

<https://doi.org/10.15407/knit2020.02.019>
УДК 550.388.2+550.34

В. В. КОШОВИЙ¹, пров. наук. співроб., канд. техн. наук, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, зав. Шацької міжвідомчої науково-дослідної екологічної лаб.

E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua; volodymyrkoshovy@gmail.com

О. Л. ІВАНТИШИН¹, зав. лаб., канд. техн. наук

Р. Т. НОГАЧ², наук. співроб.

Л. Ф. ЧОРНОГОР³, д-р фіз.-мат. наук, проф., Лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, двічі Лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, Лауреат Премії МВССО СРСР, Заслужений діяч науки і техніки України

З. Т. НАЗАРЧУК¹, директор ін-ту, акад. НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф.

М. О. МЕЛЬНИК², зав. відділу, канд. техн. наук

Б. І. КАЛІТА², заст. зав. відділу

Б. С. ХАРЧЕНКО¹, зав. сектору

І. М. РОМАНИШИН¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

А. Б. ЛОЗИНСЬКИЙ¹, мол. наук. співроб.

Б. П. РУСИН¹, зав. відділу, д-р техн. наук, проф.

Л. М. КАРАТАЄВА², мол. наук. співроб.

З. І. ЛЮБІНЕЦЬКИЙ², заст. зав. лаб.

Л. В. АЛЬОХІНА², зав. лаб.

В. К. ЛІПСЬКИЙ², зав. сектору

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
вул. Наукова 5, Львів, Україна, 79053

² Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України і ДКА України
вул. Наукова 5А, Львів, Україна, 79060

³ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна
Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ШТУЧНА АКУСТИЧНА МОДИФІКАЦІЯ НАВКОЛОЗЕМНОГО СЕРЕДОВИЩА

Досліджуються деякі можливості реалізації штучної акустичної модифікації навколосередовища від поверхні Землі до іоносферних висот при використанні наземного керованого акустичного випромінювача інфразвукового діапазону. Проаналізовано результати попередніх досліджень, а також розглянуто характерні параметри інфразвуку, генерованого природними явищами і рукотворними процесами та особливості його впливу на стан навколосередовища. Обґрунтовано основні умови реалізації штучної акустичної модифікації іоносфери. Наведено і обговорено результати першого етапу верифікації запропонованої методології. Для її верифікації використано: радіоастрономічний метод дистанційного зондування іоносфери, радіовипромінювання космічних радіоджерел як зондувальне, наземний комплекс акустико-електромагнітного зондування іоносфери у складі радіотелескопа УРАН-3 і наземного керованого акустичного випромінювача параметричного типу. Перший етап верифікації здійснювався на частотах, близьких до верхньої межі інфразвукового діапазону (~30 Гц). Попередній аналіз отриманих результатів підтвердив, що вже у випадку наземної генерації інфразвуку з частотою $f \approx 30$ Гц у навколосередовищному просторі можуть скластися умови, що дозволяють реалізувати керовану акустичну модифікацію іоносфери і виявляти слабкі акустико-іоносферні збурення. Останні можуть формуватися в іоносфері при

Цитування: Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Ногач Р. Т., Чорногор Л. Ф., Назарчук З. Т., Мельник М. О., Каліта Б. І., Харченко Б. С., Романишин І. М., Лозинський А. Б., Русин Б. П., Каратаєва Л. М., Любінецький З. І., Альохіна Л. В., Ліпський В. К. Штучна акустична модифікація навколосередовища. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2 (183). С. 19—58. <https://doi.org/10.15407/knit2020.02.019>

певних станах плазми, а також при станах середовища приземної і верхньої атмосфери, які, в свою чергу, визначають погодні умови у приземному шарі і впливають на параметри генерації і поширення атмосферних акустичних хвиль. Наступний етап роботи передбачає дослідження можливостей реалізації штучної акустичної модифікації іоносфери з використанням наземного керованого акустичного випромінювача в частотному діапазоні 2...10 Гц.

Ключові слова: навколоземний простір, штучна акустична модифікація іоносфери, наземний керований акустичний випромінювач, радіотелескоп УРАН-3, акустико-іоносферні збурення, радіоастрономічний метод, трансмісійний радіосигнал, розширений спектральний аналіз.

ВСТУП

Неоднорідне навколоземне середовище досить чутливе до енергетики космічного та наземного походження. Серед компонентів системи «Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера» найбільш чутливою до такого впливу є іоносфера. Вивчаючи динаміку її стану, можна виявляти збурення, визначати локалізацію та походження їхніх джерел, прогнозувати виникнення небезпечних явищ на поверхні Землі (землетруси, вулкани, потужні атмосферні процеси тощо). Значні (>50 км) відстані іоносфери від поверхні Землі вимагають спеціальних методів дистанційного зондування її стану.

Більшість потужних збурень літосферного та приземного походження супроводжуються генерацією атмосферних акустичних хвиль (ААХ), які поширюються в атмосфері, переносячи основну частину енергії у звуковому чи інфразвуковому діапазонах до іоносферних висот, модифікують стратифіковане з висотою її середовище [22, 23, 31, 33, 35, 36, 45, 70—72, 74], формуючи при цьому в ньому різні типи акустично стимульованих збурень. Параметри цього типу ААХ характеризуються, внаслідок впливу стратифікації середовища поширення, значною дисперсією.

Вищезначене свідчить про актуальність досліджень наукових проблем, пов'язаних з акустичною модифікацією іоносфери, зокрема процесів поширення ААХ до іоносферних висот, їхньої взаємодії з іоносферною плазмою, виникнення й еволюції акустико-іоносферних збурень (АІЗ), генерованих у нижніх шарах навколоземного середовища, технологій виявлення АІЗ та технологій їхнього діагностування. Всі ці питання об'єднують в єдину науково-практичну проблему акустичної модифікації іоносфери (АМІ).

У прикладному плані ця проблема трансформується у проблему короткострокового прогно-

зування землетрусів, вивержень вулканів тощо. Один із варіантів її розв'язання використовує гіпотезу про генерацію інфразвуку у процесі поширення літосферних газів вздовж тріщин за 1-2 доби до активної фази землетрусу [22, 23, 31, 33, 35, 36, 49, 69] та припущення щодо впливу сейсмічності Землі через акустичні хвилі на іоносферу [2]. Відтак запропоновано застосовувати метод акустико-електромагнітного зондування іоносфери [18], який дозволяє отримати експериментальну інформацію про АІЗ. Процеси формування АІЗ природного та рукотворного походження, їхнє трансформування у плазмові хвилі різних типів і поширення на значні відстані, а також питання акустичної стимуляції виникнення різних побічних ефектів широко вивчалися багатьма дослідниками (М. Б. Гохберг, М. Гаякава, М. Парро, Н. Блаунштейн, Е. Бланк, а в Україні — Л. Ф. Чорногор, С. О. Сорока, О. К. Черемних, Ю. Г. Рапорт, Ю. О. Селіванов та ін.).

