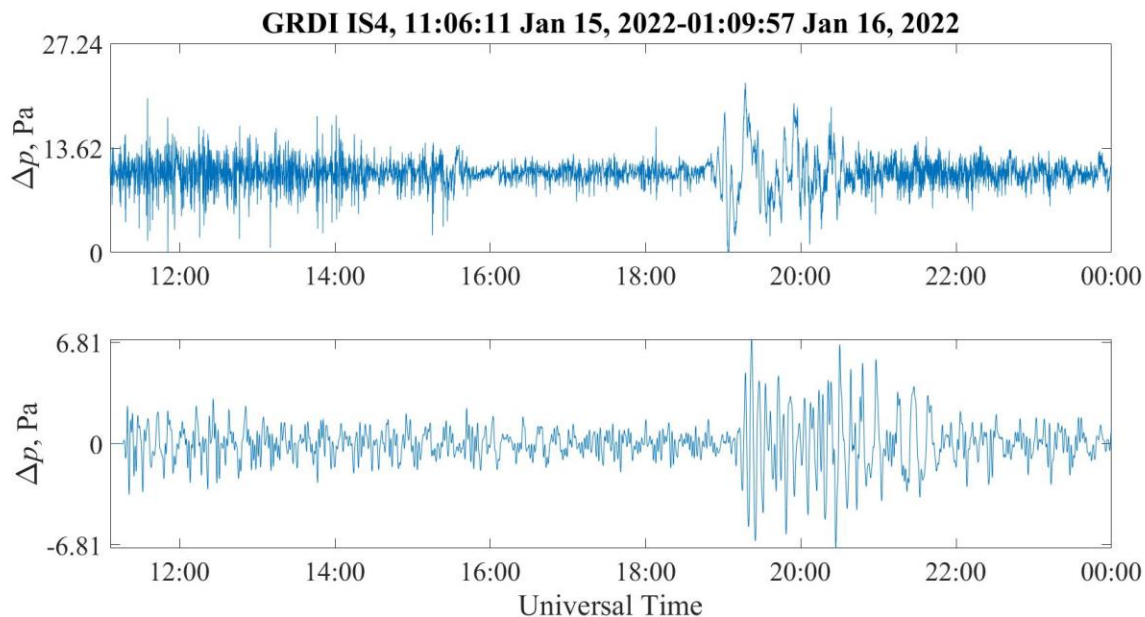


Рис. 3.5. Вихідні часові варіації акустичного тиску та результати смугової фільтрації цих варіацій в діапазонах періодів 1–10, 10–100 та 100–1000 с (панелі зверху вниз) для станції «Городок». Відстань від джерела до станції 16330 км

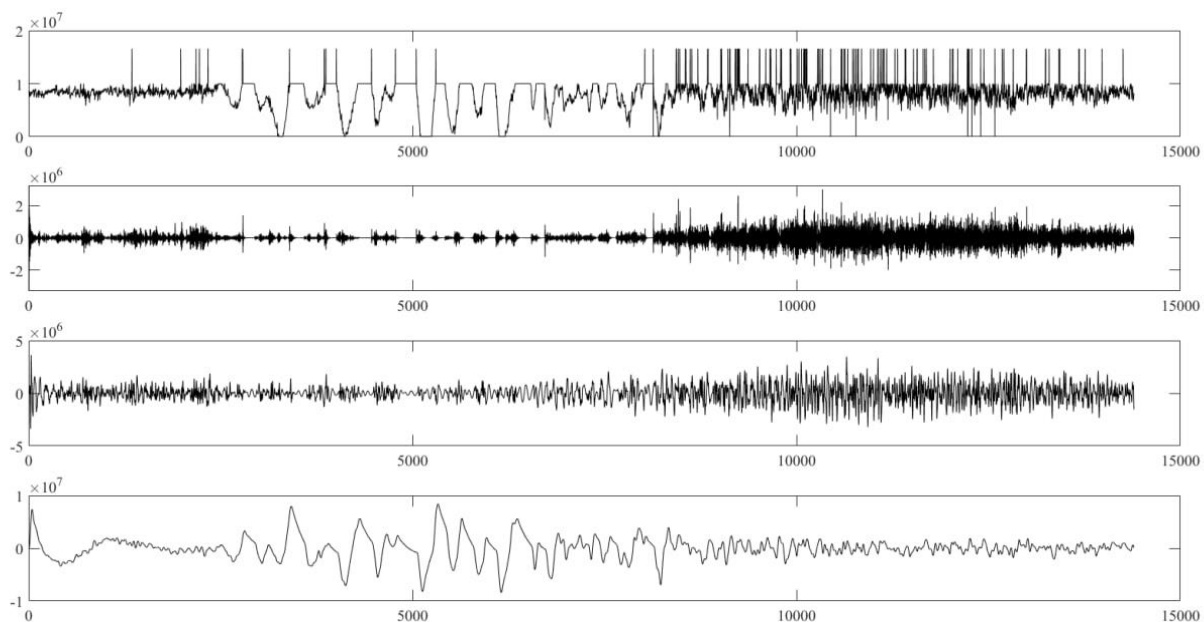


Рис. 3.6. Часові варіації флуктуацій тиску в інфразвуковій хвилі, зареєстровані на станції LUGA ($R \approx 15576$ км): вихідні дані(a) та відфільтровані(b, c, d) смуговим фільтром дані в діапазоні частот 0.1—1 Гц, 0.01—0.1 Гц та 0.001—0.01 Гц відповідно. Початковий момент часу — 08:06:12UT, кінцевий — 05:10:05 UT. Частота відліку — 40 Гц. Час затримки — 53760 с, швидкість поширення інфразвукової хвилі $v \approx 303.76$ м/с.

