

УДК 550.388.2

№ держреєстрації 0118U000492

Інв. №

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ (ФМІ) ім. Г.В. КАРПЕНКА

79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5 тел. (032)2633088, факс (032)2649427

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ФМІ НАН України

академік НАН України

_____ З.Т. Назарчук

2018.11.30

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«УДОСКОНАЛЕННЯ НАЯВНОЇ НАЗЕМНОЇ НИЗЬКОЧАСТОТНОЇ

АКУСТИЧНОЇ І РАДІОАСТРОНОМІЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

ТА ПРОВЕДЕННЯ АКТИВНИХ НАЗЕМНО-КОСМІЧНИХ

ЕКСПЕРИМЕНТІВ» (ОСТАТОЧНИЙ)

Зав. відділу №8, д.т.н. проф.

Б. П. Русин

Керівник НДР

пров. наук. співр., к.т.н., ст.н.с.

В.В. Кошовий

2018

Рукопис закінчено 28 листопада 2018 р.

Результати цієї роботи розглянуто Вченою радою ФМІ НАН України,
протокол від 29.11.2018 № 10

Керівник НДР

провід. наук. співроб.,
канд. техн. наук., ст. наук. співр.

В.В. Кошовий

Науковий консультант

проф. ХНУ ім. В.М. Каразіна
д.ф.-м.н.

Л.Ф. Черногор
(Розділ 1, 2)

Відповідальні виконавці

зав. лаб., канд. техн. наук

О.Л. Івантишин
(Розділ 1, 2)

зав. відділу ЛЦ ІКД НАНУ та
ДКАУ канд. техн. наук

М.О. Мельник
(Розділ 2)

Виконавці від ФМІ НАН України

ст.н.с., к.т.н.

І.М. Романишин
(Розділ 1)

мол. наук. співроб.

А.Б. Лозинський
(Розділ 2)

гол. інж.

Б.С. Харченко
(Розділ 2)

пров. інж.

А.М. Заведія
(Розділ 2)

техн. I кат.

В.І. Верчук
(Розділ 2)

Виконавці від**ЛЦ ІКД НАН та ДКА України**

Заст.зав.відділом

Б.І. Каліта
(Розділ 2)

Зав.лабораторії

Л.В. Альохіна
(Розділ 2)

Заст.зав. лабораторії

З.І. Любінецький
(Розділ 2)

Зав.сектором

В.К. Ліпський
(Розділ 2)

Науковий співробітник

Р.Т. Ногач
(Розділ 1, 2)

Науковий співробітник

В.П. Мезенцев
(Розділ 1)

Молодший науковий співробітник

Л.М. Каратаєва
(Розділ 1)

Молодший науковий співробітник

О.С. Сорока
(Розділ 2)

Інженер-конструктор 2 кат.

Р.М. Мельник
(Розділ 2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 32 с., 7 рис., 27 джерел.

Об'єкт дослідження – фізичні методи, інформаційні технології та технічні засоби дослідження акустичного каналу літосферно – іоносферної взаємодії, процесів акустичної модифікації іоносфери та обумовлених нею акусто-іоносферних збурень природного і антропогенного походження.

Мета роботи – Розвинути сучасні методи, інформаційні технології та засоби для короткострокового прогнозування землетрусів на основі інформації, що передається акустичним каналом літосферно – іоносферної взаємодії, та дослідити на їх базі процес природної та штучної акустичної модифікації іоносфери та обумовлених нею акусто-іоносферних збурень.

Методи дослідження – радіоастрономічні, акустичні та геофізичні спостереження фізичних процесів в навколосемному просторі, математичне, чисельне та фізичне моделювання, фізичний експеримент, дистанційне зондування іоносфери, кореляційний аналіз статистичних зв'язків між збуреннями середовища в приземних та іоносферних шарах атмосфери.

НДР виконується відповідно до ЦКП НАН України з наукових космічних досліджень на 2018-2022 рр.» та розпорядження Президії НАН України від 07.02.2018 № 75. У звіті узагальнені результати попередніх досліджень з проблеми акустичної модифікації іоносфери природного і антропогенного походження, сформульовані технічні вимоги на відновлення і удосконалення створених авторами НДР наземних засобів, що забезпечують штучну керувану акустичну модифікацію іоносфери та реєстрацію акусто – іоносферних збурень, наведені результати цього удосконалення, представлені методологія та результати активних акусто – іоносферних експериментів на даному етапі.

АКУСТИЧНА МОДИФІКАЦІЯ ІОНОСФЕРИ, АКУСТО – ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЗОНДУВАННЯ, АКТИВНІ НАЗЕМНО – КОСМІЧНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ, НИЗЬКОЧАСТОТНА РАДІОАСТРОНОМІЧНА ТА АКУСТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА

ЗМІСТ

Вступ	5
РОЗДІЛ 1. Акустична модифікація навколосемного простору.....	7
1.1. Інфразвукові сигнали, згенеровані випадковими джерелами	7
1.1.1. Загальна інформація про джерела інфразвуку	7
1.1.2. Інфразвук, згенерований метеороїдами	7
1.1.3. Інфразвуку, згенерований вулканами	9
1.2. Інфразвукові сигнали, згенеровані джерелами вибухового типу	10
1.2.1. Інфразвук, згенерований масовими хімічними вибухами.....	10
1.2.2. Інфразвук, згенерований дослідницькими вибухами	11
1.3. Невибухові методи дослідження акустичного каналу	12
1.3.1. Використання для досліджень акустичних випромінювачів	12
1.3.2. Ефекти впливу штучних керованих наземних акустичних збурень на стан іоносфери	14
1.3.3. Методологія досліджень штучної акустичної модифікації іоносфери	15
1.3.4. Висновки за результатами експериментів із штучної акустичної модифікації іоносфери	18
РОЗДІЛ 2. Удосконалення та апробація наземної інфраструктури наземно-космічних експериментів	22
2.1. Удосконалення радіоастрономічної інфраструктури	22
2.2. Удосконалення та обслуговування акустичної інфраструктури	24
2.3. Експериментальна апробація удосконаленого комплексу	25
Основні досягнення за результатами виконання 1-го етапу НДР	29
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	30

ВСТУП

Збурення середовища, які виникають в літосфері та приземних шарах атмосфери і мають природне (землетруси, вулкани, грози тощо) та антропогенне походження (вибухи, старту ракет тощо), можуть генерувати електромагнітні (ЕМ) або акустичні поля, що поширюються в геосфері («*Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера*»). Найбільш чутлива до них – іоносфера, вивчаючи динаміку стану якої можна виявляти збурення, визначати локалізацію і походження їх джерел, прогнозувати виникнення (землетруси, вулкани). Значні відстані іоносфери від поверхні Землі (> 50 км) вимагають спеціальних методів дистанційного зондування іоносфери (ДЗІ) (діючі висоти, плазмові частоти, доплерівський зсув частоти (ДЗЧ) – для рухомих іоносферних збурень (РІЗ)) тощо). з точки зору аналізу процесів, які в ній відбуваються (комплексність, зародження хвиль різної природи (пружної, ЕМ – магніто-звукові, іонно-звукові, альфвеніські та ін.).

Більшість потужних літосферних та приземних збурень супроводжуються генерацією атмосферних акустичних хвиль (ААХ), які поширюються в атмосфері і мають дисперсійні залежності параметрів внаслідок стратифікації середовища з висотою. Потужні ААХ переносять основну частину енергії до іоносфери в інфразвуковому (ІФЗ) і акустичному діапазонах. Це свідчить про актуальність досліджень процесів виникнення та еволюції акусто-іоносферних збурень (АІЗ) (іоносферних збурень (ІЗ), породжених акустичними збуреннями (АЗ), згенерованими в нижніх шарах навколосферного простору (НЗП)).

Задачі дослідження поширення ААХ до іоносферних висот, виникнення, еволюції та фіксування АІЗ, технологій їх виявлення та діагностування, об'єднують в єдину науково-практичну проблему, деякі аспекти якої досліджують у даній НДР – це стосується і короткострокового прогнозування землетрусів на основі ефекту генерації ІФЗ хвиль, які генерує рух літосферних газів вздовж тріщин літосфери в процесі підготовки землетрусів (за $1 \div 2$ доби до активної фази), методу акусто-електромагнітного зондування іоносфери (АЕЗІ) та інформації про трансформацію АІЗ в плазмові хвилі різних типів, поширення їх на значні відстані, і стимуляцію виникнення гами інших ефектів [[1], [2)],

А.В. Таранцев, Я.Г. Бірфельд/Держ. реєстр відкритих СРСР, №128, 02.09.1963р. (Гохберг М.Б., Hayakawa M., Parrot M., Blaunstein N., Черногор Л. Ф. та ін.]

Для коректного виявлення та ідентифікації АІЗ (і локалізації джерел інфразвуку), необхідно знати закономірності впливу різних стимулюючих дій, зокрема АЗ, на неоднорідне шарувате середовище НЗП. Ця частина проблеми поки що слабо досліджена. Остаточних рішень для практичної реалізації прогнозування землетрусів ще немає. Лише за останні два-три десятиріччя більш інтенсивно почали досліджувати ефекти генерації потужних ААХ ІФЗ діапазону та наслідки модифікування різних шарів атмосфери при їх висотному поширенні. В Україні – це, в основному, ХНУ ім. В.М. Каразіна (м. Харків), Інститут іоносфери (ІІ) НАНУ (м. Харків), ІКД НАНУ та ДКАУ (м. Київ), Львівський центр ІКД НАНУ та ДКАУ (м. Львів), ФМІ НАНУ (м. Львів).

Основні труднощі дослідження акустичного каналу «літосферно – іоносферної взаємодії» (ЛІВ) – відсутність ефективних засобів генерації інтенсивних ААХ; неоднорідність властивостей іоносфери; нестационарність іоносферних процесів (вплив багатьох випадкових і нестационарних природно – техногенних чинників); випадковість, некерованість і низька ефективність отримання стійкого та інформаційно цінного відгуку іоносфери на приземні АЗ; інформаційна слабкість реакції іоносфери на АЗ із-за енергетичної слабкості ААХ і великої зашумленості сигналів АІЗ. Все це необхідно враховувати при розробленні методів наземного ДЗІ і космічного моніторингу (з борту КА).

Основні завдання 1-го етапу даної НДР (результати представлені у звіті): аналіз і узагальнення ефективності попередніх досліджень з проблем акусто-електромагнітної взаємодії (АЕВ) в атмосфері та природної і рукотворної акустичної модифікації іоносфери (АМІ), розроблення методології подальших досліджень явища штучної АМІ з врахуванням результатів попередніх досліджень, удосконалення існуючих технічних засобів генерації ААХ та інформаційних технологій (ІТ) ДЗІ, проведення налагоджувальних експериментів з використанням удосконаленого обладнання.