Для виявлення й ідентифікації АІЗ та для локалізації джерел інфразвуку необхідно знати закономірності впливу різних чинників, зокрема наземних акустичних збурень, на неоднорідне шарувате навколоземне середовище. Ця частина проблеми досліджена недостатньо, що обмежує на даний час практичну реалізацію методів прогнозування землетрусів на основі акустичних провісників. Лише за останні три-чотири десятиріччя більш інтенсивно почали вивчати генерацію інфразвуку високоенергетичними природними явищами та рукотворними процесами, досліджувати наслідки модифікації різних шарів атмосфери при висотному поширенні ААХ, розробляти моделі та розвивати інформаційні технології опрацювання даних акустико-іоносферної взаємодії.

Наприклад, в роботах [17, 20, 23, 31, 68] допускалась можливість дії декількох фізичних

механізмів літосферно-іоносферних зв'язків і розглядались деякі їхні важливі моделі в системі «літосфера — атмосфера — іоносфера». В одних із них передбачається, що атмосферні акустичні та акустогравітаційні хвилі (АГХ), генеровані у приземній атмосфері над регіоном підготовки землетрусів, поширюються через атмосферу, досягають іоносферних висот і призводять до збурень електричного поля та модуляції концентрації заряджених частинок. В Україні ці дослідження зосереджені головню у таких наукових установах, як Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна (ХНУ), Інститут космічних досліджень НАН та ДКА України (ІКД, Київ), Інститут іоносфери НАН та МОН України (Харків), Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України (ЛЦ ІКД), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ, Львів).

Основними чинниками, що ускладнюють дослідження акустичного каналу літосферно-іоносферної взаємодії, є: відсутність ефективних засобів керованої генерації ААХ високої інтенсивності, здатних досягати іоносферних висот; неоднорідність властивостей іоносфери; нестаціонарність іоносферних процесів, зумовлених випадковим впливом різних природно-техногенних чинників; слабкий відгук іоносфери на акустичний вплив; низька ефективність отримання стійкого та статистично вагомого відгуку іоносфери на приземні акустичні збурення; велика зашумленість сигналів АІЗ та ін.

Згадані особливості необхідно враховувати при дослідженні різних аспектів проблеми АМІ, зокрема в рамках її окремого розділу — штучної (програмованої, за термінологією роботи [19]) акустичної модифікації іоносфери. У цій же праці [19] підкреслено фундаментальність таких досліджень і сформульовано задачу визначення характеристик наземного акустичного збудження, зокрема його мінімальної інтенсивності, при якій формується відгук іоносфери, придатний для його достовірного виявлення та реєстрації наземними або космічними засобами. Фактично йдеться про визначення ефективності впливу наземних акустичних збурень на іоносферу, що при розгляді акустичного каналу літосферно-іо-

носферної взаємодії трансформується в задачу оцінювання ефективності акустико-іоносферного впливу техногенних акустичних джерел.

Дана робота враховує наведені вище міркування. Її метою є обґрунтування методології досліджень, проведення яких дозволить оцінити ефективність акустико-іоносферного впливу наземного керованого акустичного випромінювача (НКАВ), розробленого ЛЦ ІКД для дослідження процесів штучної АМІ й інших структурних елементів навколоземного середовища. Для цього в роботі будуть розглядатися такі задачі:

- обґрунтування вибору основних параметрів НКАВ на основі аналізу характерних параметрів інфразвукових хвиль, генерованих різними природними та рукотворними джерелами;
- формулювання методології досліджень штучної акустичної модифікації іоносфери;
- розвиток ідеї дистанційного зондування іоносфери на основі методу і системи акустико-електромагнітного зондування;
- отримання результатів експериментальної верифікації комплексу, який включає НКАВ, декаметровий радіотелескоп УРАН-3 та прогресивні інформаційні технології обробки даних.

ІНФРАЗВУК, ГЕНЕРОВАНИЙ ПРИРОДНИМИ ТА ТЕХНОГЕННИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Джерела інфразвуку в атмосфері. Акустичні провісники сейсмічної активності найбільш інформативні в інфразвуковому діапазоні [2, 7, 20, 23, 31, 67]. Як відомо, інфразвук — це пружні коливання повітря, частота яких є меншою за 20 Гц і доходить впритул до власної частоти коливаний атмосфери (частота Брента — Ваясяля ~ 0.003 Гц для нижньої атмосфери). Джерелами інфразвуку можуть виступати як природні, так і рукотворні чинники [3, 20—31, 77, 84].

До природних джерел інфразвуку належать різні метеорологічні та сейсмологічні явища, зокрема: потужні урагани, що досягають кількох сотень кілометрів у діаметрі [28]; потужні атмосферні вихори та полярні саява протяжністю кілька сотень кілометрів; грозова активність та атмосферні фронти [28, 45, 85]; рух морської поверхні [77]; сходження снігових лавин, падіння метеороїдів та космічного сміття на поверхню

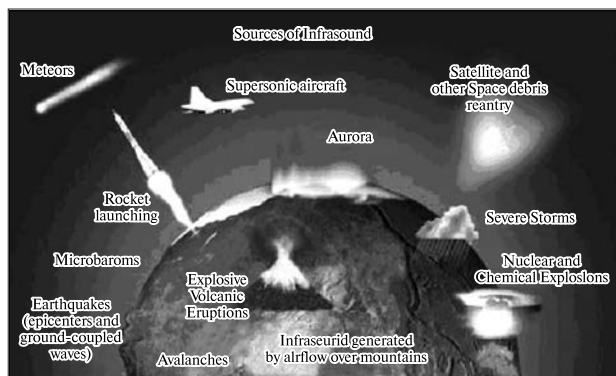


Рис. 1. Деякі з поширених природних та штучних джерел інфразвуку (за даними роботи [80])

Землі, варіації космічної погоди тощо [44, 45, 48, 50, 51, 54, 55, 57, 62—64, 67, 77, 91—93]; виверження вулканів і землетруси, що можуть коливати значні площі земної поверхні [57, 58, 60, 61, 75, 88, 95], тощо.