3.2. Результати системного спектрального аналізу

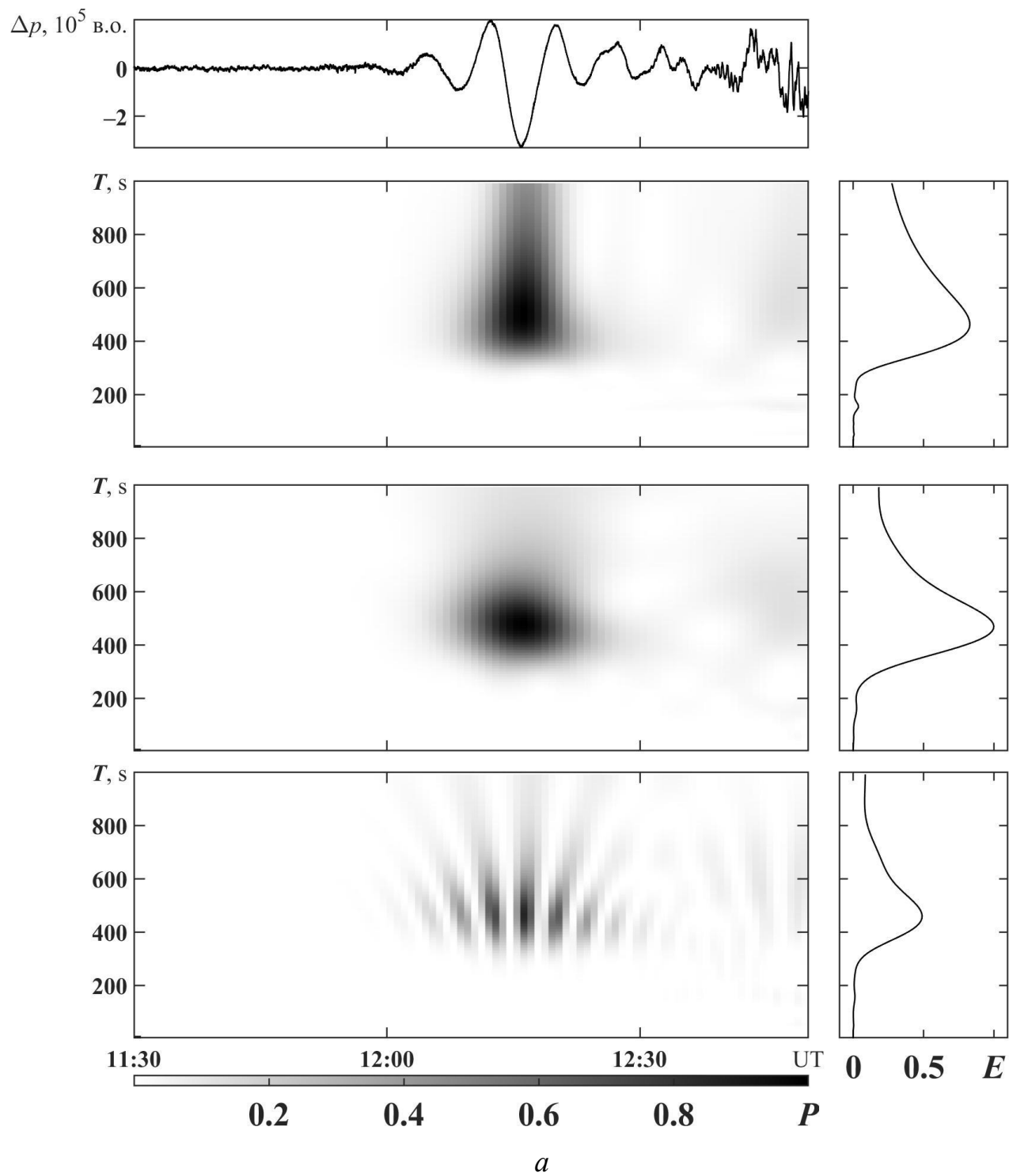
Для детального дослідження параметрів квазіперіодичних варіацій в інфразвуковому сигналі використовувався системний спектральний аналіз часових рядів $\Delta p(t)$ [24, 25]. Метод базується на одночасному використанні віконного перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивного перетворення Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворення (ВП). У вейвлет-перетворенні застосовувався материнський вейвлет у вигляді функції Морле (див., наприклад, [24, 25]). Як відомо, АПФ забезпечує вищу роздільну здатність за частотою (періодом) порівняно з ВПФ, тоді як ВПФ має кращу роздільну здатність у часовій області.