РОЗДІЛ 1. Акустична модифікація середовища навколосемного простору

1.1. Інфразвукові сигнали, згенеровані випадковими джерелами

1.1.1. Загальні інформація про джерела інфразвуку

Джерела ІФЗ коливань в атмосфері (пружних коливань, частота яких < 20 Гц і доходить впритул до власної частоти коливань атмосфери (частота Брента–Вяйсяля ~ 0.003 Гц для нижньої атмосфери)) – природні і рукотворні [3, 4, 6], причому природні, в основному, – випадкові, а рукотворні – створені цілеспрямовано. *Особливості ІФЗ хвиль в атмосфері* [5]: а) великі довжини хвилі λ_s ; б) хвильові системи охоплюють протяжні відстані в атмосфері; в) розглядаються як хвилі обмеженої амплітуди; г) можуть поширюватися до висот іоносфери; д) швидкість звуку $v_s \approx (280 \div 340)$ м/с; е) мале молекулярне поглинання завдяки низькій кінематичній в'язкості; є) тиск та швидкість збільшуються пропорційно $\exp(z / 2H)$ (H – масштаб висоти, z – висота), а число Маха збільшується в сотні разів (порівняно з висотою 0 км); ж) фактори впливу – вітри, атмосферна турбулентність і неоднорідність атмосфери. Для генерації в атмосфері джерела інфразвуку повинні мати значний просторовий розмір. *Природні джерела* – метеорологічні і сейсмологічні явища: потужні урагани (діаметр – сотні км) і атмосферні вихори, землетруси (коливання поверхні Землі – площа тисячі км²); полярні сьйва (протяжність – сотні км); виверження вулканів, грозова активність, рух морської поверхні, сходження снігових лавин, падіння на поверхню Землі великих космічних тіл і космічного сміття; варіації космічної погоди. *Рукотворні (техногенні) джерела*: хімічні та ядерні вибухи; старту і польоти потужних ракет; літаки з надзвуковою швидкістю; кар'єрні вибухи; високоенергетичні технологічні процеси тощо.

1.1.2. Інфразвук, згенерований метеороїдами

Тунгуський метеороїд: проліт і вибух на висоті (6÷10) км, 30.06.1908 р., Центральна Сибір [7], євро-азіатська мережа з 23 мікробарографів на відстані від місця катастрофи – (0.49÷35) Мм. Вивчали: кореляційне поле «відстань – амплітуда тиску», апроксимуючі залежності амплітуди тиску від відстані, моделі загасання амплітуди хвилі, оцінки коефіцієнта загасання. Основні висновки [7]: 1). Залежність амплітуди ІФЗ хвилі від відстані не піддається

апроксимації простими співвідношеннями і поясненню фізично розумними механізмами поширення на глобальні відстані. 2). Кращі апроксимуючі залежності засновані на моделях поширення у хвилеводах «Земля – стратосфера» і «Земля – термосфера» ІФЗ хвиль з циліндричною/сферичною розбіжністю фронту. 3). Коефіцієнт загасання $\sim (0.16 \div 0.17) \text{ Мм}^{-1}$.

Індонезійський метеороїд [8, 9]: проліт і вибух метеороїду над Індонезією, вторгнення до атмосфери Землі над Світовим океаном – 08.10.2009 р.; ІФЗ та супутникові (США) вимірювання; параметри акустичного сигналу (амплітуда, швидкість приходу, спектральний склад, тривалість згенерованих метеороїдом ІФЗ хвиль); 17 із 42 станцій глобальної мережі СТВТО – відстані від місця вибуху $\sim (2 \div 17.5) \text{ Мм}$; середнє значення тропосферно-стратосферного вітру для Південної та Північної півкуль ≈ 16 та 4 м/сек. Основні висновки [8, 9]: 1). Для ІФЗ сигналу – лінійна залежність «час запізнення – відстань»; середні швидкості приходу сигналу ≈ 297 м/с, а переднього та заднього фронтів ~ 299 і 281 м/с залежно від траси; скоригована швидкість приходу $\approx 294 \pm 2$ м/с, середня тривалість – 18.44 ± 9.34 хв для різних трас; несуттєве дисперсійне уширення ІФЗ сигналу на відстанях $(2 \div 12) \text{ Мм}$; середні значення періодів (за різними методиками) $\approx (10.6 \pm 1.1, 13.4 \pm 1.2, 14.1 \pm 1.4) \text{ с}$. 2). Для енергетики – початкова кінетична енергія $\approx 36.6 \pm 6.0$ кт ТНТ (дані НАСА (33 кт ТНТ)). 3). Для амплітуди ІФЗ сигналу – хвилеводне поширення на відстанях $(2 \div 12) \text{ Мм}$ з загасанням – коефіцієнт $\approx (0.3 \pm 0.1) \text{ Мм}^{-1}$. 4). Стійкий статистичний зв'язок: між спостережуваним і дійсним азимутами джерела ІФЗ сигналу; між періодами коливань, обчисленими за двома методиками (технологія *MatSeis*); між амплітудами, оцінюваними за двома різними методиками (*PMCC* та *MatSeis*); між максимальним і мінімальним значеннями швидкості приходу.

Челябінський метеороїд [10, 11]: проліт і вибух 15.02.2015 р.; станції міжнародної системи (мікробарографи, найближча – м. Актюбінськ (≈ 1500 км), найвіддаленіша – (≈ 15000 км, Антарктида); багатократне відбиття, заломлення і розсіяння в атмосфері ІФЗ хвиль та подолання ними відстані (сотні–тисячі км); амплітуда та спектр ІФЗ хвиль несуть інформацію про джерело і параметри атмосфери; Internet-дані. Основні висновки [10, 11]: 1). Для ІФЗ сигналу –

генерація інтенсивних ІФЗ хвиль; лінійна залежність «час запізнення – відстань» (регресійна залежність); середня швидкість поширення $\approx (272.9 \pm 10.0)$ м/с; загальна тривалість $\approx (6 \div 30)$ хв при $R \approx 520 - 5780$ км; період основного колювання визначався осциляцією нагрітої області вибуху і склав $f \approx 33.2 \pm 0.7$ МГц, а за спостереженнями – $(25 \div 34)$ с. 2). Для амплітуди ІФЗ сигналу – зменшення амплітуди від $(5 \div 7)$ Па до $(0.2 \div 0.3)$ Па при збільшенні відстані від 520 до 5780 км; характерна довжина загасання інфразвуку в залежності від траси $\approx (2000 \div 7000)$ км. 3). Для енергетики – початкова кінетична енергія $\approx (434.9 \pm 18.5)$ кт ТНТ (відносна похибка $\approx 4\%$, узгоджується з оцінками за світінням метеороїду, дією ударної хвилі та сейсмічним ефектом).

Румунський метеороїд [12]: Румунія, сейсмоактивний район (Карпатські гори, сейсмічні вимірювання неефективні); вхід в атмосферу Землі 07.01.2015 р.; метеороїд кам'яного класу, початкова маса ≈ 1.9 т, об'єм – до $(0.53 \div 0.58)$ м³, діаметр – до 1 м; за параметрами дещо перевищує параметри багатьох відомих метеороїдів, але супроводжуючі ефекти були мало досліджені (швидкість > 35 км/с (для інших вона ≈ 20 км/с, частота падіння подібних тіл вельми велика – до 9 подій на рік); щільна мережа ІФЗ станцій, сейсмографів і відео реєстраторів, зокрема 5 ІФЗ станцій на відстанях від місця вибуху – $(53 \div 1423)$ км. Основні висновки [12]: 1). Для ІФЗ сигналу – зареєстрований на всіх 5 станціях з різним ступенем достовірності; період $\approx (1 \div 10)$ с (середній ≈ 3.7 с); істинна швидкість приходу сигналу (≈ 280 м/с); середня швидкість тропосферно-стратосферного вітру (≈ 20 м/с). 2). Для амплітуди ІФЗ сигналу – найбільша ($\sim (10 \div 25)$ Па) відзначена на відстані ~ 53 км від місця вибуху, а на відстанях (313, 332, 583, 1034 та 1423) км відповідно (3, 4.3, 4.5, 1.5, 0.5, 0.6) Па. 3). Для енергетики – енергія сигналу $\approx (940 \div 1100)$ ГДж в ближній зоні і $\approx (180 \div 100)$ ГДж на відстанях $(0.3 \div 1.5)$ тис. км відповідно; акустична ефективність при збільшенні відстані зменшувалася до $(5 \div 6)$ %.

1.1.3. Інфразвук, згенерований вулканами

Вибух вулкану St. Helens [13]. Важлива пряма радіофізична задача зведена до побудови регресії, що описує залежність амплітуди ІФЗ хвилі, згенерованої в процесі вибуху вулкану St. Helens, від відстані для різних моделей розбіжності

фронту хвилі, апроксимуючих дані спостережень. Основні висновки: 1). Модель поширення ІФЗ хвилі у хвилеводі «Земля – стратосфера» (і, частково, у хвилеводі «Земля – термосфера») з «висвічуванням» частини її енергії та із загасанням – найбільш правдоподібна. 2). Оцінка коефіцієнту загасання $\approx 0.054 \text{ Мм}^{-1}$. 3). Глибина загасання $\approx 18.4 \text{ Мм}$.

1.2. Інфразвукові сигнали, згенеровані джерелами вибухового типу

1.2.1. Інфразвук, згенерований масовими хімічними вибухами

Вибух на арсеналі боєприпасів [14÷16]: техногенна катастрофа на арсеналі боєприпасів поблизу м. Калинівка (Вінницька обл.); (26÷27).09.2017 р.; вимірювальні станції – мікробарографи, Кам'янець-Подільський (відстань 176 км, 4 канали), Малин (відстань 153 км, 2 канали) і Балта (відстань 181 км, 1 канал); вивчали особливості дальнього поширення надширокосмугових ІФЗ сигналів на трасах різної орієнтації протяжністю (153÷181) км (хвильові форми, амплітуди, спектральний склад); діапазон частот (0.003÷12) Гц; діапазон тисків (0.01÷100) Па; методика обробки – «zareєстровані часові залежності тиску – відносні одиниці – абсолютні одиниці – фільтрація в діапазоні періодів (0.2÷10) сек – віконне перетворення Фур'є відфільтрованих часових залежностей тиску – адаптивне перетворення Фур'є – вейвлет-перетворення (базисна функція – вейвлет Морле)». Основні висновки [14÷16]: 1). Амплітуда цугу коливань і їх період зменшуються при зменшенні енергії вибухів. 2). Тривалість цугу коливань $\approx (1\div 2)$ хв і відсутня чітка її залежність від енергії вибухів. 3). Часова залежність тиску не є монотонною. 4). Поширення на трасах могло бути як однопроменевим, так і багатопроменевим. 5). Коефіцієнт ширококосмуговості $\approx (0.8\div 1.2)$. 6). У спектрі – складові з періодами (0.6÷2.4) сек. 7). Максимум енергії – для періодів (1÷2) сек. 8). Енерговиділення $\approx (2.6\div 54)$ т ТНТ.