До рукотворних (техногенних) джерел інфразвуку належать: хімічні й ядерні вибухи [51]; старту та польоти потужних ракет і літаків, що долають великі відстані з надзвуковою швидкістю [46, 47, 59, 61, 76, 79, 81, 83]; вибухи в кар'єрах, виробничу діяльність людини з використанням високоенергетичних технологічних процесів, військові дії [24, 31], аварії на військових арсеналах [24—27, 29—32, 77] тощо. Природні джерела інфразвуку мають в основному випадковий характер, а рукотворні генерують акустичні збурення цілеспрямовано з певними обмежено керованими параметрами, зокрема для дослідження процесів штучної АМІ.

При розробленні адекватної фізико-математичної моделі поширення інфразвукових хвиль необхідно враховувати фактори, що зумовлюють особливості їхнього поширення в атмосфері [3, 77, 84]:

1) велика довжина хвилі λ_s (для ААХ з періодом $T_s = 30$ значення $\lambda_s = 10$ км);

2) хвильові системи охоплюють протяжні відстані в атмосфері;

3) значні просторові розміри джерел інфразвуку, що визначається умовами його генерації в атмосфері, але обмежує можливу кількість джерел (рис. 1) [80];

4) характерні властивості хвиль скінченної амплітуди, що поширюються до іоносфери зі швидкістю коливань звукового діапазону $v_s \approx 280 \dots 340$ м/с (на рівні моря при температурі повітря $t_{\text{пов}} = 20$ °С вона дорівнює 343 м/с), яка залежить від $t_{\text{пов}}$ та напрямку і швидкості вітру;

5) малий коефіцієнт молекулярного поглинання, зумовлений малою кінематичною в'язкістю; це відрізняє такі хвилі від «лабораторного звуку»;

6) збільшення тиску та швидкості інфразвукової хвилі зі зменшенням щільності приземної атмосфери з висотою ($z \propto \exp(z/(2H_a))$, де H_a — масштаб висоти) і багатократне (в сотні разів) збільшення числа Маха порівняно з його значенням на поверхні Землі;

7) вплив нестабільних і непередбачуваних факторів — вітри, турбулентність і неоднорідність атмосфери.

Інфразвук, генерований випадковими природними джерелами. В науковій літературі вважається, що процеси, пов'язані із прольотом великих космічних тіл в атмосфері Землі, є одними з найбільш поширених природних джерел інтенсивного інфразвуку. У систематизованому вигляді результати таких досліджень опубліковані у роботі [67] (2017 р.). Тут досліджено з використанням урядової системи інфразвукових станцій США деякі параметри зареєстрованих у хвильовій зоні інфразвукових сигналів, генерованих 78 болідами. Подано також глобальну базу даних інфразвуку болідів і визначено механізми, що відповідають за міжстанційні розкиди періодів інфразвукового сигналу (останні призводять до великих відхилень оцінок енергії джерела). Проведений аналіз показав, що висота джерела інфразвуку лише незначно впливає на дисперсію вимірюваних періодів інфразвукового сигналу, тоді як відстань від джерела до вимірювальної станції, а також шум останньої відіграють значно більшу роль.

У цій же роботі [67] представлено незвичний підхід до оцінювання енергії болідів. Поки що цей підхід є дискусійним, однак він пропонує методику емпіричного оцінювання частоти появи і ефективної порогової енергії болідних ударних хвиль, які створюють на поверхні Землі надлишковий тиск Δp , достатній для пошкодження

стандартних вікон. У результаті його застосування отримано такі оцінки:

1) при ймовірності поломки вікон від 0.4 до 7 % ефективна порогова енергія становить 5...10 кт ТНТ (1 кт ТНТ = $4.185 \cdot 10^{12}$ Дж), що відповідає $\Delta p > 500$ Па, і у глобальному масштабі такі явища відбуваються один раз на один-два роки;

2) події, які відповідають ймовірності пошкодження вікон від 0.01 до 0.7 % і $\Delta p > 200$ Па, очікуються кожні 600 років;

3) очікувана частота болідних ударних хвиль, що спричиняють значні пошкодження вікон у міських районах, становить один раз на кожні 5000 років. Тому найбільші щорічні болідні події, якщо вони відбудуться над великим міським центром, можуть призвести до значного пошкодження великої кількості вікон. Статистика падіння космічних тіл метрових розмірів детально досліджена в роботах [34, 38].

У ряді недавніх публікацій викладено результати досліджень особливостей поширення в атмосфері і параметрів інфразвуку, генерованого відомими метеороїдами та вулканами, зокрема *Тунгуським метеороїдом* (30.06.1908 р.) [41, 57, 95], *Індонезійським метеороїдом* (08.10.2009 р.) [42,

54], *Челябінським метеороїдом* (15.02.2015 р.) [33, 40, 55], *Румунським метеороїдом* (07.01.2015 р.) [53], *Липецьким метеороїдом* (21.06.2018 р.) [35], а також *виверженням вулкану Св. Гелени* [39, 60, 88]. Досліджувались кореляційні поля «відстань — амплітуда тиску», апроксимаційні залежності амплітуди тиску від відстані, моделі загасання амплітуди хвилі, оцінки коефіцієнта загасання, параметри інфразвукових хвиль (амплітуда, швидкість поширення, спектральний склад, тривалість). Деякі результати цих досліджень, які стосуються безпосередньо вимірюваних параметрів інфразвукових хвиль, генерованих метеороїдами, у систематизованому вигляді наведено у табл. 1.

Звернемо увагу, що не у всіх подіях були проведені вимірювання, які б дозволили отримати оцінки параметрів інфразвукових хвиль. Тому достовірно можна оцінювати лише діапазон зміни параметрів інфразвукових хвиль за відомих умов їхнього вимірювання та інформації, що характеризує сам об'єкт і процес генерації.

Аналіз результатів цих досліджень дозволив зробити ряд якісних висновків.