Особливістю АПФ є сталість відносних (нормованих на тривалість "вікна") розділень за часом і періодом при зміні значення відносного періоду, тоді як у ВПФ ці параметри змінюються приблизно на порядок. Вейвлет-перетворення дозволяє збалансувати розділення складових із різними частотами (періодами). Завдяки цьому поєднання ВПФ, АПФ і ВП дає змогу більш детально аналізувати частотно-часову (періодно-часову) структуру різноманітних фізичних процесів.

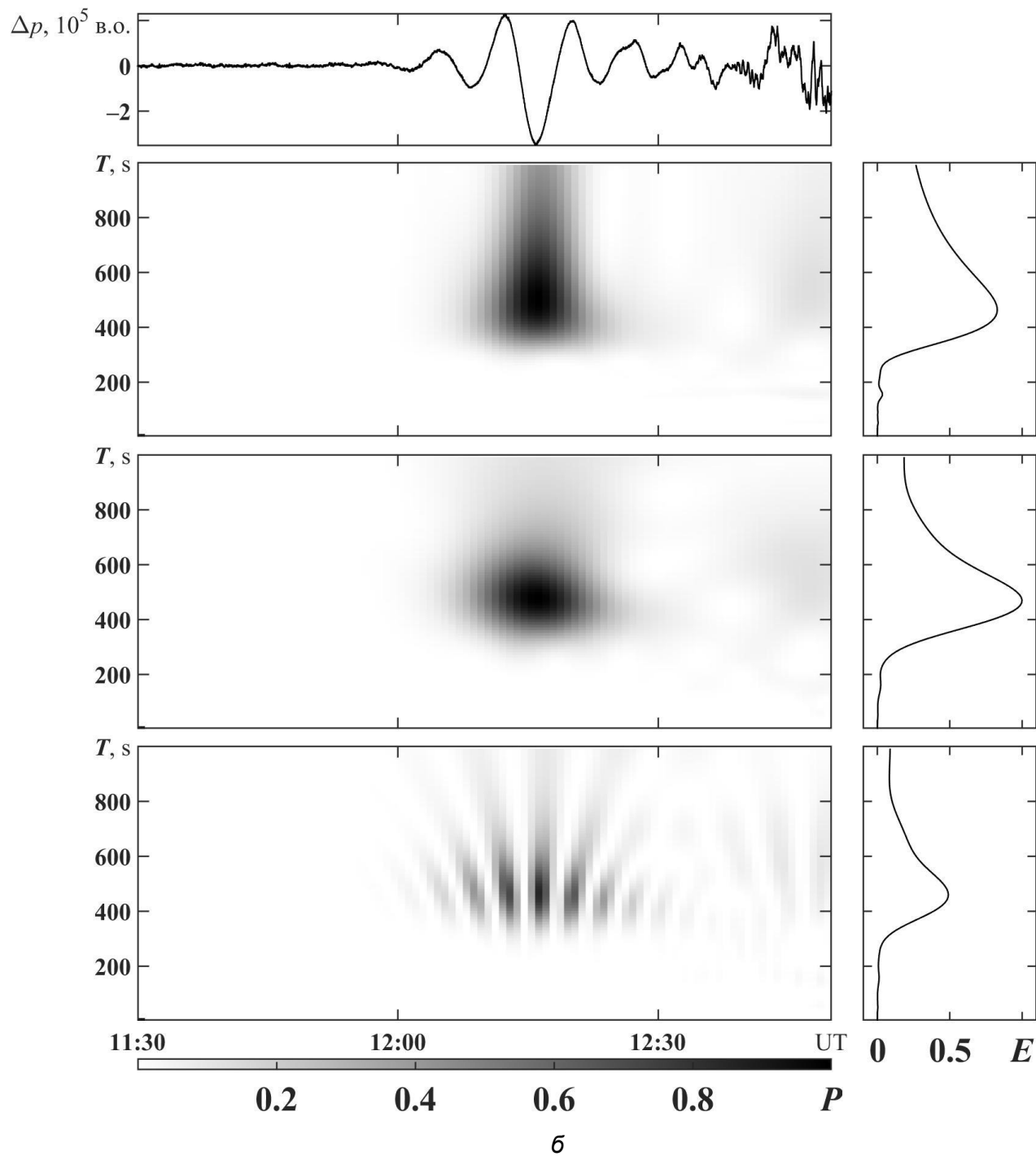
Після реєстрації сигналу від метеороїда за допомогою смугової фільтрації було виконано систематичний спектральний аналіз у діапазоні періодів 1–5 с.

Нижче представлено результати спектрального аналізу сигналу для української мережі інфразвукових станцій.