Висновки щодо генерації ІФЗ хвиль випадковими природними джерелами:

- 1). Вперше систематизовано і порівняно параметри і особливості генерації інфразвуку, згенерованого низкою випадкових природних явищ і процесів.
- 2). Підтверджено необхідність цього класу досліджень для розвитку і підвищення завадостійкості запропонованого авторами даної НДР методу АЕЗІ;

1.2.2. Інфразвук, згенерований дослідницькими вибухами

Моделювання транспорту енергії в системі «літосфера – іоносфера» доцільно проводити шляхом активних експериментів. Для цього з початку 1960 рр. використовували потужні наукові вибухи (приклад – експеримент МАСА (360 т ТНТ) [5, 17.]. Умови експерименту: а) наземні та супутникові (ОРЕОЛ-3) спостереження реакції іоносфери; б) 8 пунктів спостережень (давачі тиску) – на відстанях від епіцентру (1,4÷2000) км); в) РАЗ до F -шару (висоти (245÷350) км); г) оцінювані параметри – амплітуда, форма, тривалість проявів іоносферних ефектів, зокрема і спричинених дією ААХ на різних висотах та відстанях, функції їх передачі реальною атмосферою, ДЗЧ. Основні висновки:

- 1). Вперше прослідковано ААХ, спричинену вибухом, від місця її зародження, та зареєстровані АЗ у всіх пунктах і на всіх радіотрасах.
- 2). Відслідковано поширення ААХ від вибуху в приземному хвилеводі висотою ~ 2 км на відстані до 200 км.
- 3). Зареєстровано (іноді) наддалеке багатоскачкове поширення на відстані 2100 км (в шарі від (0÷50) км і на відстані 200 км від джерела.
- 4). Додатково зареєстровано 2 приходи ІФЗ хвиль, які відповідають відбиванню від шарів на висотах 50 і 100 км.
- 5). Збільшення ефективної тривалості початкового 2-імпульсного сигналу при його поширенні у верхні шари атмосфери (до $H \approx 100$ км).
- 6). Форми записів ДЗЧ радіосигналів на висотах F -шару змінювалися внаслідок нелінійного поширення ААХ у верхніх шарах атмосфери.
- 7). На іонограмах зареєстровано генерування при вибуху (явище “spread F”) внутрішніх гравітаційних хвиль (ВГХ).
- 8). Зареєстровані збурення електронної густини іоносферної плазми двох типів на відстані 10^3 км від вибуху, зокрема: а) збільшення (в 7 раз) перерізу розсіювання іоносферної плазми (на $H \approx (100 \div 400)$ км) на 1-й хвилині після вибуху і з максимумом на 6 хв (відповідає швидкості поширення збурення ≈ 100 км/с) – асоціюються з магнітогідродинамічними (МГД) хвилями; б) квазіперіодичні варіації електронної густини і температури через 1 год після вибуху на висоті ≥ 300 км (відповідає швидкості поширення збурень $\approx 0,8$ км/с) – асоціюються з ВГХ).
- 9). Вперше зареєстровані солітони в іоносферній плазмі, про що свідчать – *магнітний імпульс* в F -шарі іоносфери (280 с після вибуху, тривалість 0,08 с, амплітуда ~ 120 нТ з вектором Пойтінга вздовж ГМП) і *Альвенівський імпульс*

на висоті 800 км. 10). Виявлено турбулізацію плазми при поширенні ЕМ імпульсу великої амплітуди в іоносферній плазмі, збудженої сильним електричним струмом на фронті імпульсу, утворюючи таким чином “турбулентний слід”. 11). Виявлено шумову пляму НЧ ((50÷5000) Гц) електростатичної турбулентності при перетині силової трубки вибуху супутником, одночасно з альвенівським імпульсом (збудження іонно-звукової або іонно-циклотронної електростатичних нестійкостей). 12). Встановлено зміни фазово-амплітудних характеристик радіотрас над епіцентром вибуху. 13). Сумарно виявлені ефекти трансформації атмосферних АЗ від вибуху на поверхні Землі в ЕМ збурення в іоносфері. 14). Але, внаслідок високої ціни та екологічної небезпеки вибухові методи дослідження проблеми недоцільні.

1.3. Невибухові методи дослідження акустичного каналу

1.3.1. Використання для досліджень акустичних випромінювачів

Результати досліджень акустичного каналу «літосфера – іоносфера» підтвердили необхідність багатократного повторення експериментів, що вимагає наземних керованих акустичних випромінювачів (НКАВ). Їх вперше застосували для радіоакустичного зондування (РАЗ) атмосфери [17, 18] ($H \approx (1 \div 3)$ км) – геофізичний комплекс “*Сура-sound*” (Росія, 2003÷2004 рр., схема «сирена – рупор», частоти (17÷24) Гц, тропосфера ($<(1 \div 10)$ км), мезосфера ((60÷90) км, приземний шар); потужний сейсмодібратор (Росія) (віброрейсмічне зондування атмосфери до малих висот).

З 1991р. в Україні створюють і використовують для акустичних досліджень НЗП до висот іоносфери нові засоби – різні варіанти потужних НКАВ (ЛЦ ІКД, ФМІ), модернізовані засоби ДЗІ (РТ УРАН-3, іоносферні станції ІІ НАНУ, ХНУ), супутникові засоби. Для дослідження ефектів взаємодії ААХ та ЕМ хвиль в реальній атмосфері до висот іоносфери створені: стаціонарний НЧ НКАВ параметричного типу ((1÷10) Гц) і стаціонарний ВЧ НКАВ ротаційного типу ((10÷30) Гц) – розташовані на території ЛЦ ІКД (Львів)); мобільний ВЧ НКАВ на автошасі (>10 Гц) – розташовувався в різних місцях, зокрема і на території радіофізичного полігону (Харків) Інституту іоносфери (ІІ) НАНУ. Для ДЗІ та атмосфери використовували: а) РФК на базі ДКМ РТ УРАН-3 –

іоносферно-діагностичний комплекс (ІДК) УРАН-3, мініінтерферометр (МІ) УРАН-3 (полігон ФМІ, Шацьк, Волинська обл.); б) РФК ІІ та ХНУ – радар некогерентного розсіювання, доплерівський радар, радар часткових відбить, іоносферна станція “Базис” тощо; в) вимірювачі параметрів інфразвуку, геоелектричного поля (ГЕП), ГМП, атмосферного струму, ДНЧ радіосигналів, кліматичних параметрів, які розташовувалися на обох полігонах і на території ЛЦ ІКД у м. Львові; г) спеціальні радіостанції короткохвильового (КХ) діапазону, станції радіомовлення; д) бортові РФК, змонтовані на супутниках DEMETER (Франція) і CHIBIS (Росія).

Із загального комплексу експериментів (1991÷2018 рр.), проведених для дослідження на основі цього обладнання проблем АЕВ в атмосфері та АМІ, для узагальнення результатів виділено **4 серії: 1-а)** (1996÷1998) рр. (стаціонарний НЧ НК АВ (Львів) – ІДК УРАН-3 (Шацьк)) і (2001÷2005) рр. (стаціонарний ВЧ НК АВ (Львів) – ІДК УРАН-3 (Шацьк)); **2-а)** (2005÷2006) рр. (ВЧ МНКАВ (Харків) – РФК ІІ (Харків) – DEMETER (Франція)); **3-а)** (2013÷2014 рр.) (стаціонарний ВЧ НК АВ (Львів) – ІДК УРАН-3 (Шацьк) – CHIBIS (Росія, Угорщина)).

1.3.2. Ефекти впливу штучних керованих наземних акустичних збурень на стан іоносфери

На кожній висоті характер взаємодії ААХ з атмосферою різний і, можливі різні ефекти АЕВ: а) збудження геоелектричного контуру («поверхня Землі – іоносфера», малі висоти ((0÷10) км, частоти (сотні Гц÷десятки МГц)); б) свічення в інфрачервоному (ІФЧ) діапазоні – хімічні реакції руйнування озону, висоти (20÷30) км; в) електропробою в проміжку «іоносфера – фронт ААХ» (висоти (60÷70) км, широкий діапазон частот ЕМ сигналів).

За результатами спостережень, зокрема і супутникових, ЕМ відгуків різних шарів НЗП на АЗ невибухового характеру (ФМІ, ЛЦ ІКД, ХНУ та ІІ, 1996÷2018 рр.) встановлено, спостережено і частково досліджено: **1).** Присутні практично всі ефекти, реєстровані в процесі вибухових досліджень [19÷23]: акусто-магнітні; акусто – електричні; вплив на радіохвилі (метровий, ДКМ, ДНЧ діапазони); вплив на прозорість іоносфери (метровий, ДКМ діапазони); акусто-

оптичні; збурення іоносферної плазми (АІЗ), стимульовані впливом ААХ. 2). Найбільш чутливі до впливу АЗ *просторово-резонансні структури*, які локалізують вплив наземного АЗ на іоносферу (рис. 1.1): поперечний Шуманівський резонатор (ПШР) («поверхня Землі – іоносфера»); іоносферний альфвенівський резонатор (ІАР) («іоносфера – область різкої зміни швидкості альфвенівських хвиль»); магнітосферний альфвенівський резонатор (МАР) (утворений нижньою межею іоносфери в спряжених областях магнітної силової трубки).