1. Залежність амплітуди інфразвуквої хвилі від відстані не піддається апроксимації про-

Таблиця 1. Параметри деяких випадкових природних джерел інтенсивних інфразвукових коливань в атмосфері

Джерело			Параметри генерованої атмосферної акустичної хвилі				
Джерело, дата	Енергія (ТНТ); Швидкість, км/с; Тривалість дії, с	Розмір, м; Висота, км	Тип хвилі	Відстань, км	Середній період, с	Середня тривалість, с	Середня швидкість, м/с
Тунгуський метеороїд (30.06.1908)	10...50 Мт 17...30 ~1	17 6...10	ударна, інфразвукова	$>10^5$	20...550	~1000	~ 300
Челябінський метеороїд (15.02.2015)	440.0 \pm 18.5 кт 18.5 360...1800	18 23.3	ударна, інфразвукова	15...150	10...100	360...1800	272.9 \pm 10
Індонезійський метеороїд (08.10.2009)	70 \pm 20 кт 19.2 ~1	8...10 19.1	ударна, інфразвукова		7...15	1660...540	297
Румунський метеороїд (07.01.2015)	940...1100 ГДж (у ближній зоні) >35 ~1	1.15 45.5	ударна, інфразвукова	53...1423	1...10	1660...540	280
Вулкан Св. Гелени (07.01.2015)	(7...14) Мт 300 4440	~10 2.549	ударна, інфразвукова		100...300	~1000	~ 300

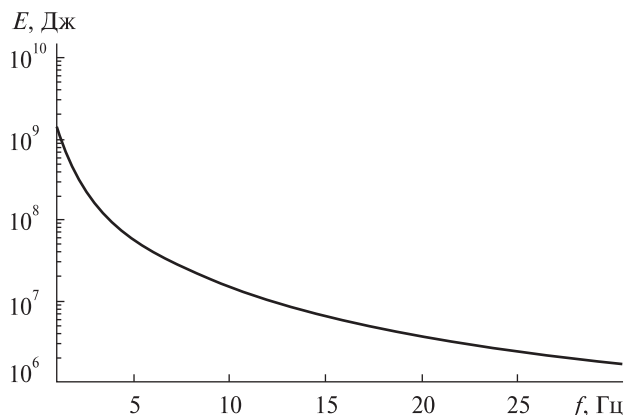


Рис. 2. Залежність енергії E , яка вивільняється при зіткненні метеороїда з атмосферою, від частоти f акустичної хвилі, що при цьому генерується

стими співвідношеннями і поясненню процесу поширення хвилі на глобальні відстані фізично достовірними механізмами.

2. Найкращі апроксимації базуються на моделях поширення інфразвукових хвиль з циліндричною або сферичною розбіжністю фронту у хвильоводах «Земля — стратосфера» і «Земля — термосфера».

3. Залежність «час запізнення — відстань» є лінійною.

4. Є стійкий статистичний зв'язок між спостережуваним і дійсним азимутами джерела інфразвукового сигналу, а також між періодами коливальних і амплітудами, обчисленими за двома методиками.

Для подальшого оцінювання необхідної енергетики наземного випромінювача доцільно оцінити рівень енергії вибухів метеороїдів. При аналізі енергії E_a вибуху метеороїда, що вивільняється при його зіткненні із щільними шарами атмосфери, враховують, що ця енергія залежить від розмірів метеороїда та передається генерованій ударній хвилі радіуса R_0 , яка при поширенні трансформується в акустичну хвилю частоти f_0 [62, 89]:

$$R_0 = \left(\frac{E_a}{p_0} \right)^{1/(\alpha+1)}, \quad f_0 = \frac{v_s}{2.81 R_0},$$

де p_0 — атмосферний тиск, α — коефіцієнт (для сферичної хвилі $\alpha = 2$), v_s — швидкість звуку.

Орієнтовні значення величини енергії, яка необхідна для утворення ААХ у верхній частині інфразвукового діапазону (1...30 Гц) при зіткненні метеороїда із щільними шарами атмосфери, представлено на рис. 2. Ці розрахунки проведено для значень $f_0 = 1...30$ Гц, $p_0 = 101325$ Па (1 атм), $v_s = 340$ м/с.

Інфразвук, генерований рукотворними джерелами вибухового типу. Серед рукотворних джерел інтенсивного інфразвуку найчастіше досліджували потужні наземні дослідницькі або випадкові вибухи арсеналів зброї. Ці джерела інфразвуку є одним із інструментів фізичного моделювання передачі енергії в системі «літосфера — атмосфера — іоносфера» [1]. Одним із найбільш відомих є експеримент МАССА, проведений у 1982 р. Тротильовий еквівалент цього вибуху дорівнював 360 т ТНТ, а його результати систематизовано в роботах [4, 5] і частково наведено у табл. 2.

Під час експерименту були проведені наземні та супутникові спостереження реакції іоносфери, які забезпечували вісім пунктів наземних спостережень з давачами тиску, розташованими на різних відстанях $R = 1.4...2000$ км від епіцентру вибуху. Проведено також радіозондування іоносфери до F -області на висотах $H = 245...350$ км. За результатами спостережень на різних висотах H було оцінено такі параметри реакції іоносфери, як амплітуда, тривалість, форма та доплерівський зсув частоти, а також функцію передачі ААХ реальною атмосферою. Це дозволило вперше прослідкувати процес поширення ААХ, спричиненої вибухом, від місця її зародження до місць реєстрації у всіх пунктах на всіх радіотрасах і різних R .

За результатами експерименту зроблено висновки про спричинені вибухом іоносферні ефекти і особливості поширення ААХ, які свідчать про виявлення трансформації ААХ від вибуху на поверхні Землі в різні типи збурень іоносфери.

1. Поширення ААХ відбувається у приземному хвильоводі висотою $H_{\text{хв}} \approx 2$ км на відстані до $R \approx 200$ км.

2. Багатострибкове, зокрема наддалеке поширення ААХ спостерігається в шарі $H_{\text{хв}} = 0...50$ км на відстані від $R \approx 200$ км до $R \approx 2100$ км.

3. Виявлено відбиття інфразвукових хвиль від шарів на $H \approx 50$ і 100 км.

4. Ефективна тривалість початкового імпульсу при його поширенні до висот $H \approx 100$ км збільшується.

5. Верхнім шаром атмосфери властиве нелінійне поширення ААХ.

6. Встановлено генерацію ВГХ під час вибуху.

7. На відстані $R \approx 10^3$ км від місця вибуху виявлено збурення концентрації електронів іоносферної плазми двох типів:

- збільшення перерізу розсіяння іоносферної плазми, яке асоціюється з МГД-хвилями, у сім разів на першій хвилині після вибуху на висотах $H = 100...400$ км і з максимумом на шостій хвилині, що відповідає швидкості поширення збурення $v_{36} \approx 100$ км/с;

- квазіперіодичні варіації концентрації електронів і температури, які асоціюються з ВГХ, через 1 год після вибуху на висотах $H \geq 300$ км, що відповідає $v_{36} \approx 0.8$ км/с.

8. Вперше зареєстровано солітони в іоносферній плазмі, про що свідчить поява на 280-й секунді магнітного імпульсу тривалістю 0.08 с у F -області і альвенівського імпульсу на $H \approx 800$ км.

9. Виявлено турбулентність плазми при поширенні електромагнітного імпульсу великої амплітуди в іоносфері з утворенням «турбулентного сліду».