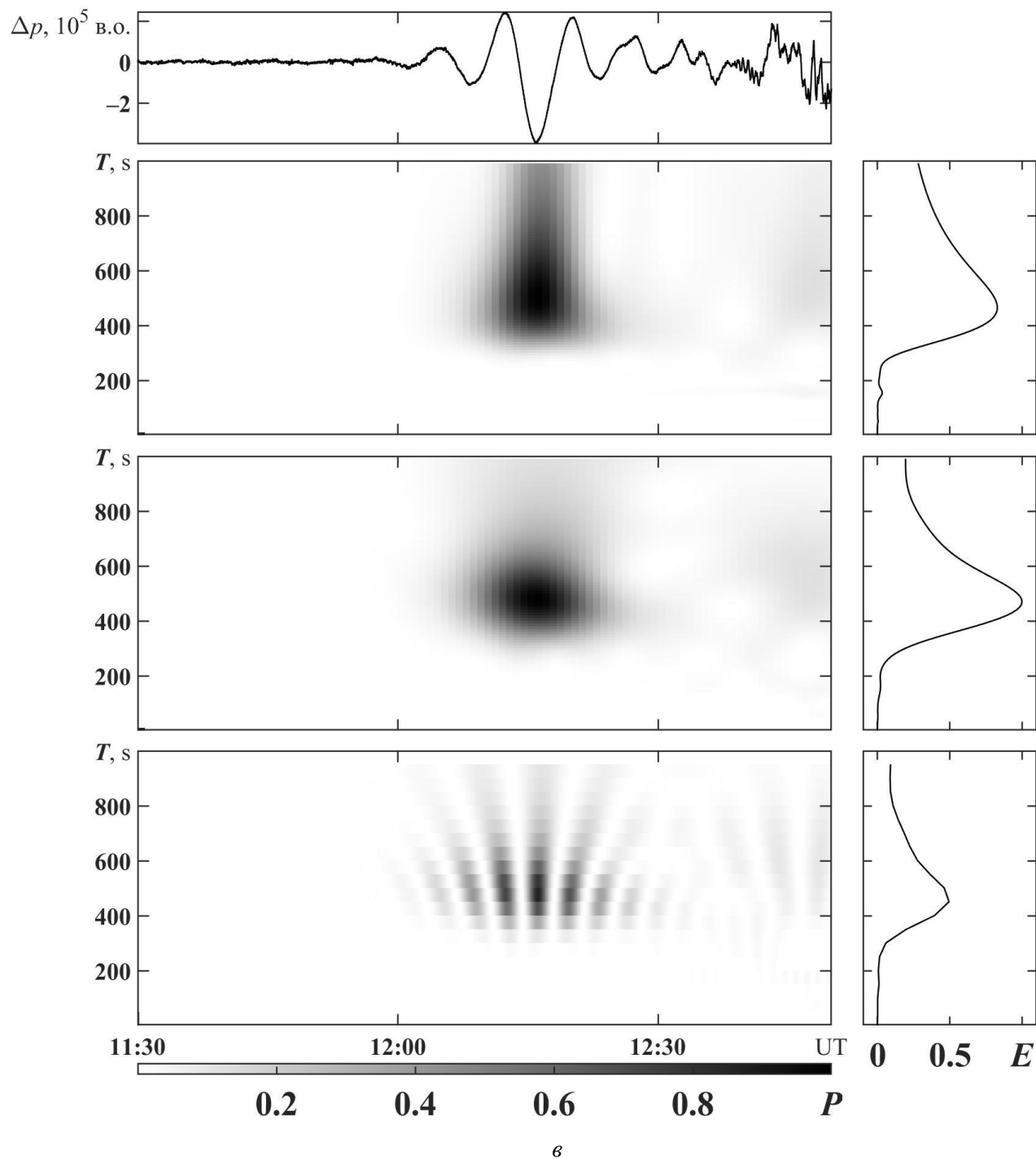
Перший канал



Другий канал



Третій канал