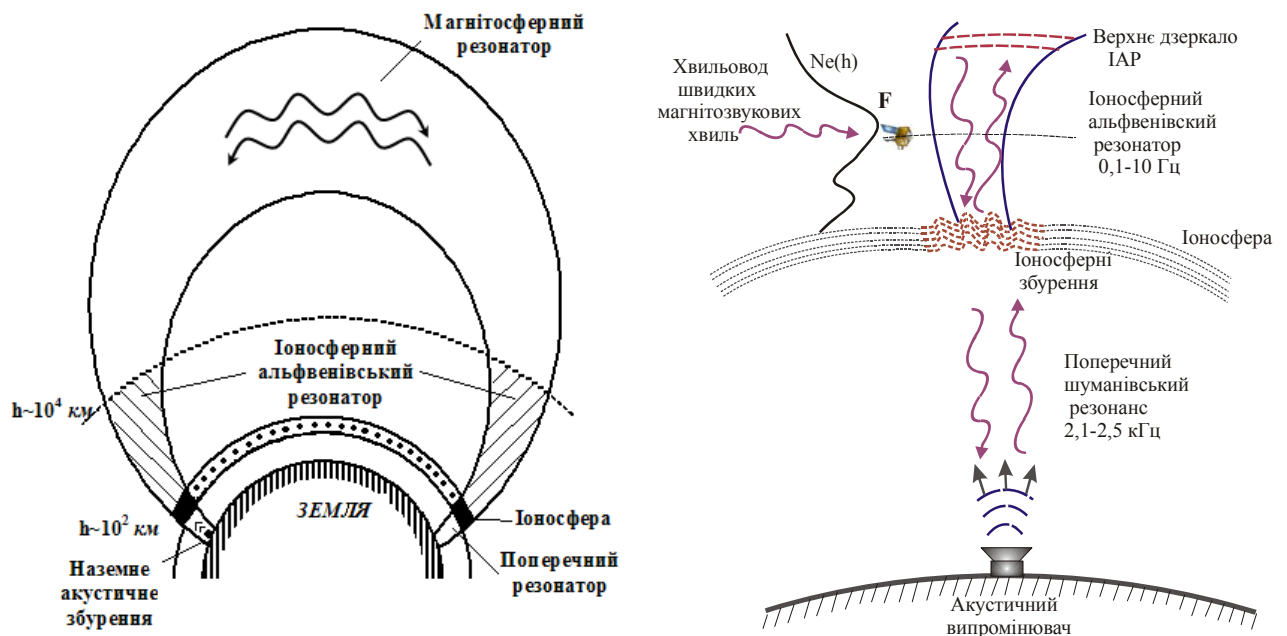


Рис. 1.1 – Система «атмосфера – магнітосфера» – резонансні структури

3). Виявлено також ефекти, що не спостерігали (або рідко спостерігали) підчас вибухів (деякі приклади експериментальних записів наведені на рис. 1.2): *збільшення свистових атмосфериків* (періодичні і випадкові послідовності імпульсів свистових випромінювань, виявити які вибуховими методами практично неможливо); *вплив акустичних збурень на іоносферні шари E, F₁, F₂*; *формування періодичних резонансних структур* (спостерігали в діапазоні (1÷40) Гц супутником DEMETER, при землетрусах); *зміна рівня космічного шуму до і після дії АЗ*; *локальні зміни природного інфразвуку* (зокрема, сонячного походження); *локальні зміни опадів і вітру*; *варіації геомагнітного поля* (ГМП) внаслідок появи струмів, що створюють магнітні пульсації.

Зміни прозорості іоносфери можуть бути пов'язані і зі змінами шаруватої структури нижньої іоносфери. В ряді експериментів проводилось вертикальне зондування іоносфери автоматичною іоносферною станцією "Базис". Основними параметрами вимірювань в цих експериментах була критична частота і динаміка її зміни. Вимірювання починались за декілька десятків хвилин до акустичного збурення і продовжувались певний час після. Останній час вибирався індивідуально в кожному експерименті окремо.

Енергія акустичного випромінювача є малою для суттєвих змін в таких глобальних структурах як шари E , F_1 , F_2 . Однак, незважаючи на це, в ряді експериментів спостерігались зміни в структурі шарів нижньої іоносфери.

Після включення акустичного збурення 06.05.2006р в 11:12 різко збільшився ступінь розвитку шару F_1 , який через 8 хв в 11:20 досяг максимуму (рис. 1.2д,е – по горизонтальній осі відкладено час, по вертикалі відносні значення критичної частоти для шарів E , E_s , F_2 і ступінь іонізації для F_1). Як видно з рис. 1.2. після АЗ розрив між висотно-частотними характеристиками (ВЧХ) шарів F_1 і F_2 зріс і досяг максимуму в 11:20, що свідчить про утворення міжшарової впадини F_1 - F_2 . З 11:25 розрив ВЧХ і, відповідно, міжшарової впадини F_1 - F_2 поступово зникає. В той же день (06.05.2006р) при повторному включенні НК АВ в 14:30 спостерігався протилежний ефект. Розрив між ВЧХ шарів F_1 - F_2 змінився і почав зменшуватись (рис. 1.2е). В 14:44 досяг мінімуму і після 14:45 почав повертатись до попереднього значення. Цікаво відзначити, що в цих експериментах протилежно змінювались і варіації ГМП в діапазоні 1-40 Гц. В 11:12 включення АЗ приводило до різкого зростання варіацій ГМП, а в 14:30 – різке падіння. Пояснення цього ефекту потребує подальших досліджень.

1.3.3. Методологія досліджень штучної акустичної модифікації іоносфери

. Експерименти спрямовані на апробацію потужних НК АВ та методів дослідження АІЗ на основі РТ УРАН-3. Методологія експериментів вибухового типу для цих експериментів не підходила. Запропонована методологія ґрунтувалася на можливостях існуючих засобів (стаціонарний НЧ НК АВ, РФК РТ УРАН-3, що наклало певні обмеження і вимагало розроблення спеціальних методик. Застосовано комплексний підхід, який передбачав використання

декількох методик ДЗІ, ІТ пошуку інформаційних ознак радіосигналів для ідентифікації АІЗ та інтерпретацію можливих фізичних механізмів.

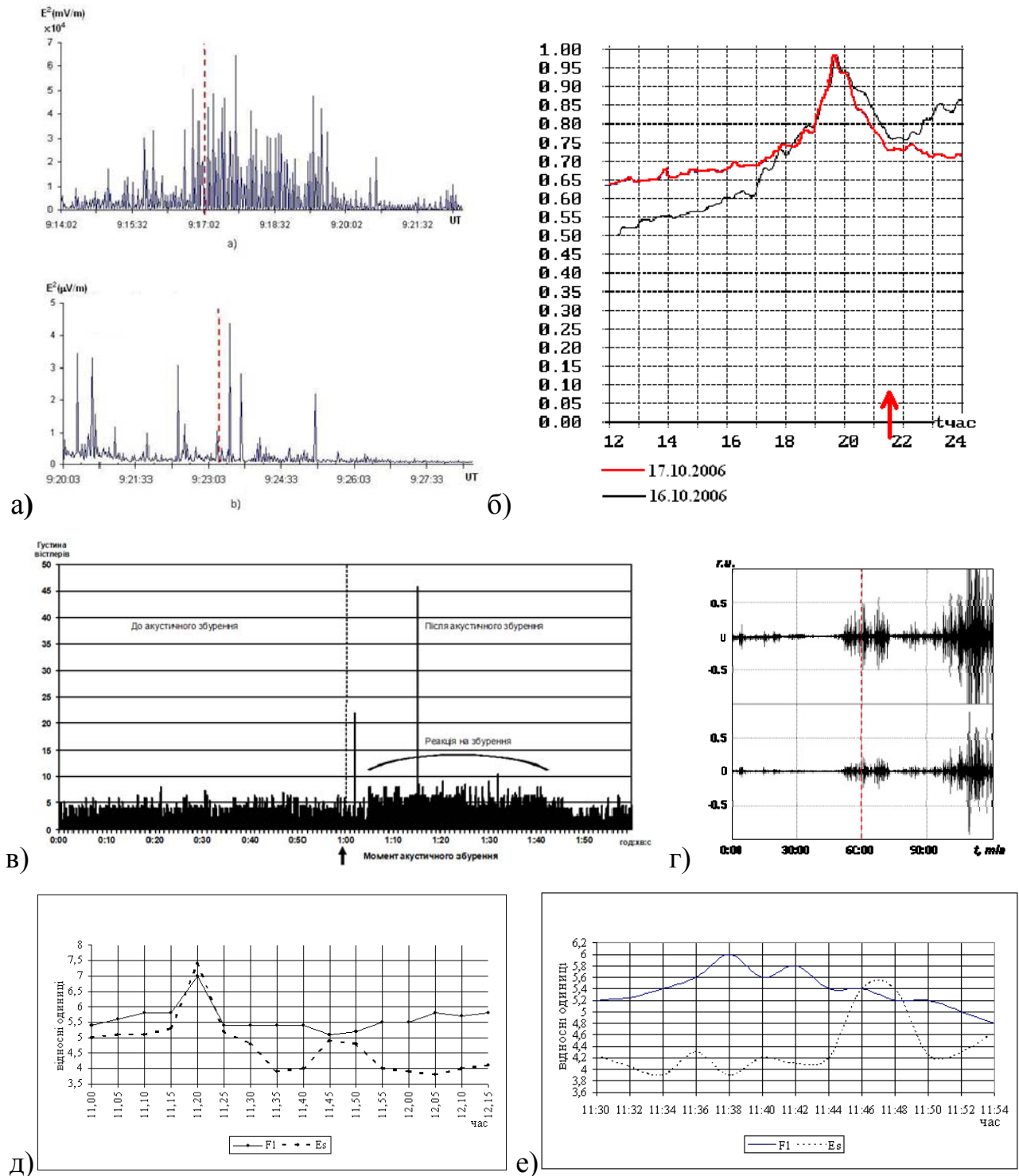


Рис. 1.2 – Приклади зареєстрованих змін параметрів сигналів (DEMETER):

- а) – сигнали навігаційної радіостанції на борту супутника DEMETER (АЗ (вгорі) і без АЗ (внизу)); б) – рівень космічного шуму до і після дії АЗ;
- в) – густина вістлерів до (зліва) і після АЗ (справа); г) – варіації ГМП (штрих – час АЗ); д) – динаміка зміни шарів F_1 та E_s 06.05.2006 після АЗ (11:12);
- е) – динаміка зміни стану шарів F_1 та E_s 10.05.2006 після АЗ (11:35)

Інфраструктура досліджень.

Стационарний НК АВ (ефекти модуляції надзвукового потоку повітря, параметричний, одержання періодичної послідовності ударних хвиль): $P_e \approx 150$ кВт; випромінена $P_{ак} \approx 1,8 \cdot 10^6$ Дж (~ 60 с); частоти ААХ (100 Гц і 110 Гц); $f_p \approx 10$ Гц; тиск (відстань 1 м) ≈ 165 дБ; лінійчатий дискретний спектр поля на зрізі рупорів; 1-а гармоніка ≈ 300 Гц; маса ≈ 2 т; габарити $\approx (2,5 \times 1,5 \times 1,5)$ м³.

РФК РТ УРАН-3: **а)** склад – МІ (база $D=100$ м), ІДК, короткобазовий радіоінтерферометр із змінною базою (КБР) (розбірна антена, 16-елементів, ретранслятор сигналів, шасі автомобіля ЗІЛ-151); **б)** ДКМ діапазон – (4÷30) МГц; 2 поляризації; антена – 256 вібраторів, площа ≈ 14400 м², ефективна ≈ 4320 м² ($f=25$ МГц), ≈ 5760 м² ($f=16,7$ МГц); ККД $\approx 0,3$ ($f=25$ МГц), $0,4$ ($f=16,7$ МГц); ДС – промінь ДС $\approx (3,5^\circ \times 15^\circ)$ ((Сх-Зх)х(Пн-Пд)), електричне керування відхиленням від зеніту $\approx \pm 70^\circ$ (часовий кут х схилення); чутливість ≈ 50 ЯнВт/м²Гц ($f=25$ МГц, с/ш 1:10, смуга $\Delta f=14$ кГц, похибка вимірювання потоку $\approx 15\%$); **в)** канали прийому/реєстрації – по 2 радіометричних і радіоінтерферометричних, калібрування, комп'ютерної обробки, реєстрації; **д)** реєстровані параметри – потужності сигналів P_A і P_B кожної поляризації, модуль ВКФ $|\Gamma_{12B}(t)_{s,c}|$ сигналів кожної половини антени, сканування ДС по схиленню θ і азимуту Ψ , амплітуда завмирань A і ДЗЧ F_δ іоносферних сигналів.