10. Одночасно з альвенівським імпульсом генерується шумова пляма електростатичної НЧ-турбулентності в діапазоні 50...5000 Гц внаслідок

збудження іонно-звукової або іонно-циклотронної нестійкостей.

11. Відбувається зміна фазово-амплітудних характеристик радіотрас над епіцентром вибуху.

У ряді публікацій наведено також результати досліджень параметрів інфразвуку, генерованого випадковими техногенними подіями, зокрема масовими вибухами на арсеналах боєприпасів [37, 43, 52, 53]. В останній час такі події відбулися, наприклад, на арсеналах поблизу м. Калинівки Вінницької області 26/27 вересня 2017 р. та поблизу міста Ічня Чернігівської області впродовж 9/10 жовтня 2018 р. Для дослідження особливостей дальнього поширення надширокопосмугових інфразвукових сигналів і їхніх параметрів (хвильові форми, амплітуди, спектральний склад) автори робіт [41, 43, 56] використали мережу мікробарографів, що дозволило організувати траси різної орієнтації протяжністю від 153 до 181 км за рахунок розташування мікробарографів на різних відстанях: 176 км (Кам'янець-Подільський, 4 канали), 153 км (Малин, 2 канали), 181 км (Балта, 1 канал). Реєстрували й обробляли інфразвукові сигнали в діапазоні частот $f_s = 0.003...12$ Гц і тисків 0.01...100 Па на основі такої методики: реєстрація часових залежностей тиску у відносних одиницях; переведення в абсолютні одиниці; фільтрація в діапазоні періодів $T_s = 0.2...10$ с; віконне перетворення Фур'є відфільтрованих часових залежностей тиску; адап-

Таблиця 2. Параметри деяких випадкових і спланованих техногенних джерел інтенсивних інфразвукових коливань в атмосфері

Тип і параметри джерела			Параметри генерованої атмосферної акустичної хвилі				
тип джерела, дата	енергія (ТНТ)	висота, км	тип хвилі	відстань, км; тип поширення	середній період, с	середня тривалість, с	середня швидкість, м/с
Вибух боєприпасів, Калинівка, Вінницька обл. (26/27.09.2017)	2.6...54 т	— наземний	ударна, інфразвукова	153...181 одно- і багатопроменеве	0.6...2.4	60...120	300...309
Вибух боєприпасів, Ічня, Чернігівська обл. (9/10.10.2018)	440.0±18.5 кт	~100 наземний	інфразвукова	218 одно- і багатопроменеве	0.5...1.5	5...7	320...340
Вибух, науковий проект МАССА (1982)	360 т	— наземний	ВГХ, МГД, інфразвукова	1.4...2000 приземне, багатострибкове	~10	~100	~300

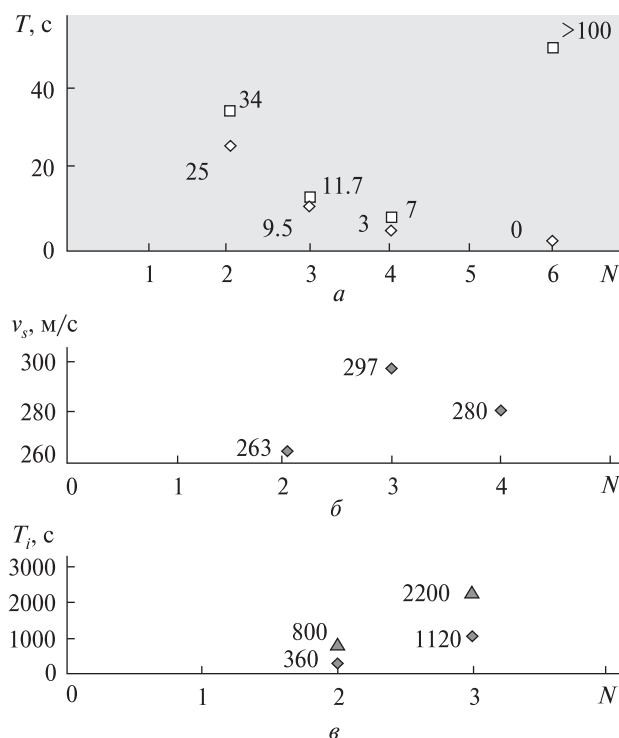


Рис. 3. Кількісні оцінки параметрів інфразвукових сигналів, згенерованих метеороїдами (N — номер джерела інфразвуку у табл. 1): a — період T , b — середня швидкість V_s поширення коливань, c — тривалість T_i імпульсу. Квадратики і трикутники — максимальні значення параметрів, ромбики — мінімальні

тивне перетворення Фур'є; вейвлет-перетворення з використанням базисної функції Морле.

Висновки за результатами дослідження такі.

1. Амплітуда цугу і період коливань зменшуються при зменшенні енергії вибухів.

2. Тривалість цугу коливань $\tau_s = 1...2$ хв, причому немає чіткої її залежності від енергії вибухів.

3. Часова залежність тиску не є монотонною.

4. Спектр містить складові з періодами $T_s = 0.6...2.4$ с.

5. Коефіцієнт широкосмуговості становив $0.8...1.2$.

6. Поширення вздовж трас є однопроменевим і багатопроменевим.

7. Максимум енергії відповідає періодам $T_s = 1...2$ с.

8. Енерговиділення складає $2.6...54$ т ТНТ.

Досить висока наукова цінність використання вибухових методів для дослідження явища

штучної АМІ значною мірою нівелюється їхнім негативним впливом на стан екологічної безпеки навколишнього середовища та слабкою керованістю процесом генерації інфразвуку. Це стимулювало дослідників створювати інші джерела акустичних збурень, екологічно безпечніші та з вищою керованістю параметрів. Але на основі літературних джерел поки що важко визначити повною мірою технічні вимоги до такого типу керованих джерел інфразвуку, які б забезпечили можливість їхнього використання для дослідження явища АМІ. Це пояснюється неповнотою наявних даних про генерацію інфразвуку випадковими природними та рукотворними джерелами, складністю та багатогранністю фізичних ефектів, недостатньою номенклатурою вимірювальної інфраструктури, випадковістю та швидкоплинністю зміни стану іоносфери і параметрів джерел інфразвукових хвиль.