Четвертий канал

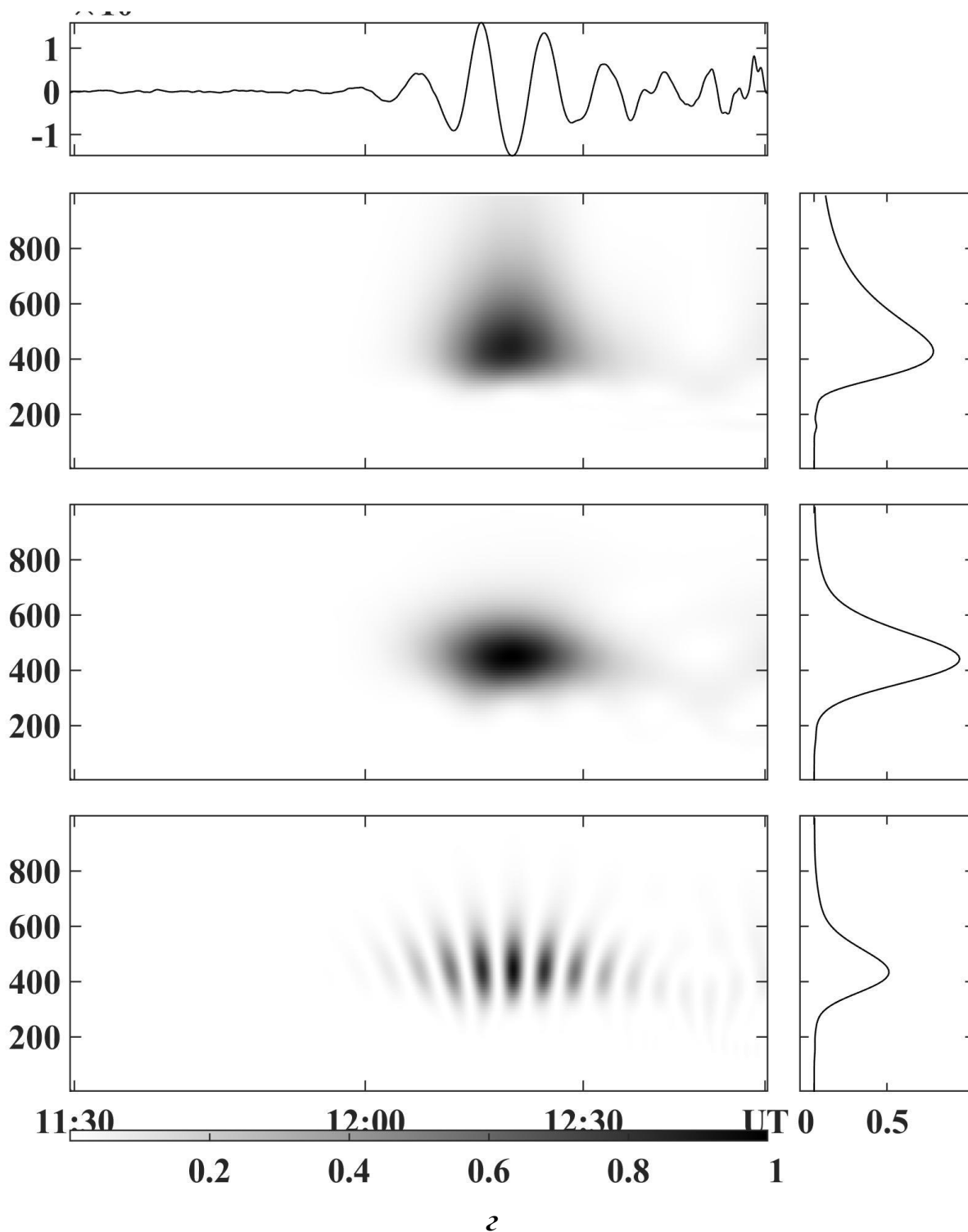
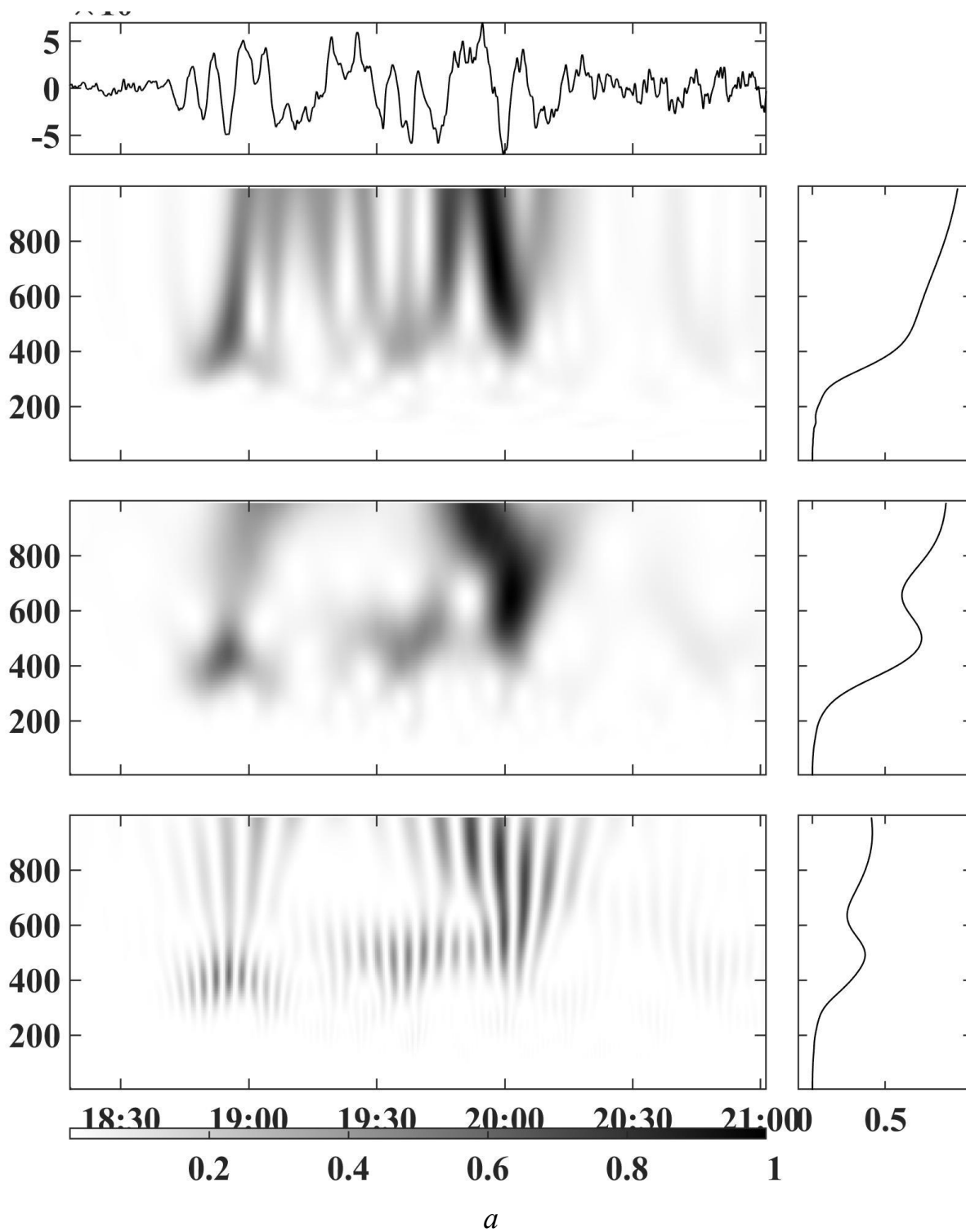