Методи ДЗІ (рис. 1.3): **а)** радіоастрономічний (РА) (радіовипромінювання (РВ) космічних дискретних радіоджерел (КРД); **б)** слабонахилене радіозондування іоносфери (СНЗ); **в)** об'ємне розсіювання (ОР) радіохвиль на ДН. Методологія ДЗІ враховувала: **а)** слабкість реакції іоносфери; **б)** комплексне використання іоносферних РС (трансмісійний (РА-метод), відбитий (метод СНЗ), розсіяний (метод ОР)), різні методики використання НК АВ, інформаційні особливості іоносферних РС, сформованих в результаті АЕВ; **в)** різні ефекти АЕВ вимагають різних радіофізичних методів діагностики АІЗ; **г)** енергетику і режими роботи НК АВ – *неперервний, рівномірний періодичний, нерівномірний періодичний, одночастотний, регульована різницева частота.*

Методики ДЗІ: **а)** №1 (рис. 1.3а) і №2 (рис. 1.3б) – РА-метод та РВ точкових КРД (ЗС10, ЗС84, ЗС123, ЗС134, ЗС144, ЗС218), ефект РМ, оцінка

статистичних характеристик інтенсивності РВ КРД, поляризаційна вибірковість; №3 (рис. 1.3б) – *РА-метод та РВ точкових КРД і ділянок небесної сфери*, радіоінтерферометричні (РІ) вимірювання МІ; №4 (рис. 1.3в) – *СНЗ-метод*, ІДК УРАН-3, КХ РС, односкачкова траса КХ РС – РТ УРАН-3, утворення РІЗ та визначення їх параметрів на основі даних про флуктуації траєкторних параметрів (кут приходу і ДЗЧ) дзеркально відбитих сигналів; №5 (рис. 1.3г) – *ОР-метод*, КХ РС, дві половини антени РТ УРАН-3 по двох поляризаціях, $f_p > f_{МПЧF2}$, амплітудно – поляризаційно – часові залежності розсіяних радіосигналів.

1.3.4. Висновки за результатами експериментів із штучної акустичної модифікації іоносфери

Висновки сформульовані за результатами досліджень ефектів штучної акустичної модифікації іоносфери і виявлення АІЗ та інших ефектів, що виникають внаслідок впливу потужних ААХ на середовище різних шарів атмосфери до іоносферних висот. На основі деяких результатів запропоновані (або перевірені існуючі) моделі АЕВ в різних шарах атмосфери. Враховані результати експериментів, проведені з використанням трансмісійних (ТІС), відбитих (ВІС) і розсіяних (РІС) неоднорідностями іоносфери сигналів КХ РС та РВ КРД, різних методик ДЗІ (методи РА, СНЗ, ОР) та наземного і космічного обладнання: стаціонарні і мобільний НЧ і ВЧ НК АВ (Львів, Харків), РТ УРАН-3 (Шацьк), РФК полігону П та ХНУ, супутники DEMETER та CHIBIS.

1. Вперше експериментально підтверджена можливість штучної, керованої з поверхні Землі, акустичної модифікації різних шарів середовища НЗП (до іоносферних висот) на основі створених авторами акустичних випромінювачів.

2. Одержані якісні і кількісні оцінки деяких інформаційних характеристик іоносферних радіосигналів, які стабільно придатні для виявлення та ідентифікації АІЗ наземного акустичного походження.

3. Встановлено, що переважній більшості наземних експериментів наявні реакції іоносфери (відгуки) з характерними періодами затримки $\tau \approx (5; 40)$ хв.

4. Супутникові спостереження свідчать про ефективність модуляції прозорості іоносфери для радіовипромінювання ДНЧ діапазону і про подібність реакції іоносфери на АЗ природного (сейсмічні) та штучного походження.

5. Встановлено, за результатами аналізу поширення ААХ від поверхні Землі до висот іоносфери і частотних характеристик хвильових процесів в іоносфері, що генеровані на частотах ($f \sim 30$ Гц) ААХ ефективні при збуренні альфвенівського резонатора і при модуля прозорості іоносфери (для РВ ДНЧ діапазону), а на частотах $f < 10$ Гц – для збурень Е та F шарів іоносфери.

6. **В експериментах за РМ-методом** при дії штучного АЗ встановлено:

- першу реакцію іоносфери (час затримки $\tau \approx (5 \div 6)$ хв після АЗ) супроводжує розширення спектру сигналу (запропонована модель – тимчасове збільшення прозорості іоносфери для радіохвиль при вертикальному поширенні ААХ через іоносферу просторової періодичної структури електронної густини, сформованої дією НЧ ААХ із швидкістю звуку);
- повторні реакції іоносфери ($\tau \approx (10, 20, 30, 40, 60)$ хв після АЗ мають більші амплітуди і розширений частотний спектр, найбільш стабільна та інтенсивна реакція із затримкою $\tau \approx 40$ хв (запропоновані моделі – поширення з різними швидкостями через спостережувану область різних акусто-плазмових хвиль);
- інформаційні параметри сигналів КРД, рекомендовані для виявлення АІЗ: а) часові співвідношення між зареєстрованими ІЗ; б) залежності відносного зсуву фаз на фіксованому відрізку часу при скануванні КРД; в) гранична частота F_{cp} розширення частотного спектру сигналу спостережуваного КРД.

7. **В експериментах за СНЗ-методом** при дії штучного АЗ встановлено:

- інтенсивна реакція іоносфери (збільшення амплітуди відбитого іоносферного сигналу ВІС) із затримкою $\tau \approx (11 \div 13)$ хв після АЗ;
- зміни форми і параметрів АКФ (1-хв реалізації ВІС при незбуреній акустиккою іоносфері АКФ – плавнозагасаючі, а при збуреній – швидкозгасаючі коливні);
- зміни в доплерограмі ВІС ($\tau \approx 32$ хв після АЗ) – коливання ДЗЧ з наростаючою амплітудою $f_{\delta} \approx (0,5 \div 1,0)$ Гц і $T_{\delta} \approx (15 \div 16)$ хв; поява двомодовості у ВІС (рознесення мод $\approx (0,2 \div 0,4)$ Гц; запропонована модель – коливання Е- і F-

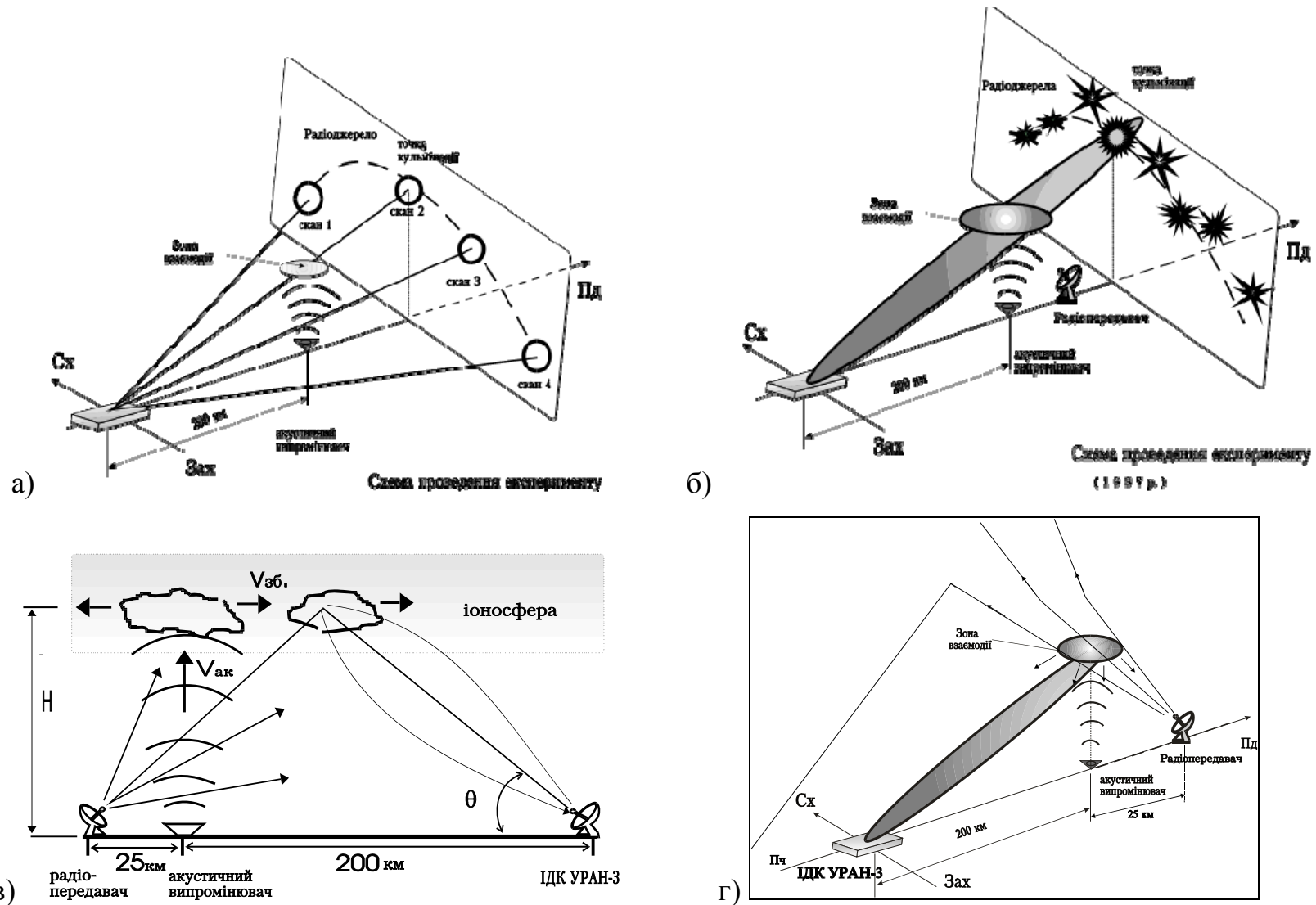


Рис. 1.3 – Схеми експериментів із дослідження ефектів акустичної модифікації середовища НЗП до іоносферних висот з використанням ІДК УРАН-3 (Шацьк) і стаціонарного НК АВ (Львів) методами: радіоастрономічним (а, б), слабонахиленого зондування іоносфери (в), розсіювання радіохвиль на дрібномасштабних неоднорідностях іоносфери (г)

шарів іоносфери, обумовлені дією НЧ ААХ;

– кореляцію дисперсії флуктуацій кута нахилу еліпса поляризації ВІС із початком АЗ (акустично модифікованій іоносфері відповідає зменшення флуктуацій кута нахилу еліпса).