Для формування адекватних вимог до наземного акустичного випромінювача, який може здійснити достатній енергетичний вплив на іоносферу, доцільно порівняти інфразвук, генерований під час падіння боліда, з наземними тестовими вибухами. В роботі [62] проаналізовано сигнальні властивості акустичних хвиль на інфразвукових частотах, які генерують метеороїди діаметром $0.1...10$ м і які модифікують стан середовища атмосфери Землі. Отримано серію емпіричних зв'язків між акустичною сигнатурою поля у хвильовій зоні болідних ударів (максимальна амплітуда обвідної сигналу, амплітуда від піку до піку, загальна інтегрована енергія сигналу та інтегральне співвідношення сигнал/шум після корекції на висотний вітер) і кінетичною енергією боліда.

Порівняння параметрів інфразвукових коливань, генерованих болідами і наземними вибухами, показало, що амплітуди ААХ, генерованих малими болідними подіями з енергією менше 7 кт ТНТ, послаблюються швидше, ніж амплітуди ААХ, генерованих ядерними або хімічними вибухами. Крім того, значення акустичної амплітуди систематично є нижчим для болідів, ніж для еквівалентних наземних вибухів. Це пояснюється тим, що генерація інфразвуку болідами в атмосфері здійснюється на висотах $H > 20...30$ км.

Для інфразвукових хвиль, генерованих малими болідами, встановлено, що при визначенні відношення *інтегральної енергії вибуху боліда до потужності сигналу* коефіцієнт коригування вітру майже удвічі більший, ніж у випадку незалежно вимірюваної амплітуди сигналу. Аналогічна поведінка очікується і для зв'язку між параметрами «енергія вибуху — акустична амплітуда». В той же час, за даними роботи [62], корекція даних вітру для «великих» болідів з енергією понад 7 кт ТНТ є незначною. Вона припускає середню висоту детонації боліду $H = 20...30$ км для малих подій з енергією менше 7 кт ТНТ і висоту $H \sim 20$ км для подій з енергією більше 7 кт ТНТ. Однак у цих дослідженнях не враховано вплив нелінійних ефектів.

Проведено також порівняння спостережуваних періодів інфразвукового сигналу боліду на основі відношення АФТАС «енергія вибуху — період сигналу», яке отримують за даними ядерних випробувань, на додаток до доплерівського зсуву сигналу, зумовленого висотними вітрами. Саме цей ефект значно зменшує ймовірність визначення відношення АФТАС «енергія — період». Підвищення ж ймовірності вимагає значних обчислювальних зусиль і застосування повних глобальних моделей атмосферного вітру, наявного під час окремих подій. Враховуючи наведене вище, в роботі [59] встановлено, що для болідів некоректоване відношення АФТАС «енергія вибуху — період сигналу» після регресії не показує кращої кореляції (коефіцієнт кореляції $R \approx 0.478$), ніж більшість інших досліджених властивостей інфразвукових сигналів. Встановлено також факт переоцінки енергії джерела (у деяких випадках на кілька порядків) для енергій понад 7 кт ТНТ у випадках її визначення супутниковими спостереженнями і на основі залежності АФТАС. Зроблено припущення, що це є наслідком великомасштабної фрагментації масивних метеороїдів у атмосфері та відповідного утворення штучної великої колективної доменної порожнини, що генерує більш тривалі періоди інфразвукових хвиль. За результатами згаданих досліджень зроблено висновки, що відношення АФТАС «енергія — період» є розумним засобом оцінювання енергії болідних подій у діапазоні від 0.1 до декількох кт ТНТ.

Враховуючи результати згаданих вище досліджень генерації інфразвуку метеороїдами, у табл. 1 і на рис. 3 наведено лише ті параметри інфразвукових хвиль і діапазони зміни їхніх значень, які реєстрували під час експериментів і результати аналізу яких необхідно врахувати при створенні випромінювача типу НКВ: період інфразвукових коливань T_{inf} , тривалість інфразвукового імпульсу τ_{imp} і швидкість поширення інфразвукових хвиль v_s .

НЕВИБУХОВІ ЗАСОБИ ШТУЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ НАВКОЛОЗЕМНОГО СЕРЕДОВИЩА

Наземні акустичні випромінювачі. Дослідження акустичного каналу системи «літосфера — атмосфера — іоносфера» і процесів акустичної модифікації середовища навколоземного простору вимагає застосування наземних акустичних випромінювачів, які можуть забезпечити багаторазове повторення експериментів з керованими параметрами випромінювання ААХ з поверхні Землі. Акустичні випромінювальні комплекси такого класу вперше застосували для радіоакустичного зондування атмосфери [10, 77, 79]. Наприклад, в експерименті «Сура-sound» (Росія, 2003—2004 рр.), акустичний випромінювач забезпечував генерацію в діапазоні частот (17...24 Гц за схемою «сирена — рупор» при дослідженні тропосфери на висотах $H < 1...10$ км та мезосфери на висотах $H = 60...90$ км. Ще один приклад — вібросейсмічне зондування атмосфери на висотах $H = 1...3$ км потужним сейсмовібратором.

В Україні для проведення експериментів зі штучної керованої акустичної модифікації навколоземного середовища в 1991 р. були створені і використовуються на даний час потужні випромінювачі типу НКВ (розробка ЛЦ ІКД за участі ФМІ), а також сучасні засоби реєстрації та обробки даних цих експериментів, такі як декаметровий радіотелескоп (РТ) УРАН-3 (ФМІ), іоносферні станції та радары Інституту іоносфери НАН та МОН України і ХНУ ім. В. Н. Каразіна. При опрацюванні вимірювань використовуються й супутникові дані. Для досліджень створено ряд модифікацій НКВ: стаціонарні низькочастотні НКВ параметричного типу, які

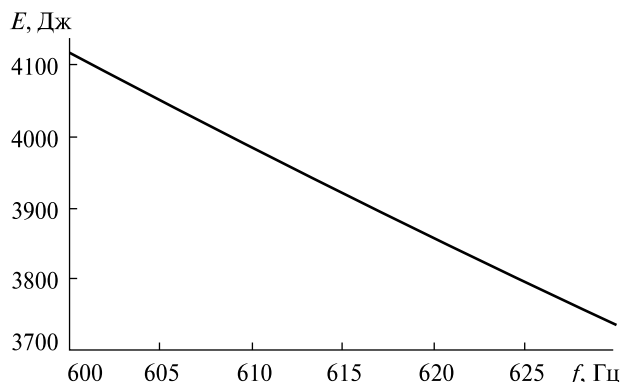


Рис. 4. Залежність величини енергії E , яка вивільняється під час генерації основних акустичних хвиль наземним керованим акустичним випромінювачем параметричного типу, від частоти f генерованих основних акустичних хвиль

забезпечують генерацію інфрашумових хвиль в діапазоні частот 1...10 Гц; стаціонарні високочастотні НКВ ротаційного типу, які забезпечують генерацію інфрашуму в діапазоні частот (10...30 Гц; мобільний високочастотний НКВ, змонтований на шасі автомобіля, що забезпечує генерацію інфрашуму на частотах понад 10 Гц. Стаціонарні НКВ розташовані на території ЛЦ ІКД у м. Львові, а мобільний комплекс розташовувався в різних місцях — на території ЛЦ ІКД (Львів) та полігоні Інституту іоносфери НАН та МОН України (Харків).