Рис. 3.7. Результати смугової фільтрації та ССА залежності $\Delta p(t)$, зареєстрованої 26 вересня 2017 р. на станції “Академік Вернадський”. Панелі зверху вниз: хвилева форма, результати ВПФ, АПФ та ВП. Праворуч показано енергограми.

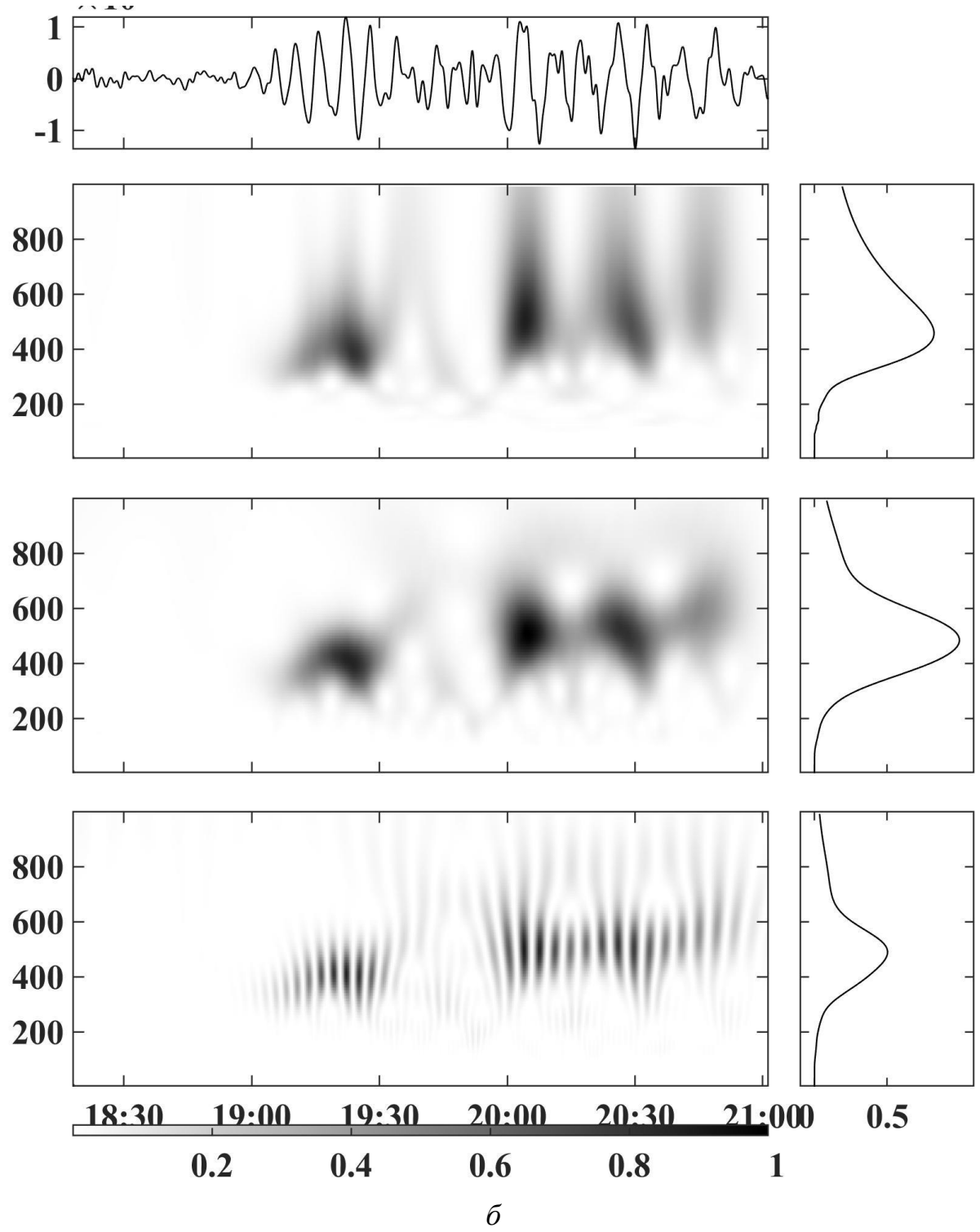
SSA

Станція КРДІ

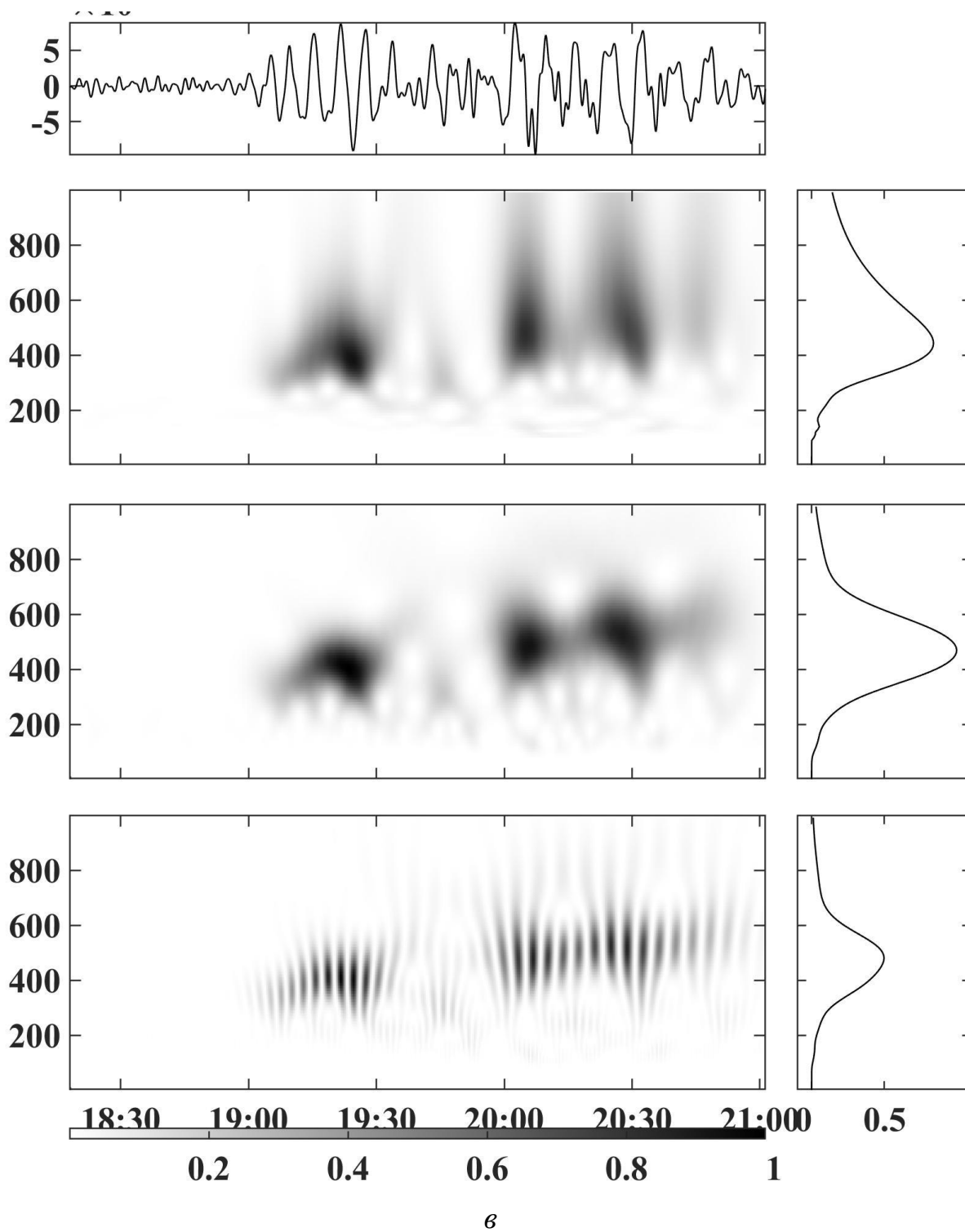
Перший канал



Другой канал



Третій канал



Четвертий канал

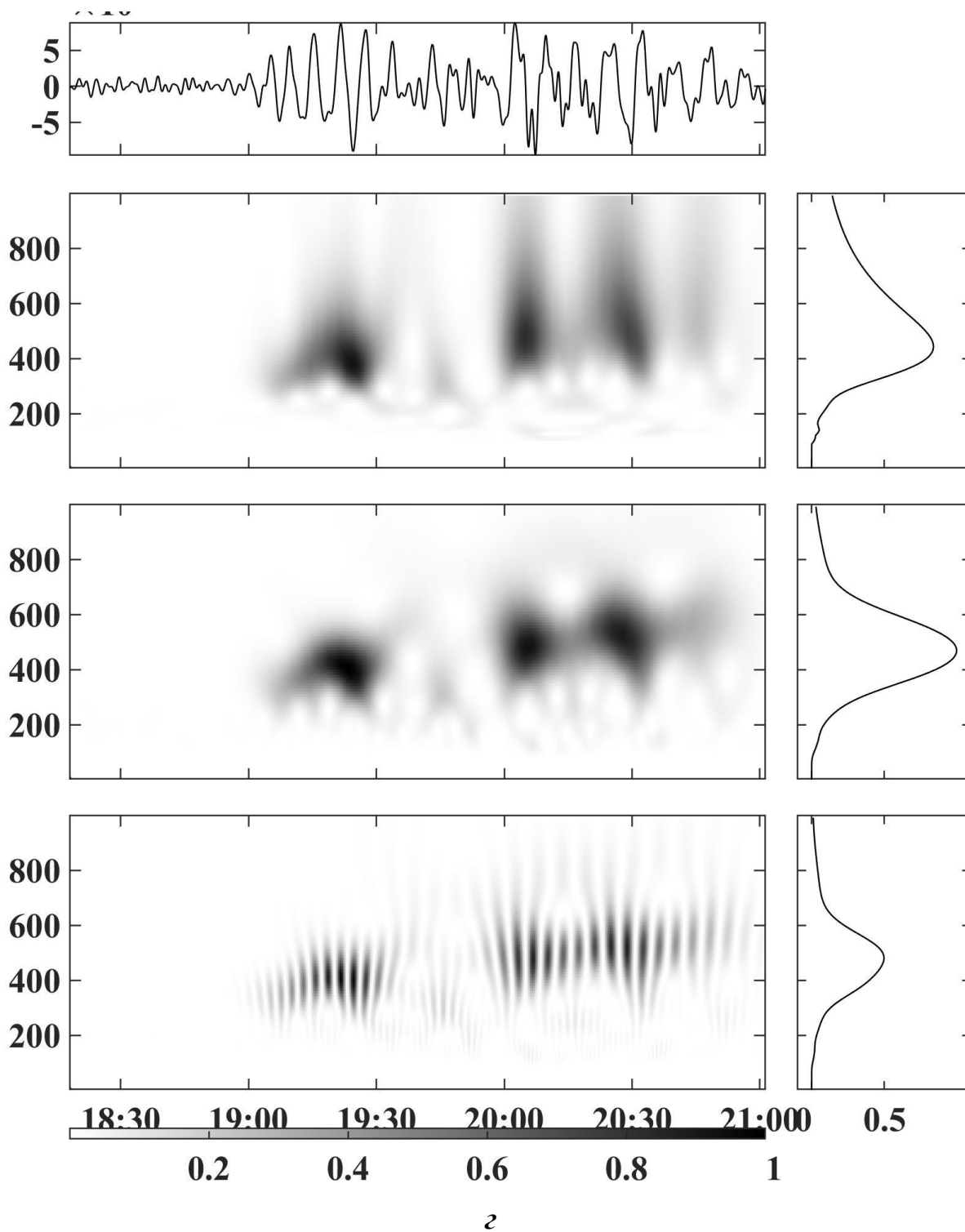


Рис. 3.8. Результати смугової фільтрації та ССА залежності $\Delta p(t)$, зареєстрованої 26 вересня 2017 р. на станції “Балта”. Панелі зверху вниз: хвилева форма, результати ВПФ, АПФ та ВП. Праворуч показано енергограми. Енерговиділення вибуху – 53 т ТНТ

ВИСНОВКИ

1. Виявлено збурення в атмосферному радіоканалі комунікації, викликані вибухом вулкана Тонга.

2. Тривалість збурень атмосферного тиску сягала 2.5 год.

3. Швидкість поширення збурень складала близько 304 і 315 м/с для акустичних хвиль і хвиль Лемба та близько 277 м/с для АГХ.

Результати обробки даних показують, що швидкість поширення акустичної хвилі становила 316 м/с, швидкість поширення інфразвуку становила 328 м/с. Істинний азимут до джерела становить 242,18 градусів, розрахунок за даними інфразвукової групи показав 240,5 градусів."

4. Встановлено, що найбільш енергійними були коливання атмосферного тиску з періодами інфразвуку та хвиль Лемба (400–600 с) та АГХ (700–1000 с).

5. Збурення параметрів носили глобальний характер і могли суттєво впливати на характеристики радіохвиль.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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, Ulivieri 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
100. 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. Черногор. – 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.