– інформаційні параметри ВІС КХ РС, рекомендовані для виявлення АІЗ: а) крутизна спадання і періоди коливань нормованих АКФ короткотривалих (~1 хв) реалізацій ВІС; б) час появи, період, кількість та інтенсивність мод коливань на доплерограмах ВІС; в) дисперсія флуктуацій еліпса поляризації ВІС та параметри її часових змін.

8. **В експериментах за СНЗ-методом** при дії штучного АЗ встановлено:

– кореляцію змін в часових залежностях амплітуди РС з початком АЗ, зокрема: а) 1-а реакція ($\tau \approx 7$ хв) – незначне (~2 рази) короткотривале ($t \approx 10 \div 15$ хв) підвищення амплітуди; б) значно сильніше (в 5÷6 разів) довготривала (~1 год) підвищення амплітуди РС ($\tau \approx 25$ хв) і її коливання з періодом (10÷12) хв; в) структура флюктуацій РС (амплітуда, період) в збуреному (їх амплітуда зростає) і незбуреному станах іоносфери; запропонована модель – зміни в просторовій структурі розсіюючих ДІН, масштаби яких в збуреному акустикою стані збільшуються, що призводить до збільшення реверберації в іоносфері і зростання амплітуди флюктуацій РС; г) зміни в доплерівських спектрах РС – поява ДЗЧ до 7 Гц ($\tau \approx 7$ хв) тривалістю <1 хв, що свідчить про вертикальну динаміку створених АІЗ із швидкостями переміщення \approx до швидкості звуку; розширення доплерівського спектру ~ на 1 Гц; поява двомодовості РС; поява коливань ДЗЧ амплітудою <1 Гц і періодами ~ (10÷11) і (22÷24) хвилин на доплерограмах на ділянках , які співпадають з підвищенням амплітуди РС; періодичне (період ~35 хв) розширення областей ДЗЧ ~ на 7 Гц в координатах «час – амплітуда»; пропонована модель – НЧ ААХ поширюється в атмосфері і на 7-й хвилині проходить через досліджувану розсіюючу область іоносфери, короткочасно стимулюючи організоване вертикальне переміщення ДІН, які, отримавши певний силовий імпульс коливного типу, в подальші відрізки часу

структурно перебудовуються, утворюючи більш крупні ІН і генеруючи в процесі цієї взаємодії різні типи плазмових хвиль, які, рухаючись у іоносферному каналі із врахуванням впливу ГМП, спричинюють ефект розсіювання, більш спрямований до приймальної антени і коливний в часі.

– інформаційні параметри РІС КХ РС, рекомендовані для виявлення АІЗ: а) параметри часових залежностей потужності РІС (середній рівень на проміжку ~ 1 хв, рівень флюктуацій, періоди коливань середнього рівня); б) ДЗЧ на $(5\div 10)$ Гц, які відповідають швидкостям переміщення ДІН \approx до звукових; в) параметри доплерограм РІС, зокрема наявність і параметри коливань (час появи, період, кількість та інтенсивність мод, ДЗЧ, час і період їх появи).

9. Експериментально підтверджено високу чутливість та завадостійкість РФК на базі ДКМ РТ УРАН-3 при вирішенні задачі дистанційної діагностики АІЗ, їх широкі функціональні можливості при реалізації різних радіофізичних методик ДЗІ для вирішення задач виявлення та ідентифікації енергетично слабких АІЗ, спричинених впливом ААХ, генерованих НК АВ.

10. Запропоновано, при виконанні у даній НДР програми досліджень із штучної акустичної модифікації іоносфери на основі удосконалення наявної наземної НЧ акустичної і радіоастрономічної інфраструктури покласти в основу: а) створення стаціонарного комплексу акусто-електромагнітного зондування іоносфери у сейсмічно небезпечному Прикарпатському регіоні в складі (рис. 1.4) – стаціонарний НК АВ (НЧ і ВЧ типів); ІДК УРАН-3; двополяризаційний МІ УРАН-3; діючі КХ радіостанції в околі сейсмічно небезпечного регіону; б) проведення комплексу пошукових та періодичних активних наземно-космічних експериментів; в) узагальнення результатів експериментальних досліджень, підготовка і публікація узагальнюючої колективної монографії з проблеми штучної акустичної модифікації іоносфери та технічних пропозицій щодо участі в наземно – супутникових експериментах.

РОЗДІЛ 2. Удосконалення та апробація наземної інфраструктури наземно-космічних експериментів

2.1. Удосконалення радіоастрономічної інфраструктури

Удосконалення стосувалося, в основному, системи реєстрації і накопичення даних РТ УРАН-3: розширення частотної смуги пропускання, підвищення чутливості та форми представлення даних.

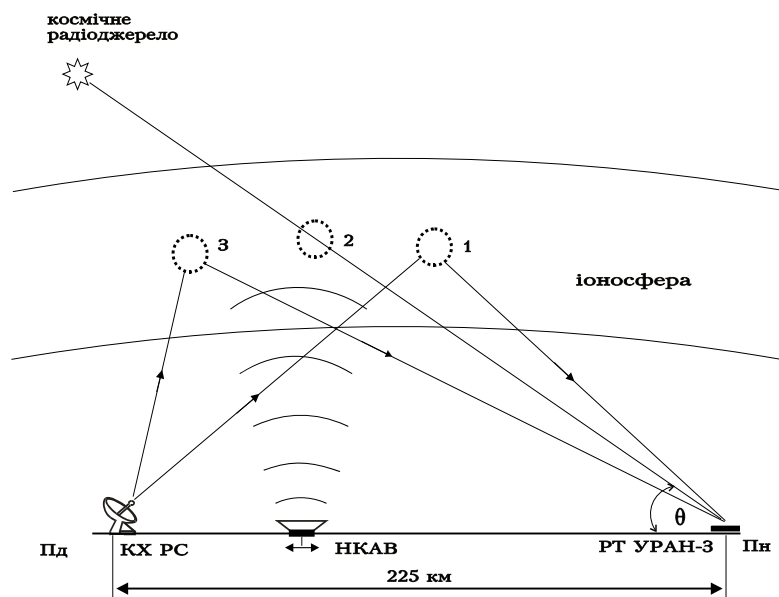


Рис. 1.4 – Схема стаціонарного комплексу акусто-електромагнітного зондування іоносфери із стаціонарним (або мобільним) наземним керованим акустичним випромінювачем (1, 2, 3 – зондовані області іоносфери).

Удосконалена система дозволяє реєструвати РВ КРД у вигляді динамічних частотних спектрів (ДЧС) ДКМ компоненти (16,5÷33) МГц з розділеннями $\Delta f=12$ кГц і $\Delta \tau=(1 \text{ мс} \div 1 \text{ хв})$. Склад цифрової системи реєстрації (ЦСР): 2 модулі – АЦП (виносний блок з найбільш сучасною елементною базою) забезпечує: високі параметри перетворення, швидку адаптацію аналогової вхідної частини до розширеного ($\sim(1 \div 60)$ МГц) діапазону вхідного сигналу, суттєво понизити рівень внутрішніх шумів, і ЦОС ADP64Z2PCI (цифрової обробки сигналів).

Основні параметри широкопasmової ЦСР регульовані, склад: 2 канали АЦП, 16 бітів із частотою оцифрування до 130 МГц, смуга аналізу до 66 МГц. (SNR > 72 dB, SFDR > 100 dB, шумовий поріг “noise floor” – 115 dB); тактування від власного високостабільного кварцового генератора ($f=66$ МГц) або від зовнішнього генератора ($f \approx (10 \div 130)$ МГц; 8192 вихідних спектральних каналів; часове вікно за замовчуванням – Ханна; перекриття сигналу в часовій

області 8192 відліків; внутрішнє ядро комплексного ШПФ – 16384 точок, розрядність обчислень – 28 (FPGA implementation); число накопичення спектрів потужності $\approx(1\div 1024)$; розрядність накопичувача спектрів 60 біт; вихідна розрядність спектральних даних 32 біт; формат вихідних даних для спектрів – 32-бітове без знакове ціле або 25-бітова мантиса, 5-бітова експонента; максимальний неперервний вихідний потік даних – 240 Мбайт/с (частота оцифрування 66 МГц); передача даних у ПК по інтерфейсу PCI-X (підтримка специфікацій 32/33, 32/66, 64/66); запис «сирих» даних із виходу АЦП (швидкість передачі з можливістю запису на жорсткий диск (RAID 0) – до 240 МБ/с); у пакетному режимі передачі швидкість запису даних – до 260 МБ/с; відображення спектрограм в реальному часі.

2.2. Удосконалення і обслуговування акустичної інфраструктури

Заплановано, на 1-ому етапі НДР, використати існуючий варіант стаціонарного ВЧ НК АВ, який забезпечує робочі частоти ААХ ~ 30 Гц, провести технічний огляд його складових механічних блоків і відновлення працездатності, провести на його основі ряд пробних експериментів для підтвердження можливості штучної акустичної модифікації іоносфери (ефект створення АІЗ на цих частотах ААХ) та частково удосконалити його для отримання більш низьких робочих частот ААХ.

Технічний огляд. В процесі його проведення було виявлено ряд незначних недоліків, серед яких зношеність роторів, ослаблення ремінної передачі, необхідність заміни мастила в системах зубчастих передач. За результатами огляду було проведено заміну роторів, приведення ремінної передачі в робочий стан, обслуговування системи подачі мастила.

Вимірювач частоти. Розроблення вимірювача частоти ААХ, генерованої НК АВ параметричного типу, обумовлено необхідністю забезпечення низьких частот генерованого інфразвуку (<10 Гц) з метою стійкої акустичної модифікації іоносфери. Це вимагало створення засобів вимірювання робочих частот генерованої ААХ в цьому діапазоні. Відомий акустичний метод вимірювання придатний лише для оцінювання акустичних

збурень. Більш точні вимірювання забезпечує розроблений авторами тахометричний метод [27], який ґрунтується на вимірюванні параметрів обертання валів з роторами. На рис. 1.5 наведена загальна структурна схема такого вимірювача частоти звуку, який адаптований до запису вимірних частот в комп'ютер і додатково (до програми) реалізований на 1-му етапі НДР.

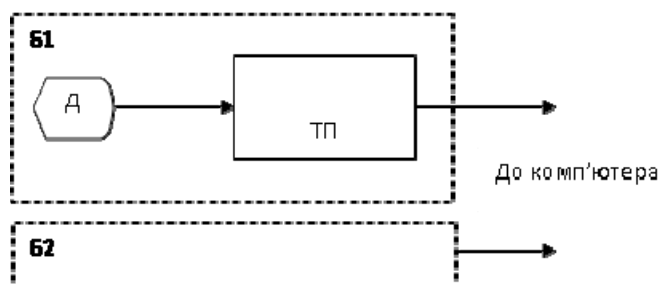


Рис. 1.5 – Структурна схема вимірювача частоти генерованого звуку: Б1, Б2 – два однотипні блоки для кожного з двигунів НК АВ; Д – індуктивний давач частоти обертання вала; ТП – тахометричний перетворювач

2.3. Експериментальна апробація удосконаленого комплексу

Після відновлення працездатності всіх компонентів експериментального комплексу «ВЧ НК АВ – ІДК УРА-3» в період з 25.09.2018 р. по 29.11.2018 р. була проведена серія із 15 експериментів за схемою (рис. 1.3а, рис. 1.4). Контролювали також погодні умови, що необхідно з огляду на відносно високу робочу частоту генерованої ААХ та на їх вплив на поширення ААХ.