Залежність величини енергії, необхідної для генерації НКВ двох основних частот $f_0 = 600...630$ Гц в режимі параметричного випромінювача, від величини цих частот приведено на рис. 4. Для розрахунків використано ті ж параметри, що й для визначення частоти інфрашуму, генерованого метеороїдами при їхньому входженні в атмосферу (рис. 2), окрім $f_0 = 600...630$ Гц і $v_s = 420$ м/с. Порівняння енергетичних характеристик джерел випромінювання інфрашуму (природних — метеороїдів і штучних — типу НКВ) показує, що вони різняться на декілька порядків.

Для дистанційного і контактного зондування іоносфери з метою дослідження ефектів штучної АМІ використовували таке обладнання:

- радіофізичні комплекси ФМІ (Шацьк) на базі РТ УРАН-3, зокрема іоносферно-діагно-

стичний комплекс і мініінтерферометр з базою, яка дорівнює відстані між двома половинами антени радіотелескопа [7, 73];

- радіофізичні комплекси Інституту іоносфери НАН та МОН України та ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків), зокрема радар некогерентного розсіяння, доплерівський радар, радар часткових відбиттів, іоносферна станція «Базис»;

- вимірювачі параметрів інфрашумового, геоелектричного та геомагнітного полів, атмосферного струму, параметрів дуже низькочастотних (ДНЧ) радіосигналів, кліматичних параметрів на всіх полігонах;

- спеціальні радіостанції короткохвильового (КХ) діапазону, КХ-станції радіомовлення;

- бортові комплекси супутників DEMETER (Франція) і CHIBIS (Росія, Угорщина), які використовували для проведення експериментів під час прольотів супутників в околі місця розташування НКВ [8, 9, 21, 74, 82, 87, 94].

У даній роботі із багатьох експериментів, проведених на основі цього обладнання впродовж 1991—2018 рр. різними радіофізичними методами та схемами (рис. 5), виділено наступні чотири серії:

1) 1996—1998 рр. (стаціонарний низькочастотний НКВ (ЛЦ ІКД, Львів) — іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк)) і 2001—2005 рр. (стаціонарний високочастотний НКВ (ЛЦ ІКД, Львів) — іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк));

2) 2005—2006 рр. (мобільний високочастотний НКВ (ЛЦ ІКД, полігон Інституту іоносфери НАН та МОН України, Харків) — радіофізичні комплекси Інституту іоносфери НАН та МОН України і ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків) — супутник DEMETER);

3) 2013—2014 рр. (стаціонарний високочастотний НКВ (ЛЦ ІКД, Львів) — іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк) — супутник CHIBIS);

4) 2018 р. (удосконалений стаціонарний низькочастотний НКВ (ЛЦ ІКД, Львів) — удосконалений іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3 (ФМІ, Шацьк)).

Вплив наземних акустичних збурень на середовищі навколоземного простору. Фізичні процеси

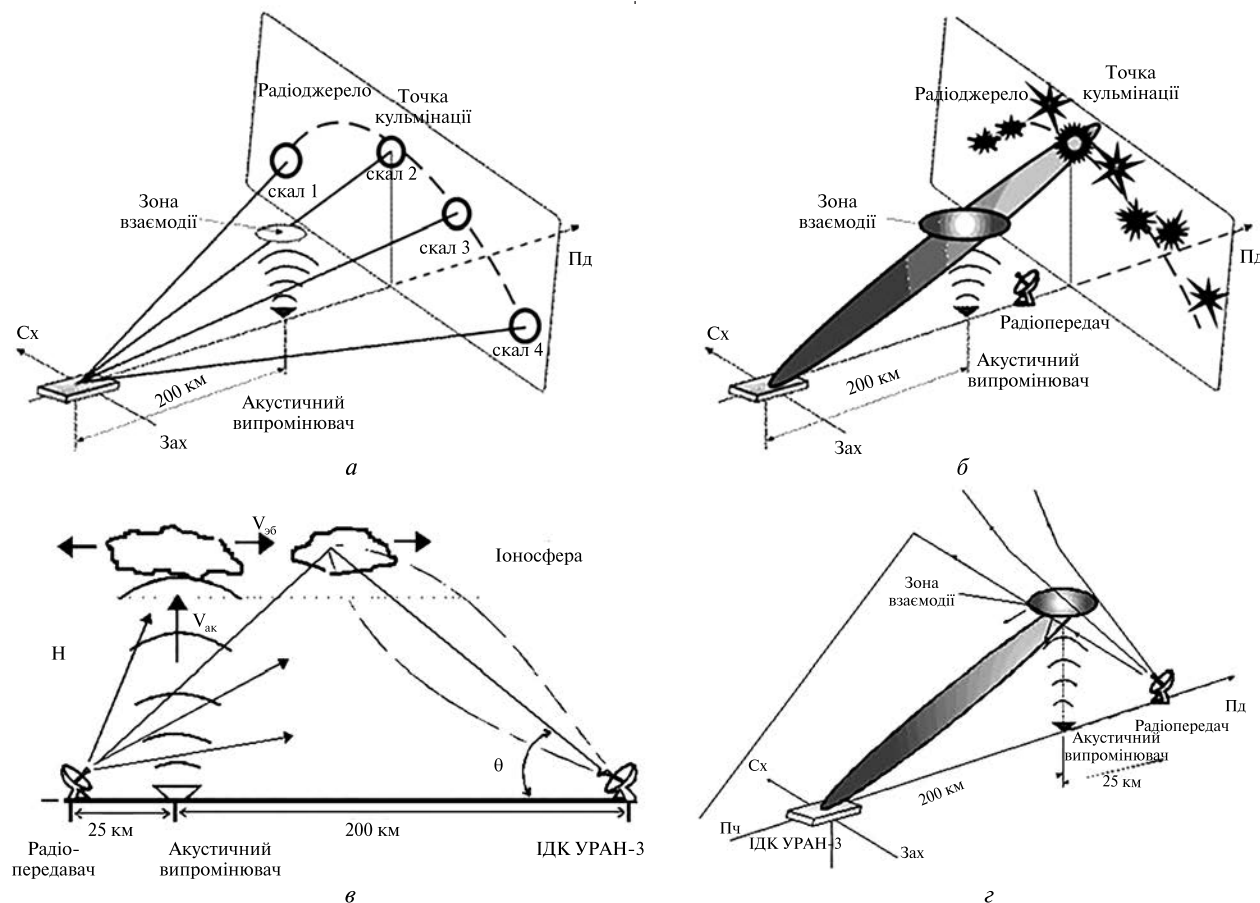


Рис. 5. Схеми експериментів із дослідження ефектів штучної акустичної модифікації середовища навколоземного простору з використанням іоносферно-діагностичного комплексу УРАН-3 (Шацьк) і стаціонарного акустичного випромінювача (Львів) радіоастрономічним методом (а, б), методом слабонахиленого зондування іоносфери (в), методом розсіювання радіохвиль на дрібномасштабних неоднорідностях іоносфери (г)