Дослідження штучних АІЗ, спричинених дією ААХ, генерованих НК АВ, проведені РА-методом з використанням як зондувального РВ КРД та Галактичного тла в смузі (20÷25) МГц. Часові реалізації РВ, що пройшло крізь іоносферу, аналізували перед, в процесі і після роботи НК АВ і без АЗ при фіксованих положеннях ДС РТ УРАН-3. Геометрія вибрана так, щоб РВ КРД могло взаємодіяти з ААХ на іоносферних висотах $\sim (100\div 200)$ км, а інтенсивність РВ відповідала чутливості РТ УРАН-3. Цим вимогам задовольняють КРД ЗС274 та ЗС348 (кульмінація ЗС274 – 51° , а ЗС348 – 44° ; густина потоку РВ ЗС274 – 5300 Ян, а ЗС348 – 2300 Ян).

На рис. 1.6 наведені експериментальні записи ДЧС РВ (тривалість – 1 год (28.09.2018 р. з 14:40:00 UT до 15:30:00 UT), смуга ((20÷25) МГц) (рис. 1.6а, вгорі) і його часового профілю на $f=22$ МГц (рис. 1.6а, внизу), здійснені при

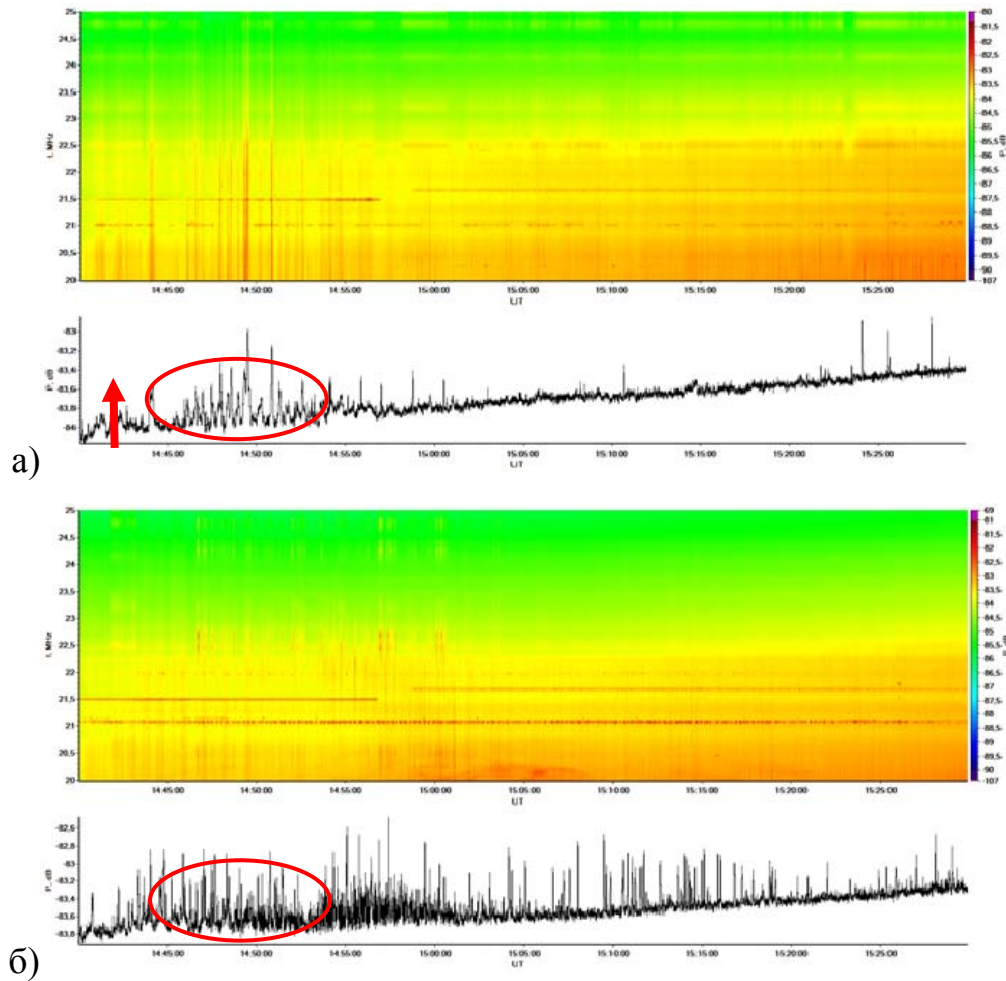


Рис. 1.6 – Динамічні частотні спектри космічного радіовипромінювання (зображення вгорі, тривалість запису – 1 год) і часові профілі (частота 22 МГц) (графіки внизу), зареєстровані 28.09.2018 р. з акустичним випромінюванням (а) і 29.09.2018 р. без акустичного випромінювання (б) (стрілка – час початку роботи НК АВ, еліпсом обмежена часова ділянка прояву інтерференційного відгуку області, спричиненого поширенням акустичної хвилі крізь іоносферу) роботі НК АВ (час початку АЗ (14:42:00 UT або 17:42:00 місцевий) позначено червоною стрілкою (рис. 1.6а, вгорі)). НК АВ функціонував в режимі триразового повтору «(звучання 60 с – пауза 60 с)». Час початку АЗ вибирали з врахуванням часу кульмінації КРД ЗС348 (14:49 UT, 28.09.2018).

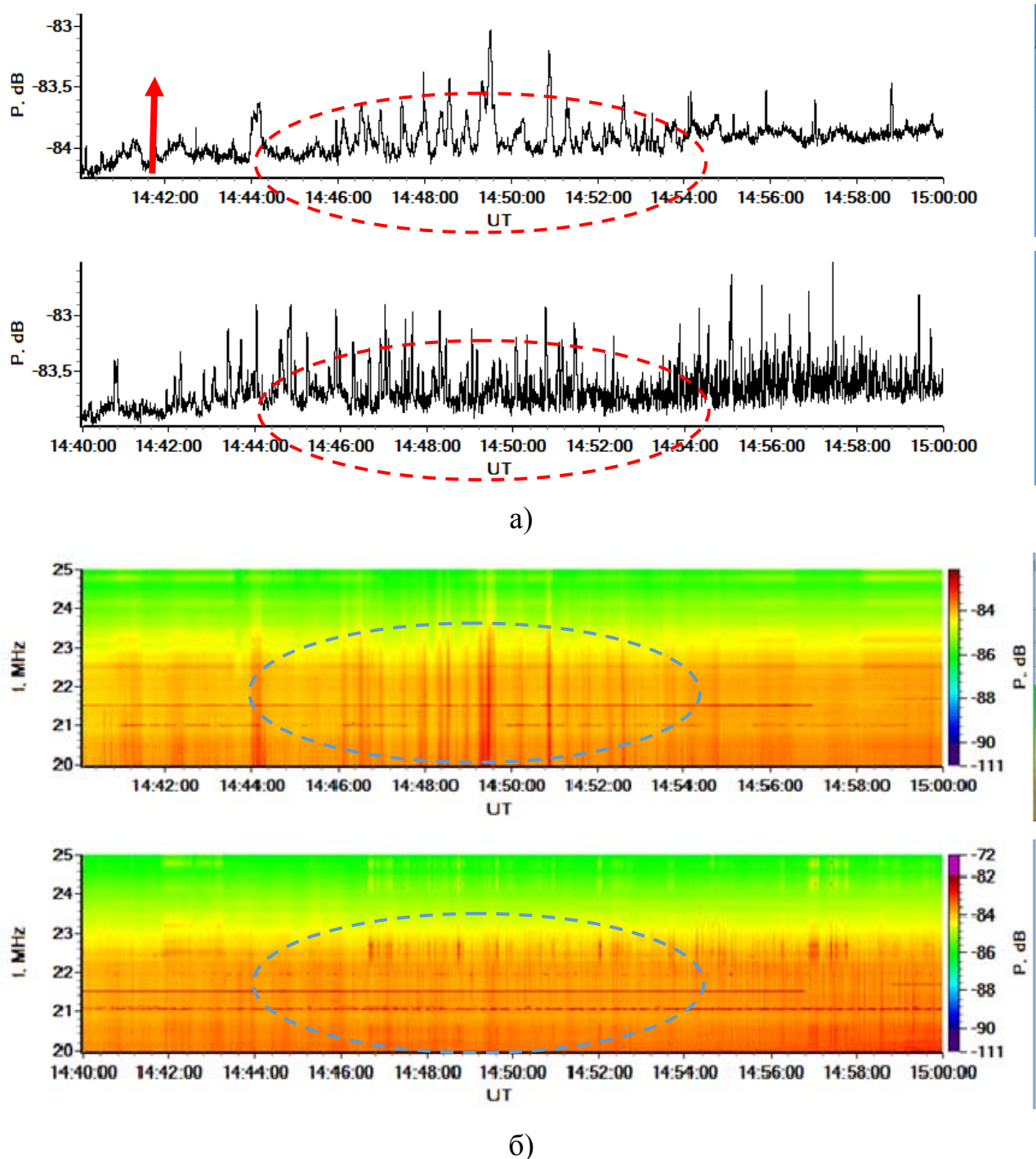


Рис. 1.7 – Виділена на рис. 1.6 ділянка запису ДЧС (б) і часові профілі на $f=22$ МГц (а), обмежена тривалістю 20 хв з АЗ (верхні) і без АЗ (нижні)

На рис. 1.6 б представлені аналогічні записи експериментів, час проведення яких співпадає з часом експерименту від 28.09.2018 р. під час роботи НК АВ, але які здійснені 29.09.2018 р. без роботи НК АВ (без АЗ).

Порівняння експериментальних записів часових профілів ДЧС (рис. 1.6),

на якому зареєстровано РВ КРД з роботою НК АВ (початок помічено стрілкою), дозволяє стверджувати про появу на записі з акустичним збудженням (з деякою затримкою $\approx(5\div 6)$ хв)) ділянки (виділена на ДЧС еліпсоїдальним контуром), на якій чітко проявилася певна інтерференційна структура (періодичні коливання інтенсивності РВ КРД) тривалістю $\approx(7\div 10)$ хв

На рис. 1.7 у збільшеному масштабі представлено окрему часову ділянку записів ДЧС і часових профілів на $f=22$ МГц, виділену на рис. 1.6. Прояв інтерференційних коливань у реєстрованому РВ КРД після проходження крізь неї ААХ (оцінки за середньою швидкістю поширення ААХ) на цих записах від 28.09.2018 є більш чітким. На записах від 29.09.2018 на фоні Галактичного радіовипромінювання спостерігаються більші шуми, ніж напередодні, проте таких інтерференційних викидів не зафіксовано, зокрема і в момент кульмінації радіоджерела 3С348 (14:45 UT).

Таким чином, за даними експрес-аналізу динамічних спектрів спостережень РВ Галактичного тла та КРД, у результатах проведених експериментів спостерігаються зміни інтенсивності РВ, зумовлені збуреннями іоносфери на висотах > 100 км. Ці збурення з високою імовірністю спричинені впливом ААХ, з врахуванням затримок проходження акустики до висот іоносфери. Отриманий результат дозволяє підтвердити доцільність застосування при аналізі результатів даних експериментів моделі взаємодії РВ КРД з рухомим акустично обумовленим збуренням іоносфери (АІЗ). В основу моделі покладено ефект створення періодичної структури електронної густини, яка дорівнює довжині акустичної хвилі, при поширенні ААХ в іоносфері. При цьому для пройденого космічного РВ (при певних умовах) має місце збільшення прозорості іоносфери, причому коефіцієнт передачі радіохвилі може збільшуватися в багато разів. Математична модель такого типу резонансного просвітлення іоносфери за рахунок взаємодії з динамічною акустичною дифракційною решіткою запропонована у [24].

Основні досягнення за результатами виконання 1-го етапу НДР

1. Узагальнені результати вітчизняних і зарубіжних досліджень з проблеми акустичної модифікації іоносфери, спричиненої випадковими природними процесами (метеороїди, виверження вулканів тощо) та рукотворними (випадкові масові вибухи, потужні дослідницькі вибухи, наземні керовані акустичні випромінювачі) джерелами потужних акустичних збурень інфразвукового діапазону, що дозволило сформулювати технічні вимоги на удосконалення існуючої радіоастрономічної і акустичної інфраструктури для створення стаціонарного комплексу акусто-електромагнітного зондування іоносфери у сейсмічно небезпечному Прикарпатському регіоні.

2. Отримані перші результати апробації удосконаленого комплексу дистанційного акусто-електромагнітного зондування іоносфери на базі радіофізичних комплексів радіотелескопа УРАН-3 та стаціонарного високочастотного (частота генерованих атмосферних акустичних хвиль ≈ 30 Гц) наземного керованого акустичного вимірювача, аналіз яких (результатів) підтвердив можливість практичної реалізації ефекту штучної керованої акустичної модифікації іоносфери на цих частотах при певних станах середовища приземної і верхньої атмосфери, які визначають погодні умови і впливають на умови поширення атмосферних акустичних хвиль.

3. Вперше чітко зареєстровано явище формування інтерференційної структури іоносферних сигналів, сформованих в результаті поширення декаметрового космічного радіовипромінювання Галактичного тла і точкових радіоджерел крізь акустично модифіковану ділянку іоносфери, що підтвердило доцільність застосування при аналізі процесів акусто-іоносферної взаємодії на висотах нижньої іоносфери ((100÷200) км) моделі збільшення прозорості іоносфери для космічного радіовипромінювання внаслідок його взаємодії з рухомою, акустично обумовленою, періодичною (період відповідає довжині акустичної хвилі) структурою електронної густини іоносферної плазми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The United States Patent No.: US 6,246,964 B1 / N. Blaunstein. Method of earthquake prediction. – Jun. 12. –2001.
2. Спосіб оцінювання інфразвукової обстановки на поверхні землі на основі акусто-електромагнітного моніторингу іоносфери. / Патент України на корисну модель № 59531 МПК G01W 1/08 (2006.01). / Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України. / Івантишин О.Л. та ін.
3. [A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne eds., “Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies” / [A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne eds.]. // Springer, New York, 2010. – 734 p.
4. Госсард Э. Волны в атмосфере / [Э. Госсард, У. Хук]. –«Мир». –1975. –С.532.
5. 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.
6. http://meteor.uwo.ca/research/infrasound/is_whatIS.html
7. Черногор Л.Ф. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной тунгусским космическим телом, от расстояния. / [Черногор Л.Ф., Шевелев Н.Б.]. // Радиопизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 94–103.
8. Черногор Л.Ф. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. / [Черногор Л.Ф., Шевелев Н.Б.]. // Кинематика и физика небесных тел. – 2018. – Т. 34, №3. – С. 59–75.
9. Chernogor L.F. Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009 / [L.F. Chernogor, N.B. Shevelev]. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2018. – Vol. 34, No 3. – P. 147–160.
10. Черногор Л.Ф. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. / [Л.Ф. Черногор, Н.Б. Шевелев].//Радиопизика и радиоастрономия. –2018. –Т. 23, №1. –С. 24–35.
11. Chernogor L.F. The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid. / [L.F. Chernogor, G. Qiang, V.T. Rozumenko, M.B.

Shevelev]. // *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University, Kyiv, Ukraine, May 29 – June 01, 2018. Book of Abstracts.* – 2018. – P. 89–90.

12. Chernogor L.F., Liashchuk O.I. Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7, 2015. / [L.F. Chernogor, O.I. Liashchuk]. // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 2017. – Vol. 33. – No. 6. – Pp. 276–290.

13. Черногор Л.Ф. Зависимость амплитуды инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом мощного вулкана, от расстояния / [Л.Ф. Черногор, Н.Б. Шевелев]. // *Вісник Харківського нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Серія "Радіофізика та електроніка".* – 2017. – Вип. 27. – С. 57–60.

14. Chernogor L.F. Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City. / [L.F. Chernogor, O.I. Liashchuk et al.]. // *Astronomy and Space Physics in the Kyiv Un-ty, Kyiv, Ukraine, May 29 – June 01, 2018. Book of Abstracts.* – 2018. – P. 87–88.

15. Черногор Л. Ф. Параметры инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми взрывами на арсенале боеприпасов. / [Л.Ф. Черногор, А.И. Лящук, Н.Б. Шевелев]. // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2018. – Т. 23, № 4.

16. Чорногор Л.Ф., Параметри інфразвукових сигналів в атмосфері, згенерованих протягом техногенної катастрофи поблизу м. Вінниця: результати обробки даних української мережі мікробарографів. / [Л.Ф. Чорногор та ін.]. // Вип. 5. Обчисл. методи і системи перетв. інформації: зб. пр. V-ї НТК, Львів, 4 – 5 жовтня 2018 р. // Львів: ФМІ НАНУ, 2018. – С. 99–103.

17. Альперович Л.С. и др. Акустическая волна взрыва // *Физика Земли.* – 1985. – №11. – С.32-42.

18. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М: Наука. – 1985. – 195с.

19. Koshovyy V.V. Radiophysical complexes for cosmic investigations based on Ukrainian radiotelescope URAN-3. / [V.V. Koshovyy, O.L. Ivantyshyn et al.] // *Acta Cosmologica.* – 1997. – FASCICULUS XXIII-2. – P. 67-70.

20. Кошовий В. В., Сорока С. А. Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем. I. Експериментальне виявлення акусто-іоносферних збурень. / [В.В. Кошовий, С.О. Сорока]. // Космічна наука і технологія. – 1998. – 4, № 5/6. – С. 3–17.
21. Кошевой В.В. Выявление слабых акусто-ионосферных возмущений методом рассеивания радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях с использованием декаметрового радиотелескопа УРАН-3. / [В.В. Кошовый, О.Л. Ивантишин]. // Отбор и обработ. информации. – 1998. – Вып.12(88). – С. 32–36.
22. Кошевой В.В. Акустическое возмущение ионосферной плазмы наземным излучателем. / [В.В. Кошовый, С.А. Сорока]. // Космическая наука и технология. – 1998. – т.4, №5/6. – С. 3–17.
23. Кошевой В. В. Радиофизическая и радиоастрономическая диагностика ионосферных эффектов, вызванных наземным инфразвуковым излучателем (предварительные результаты) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – 42, № 8. – С. 785–798.
24. Kotsarenko N.Ya. Increase of the transparency of the ionosphere for cosmic radiowaves caused by a low frequency wave. / [N.Ya. Kotsarenko, S.A. Soroka, S.V. Koshevaya, V.V. Koshovyy]. // Physica Scripta. – 1999. – V.59, №2. – P. 174–181.
25. Черемных О.К. Наземно-космический эксперимент по искусственной акустической модификации ионосферы. Первые результаты. / [О.К. Черемных, В.В. Кошовый, М.Е. Мельник и др.]. // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т.20, №6. – С.60-73.
26. Rapoport Yuriy G. Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. / [Yuriy G. Rapoport, Oleg K. Cheremnykh, Volodymyr V. Koshovy, Mykola O. Melnyk et al.]. // Ann.Geophys. – 2017. – 35. – P. 53-70, doi: 10.5194/angeo-35-53-2017.
27. В.К. Липский, Л.Г.Липская, В.И. Шпицер Электронный тахометр. / А.С. 1985. (<http://patents.su/2-1439510-ehlektronnyjj-takhometr.html>).

Основні публікації за результатами виконання 1-го етапу проекту

1. Черногор Л.Ф. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной тунгусским космическим телом, от расстояния. / [Черногор Л.Ф., Шевелев Н.Б.]. // Радиопизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 94–103.
2. Черногор Л.Ф. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. / [Черногор Л.Ф., Шевелев Н.Б.]. // Кинематика и физика небесных тел. – 2018. – Т. 34, №3. – С. 59–75.
3. Chernogor L.F. Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009 / [L.F. Chernogor, N.B. Shevelev]. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2018. – Vol. 34, No 3. – P. 147–160.
4. Черногор Л.Ф. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. / [Л.Ф. Черногор, Н.Б. Шевелев]. // Радиопизика и радиоастрономия. –2018. –Т. 23, №1. –С. 24–35.
5. Черногор Л. Ф. Параметры инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми взрывами на арсенале боеприпасов. / [Л.Ф. Черногор, А.И. Лящук, Н.Б. Шевелев]. // Радиопизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 4.
6. Чорногор Л.Ф., Параметри інфра звукових сигналів в атмосфері, згенерованих протягом техногенної катастрофи поблизу м. Вінниця: результати обробки даних української мережі мікробарографів. / [Л.Ф. Чорногор та ін.]. // Вип. 5. Обчисл. методи і системи перетв. інформації: зб. пр. V-ї НТК, Львів, 4 – 5 жовтня 2018 р. // Львів: ФМІ НАНУ, 2018. – С. 99–103.
7. Rapoport Yuriy G. Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. / [Yuriy G. Rapoport, Oleg K. Cheremnykh, Volodymyr V. Koshovy, Mykola O. Melnyk et al.]. // Ann. Geophys. – 2017. – 35. – P. 53-70, doi: 10.5194/angeo-35-53-2017.