взаємодії ААХ, генерованих НК АВ, з навколоземним середовищем на різних висотах відрізняються. Тому прояви акустико-електромагнітної взаємодії у різних компонентах цього середовища, фізичні моделі, які їх описують, та фізичні механізми, за допомогою яких літосферно-іоносферні зв'язки реально реалізуються, теж можуть бути різними. У роботі [78] зауважено, що «неможливо виокремити лише одну модель і відкинути інші моделі, оскільки характерні просторові масштаби ефектів, що спостерігаються в іоносфері до землетрусів, коливаються від 200 до 300 км до декількох тисяч кілометрів, а характерні часи змінюються від декількох хвилин до декількох днів». Наприклад, в літературних

джерелах запропоновано і аналізуються моделі: збудження геоелектричного контуру «поверхня Землі — атмосфера — іоносфера» на малих висотах $H = 0...10$ км в діапазоні частот від сотен герц до десятків мегагерц [78]; свічення в інфрачервоному діапазоні за рахунок хімічних реакцій руйнування озону на висотах 20...30 км [20]; модель Гальперіна — Хаякави, яка передбачає, що коли акустична хвиля доходить до висот $H = 50...60$ км, має місце електропробій проміжку «іоносфера — фронт акустичної хвилі», і внаслідок електричного розряду з'являються електромагнітні відгуки у широкому діапазоні частот, які можна реєструвати як в іоносфері, так і на поверхні Землі [15, 65, 66] тощо.

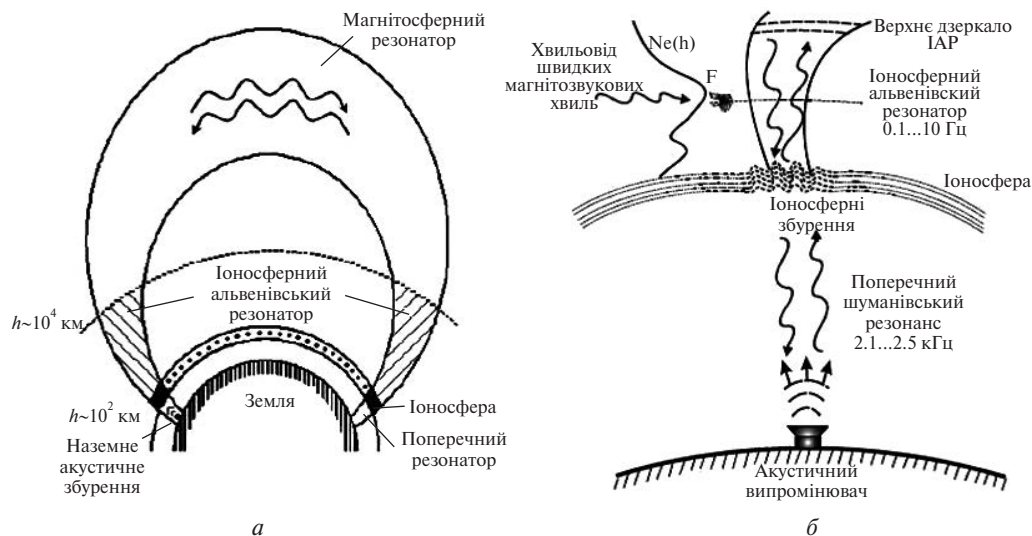


Рис. 6. Можливі резонансні структури в системі «атмосфера — магнітосфера»: а — іоносферний альвенівський резонатор, б — поперечний шуманівський резонатор

За результатами наземних і супутникових спостережень впродовж 1996–2018 рр. реакцій різних шарів навколоземного простору на дію акустичного збудження невибухового характеру, генерованого з допомогою НК АВ, можна зробити такі висновки.

1. Спостерігаються практично всі ефекти, зареєстровані під час вибухових досліджень [11–16, 19, 65, 66, 77, 87, 94]: акустико-магнітні, акустико-електричні, вплив на радіохвилі в ультрависокочастотному (УВЧ), високочастотному (ВЧ) і ДНЧ-діапазонах, вплив на прозорість іоносфери в УВЧ- і ВЧ-радіодіапазонах [70–72, 74], акустико-оптичні, збурення концентрації електронів іоносферної плазми.

2. Найбільш чутливими до впливу акустичних збурень виявилися просторово-резонансні структури, які формуються завдяки просторовій неоднорідності властивостей навколоземного середовища, і взаємодія ААХ з якими локалізує вплив на нього акустичного збурення (рис. 6): поперечний шуманівський резонатор («поверхня Землі — атмосфера — іоносфера»), іоносферний альвенівський резонатор («іоносфера — область різкої зміни швидкості альвенівських хвиль»), магнітосферний альвенівський резонатор, утворений нижньою межею іоносфери у спряжених областях магнітної силової трубки.

3. Є ефекти, які не спостерігались (або рідко спостерігались) під час експериментів з вибухами. Деякі приклади відповідних експериментальних записів наведено на рис. 7 [6]: збільшення кількості свистових атмосфериків — періодичних і випадкових послідовностей імпульсів свистових випромінювань, які під час вибухів не виявлялися (рис. 7, в); переміщення іоносферних шарів E , F_1 , F_2 за рахунок впливу акустичних збурень (рис. 7, д, е); підвищення індекса прозорості для електромагнітних хвиль, які поширюються крізь рухоми акустично збурену періодичну структуру в іоносфері, що багатократно спостерігали (з 1997 р.) в експериментах ФМІ — ЛЦ ІКД [11–15, 70–72, 74] та формування періодичних резонансних структур у діапазоні 1...40 Гц, які спостерігали у спільних (Франція — ЛЦ ІКД) експериментах із супутником DEMETER під час підвищеної сейсмічної активності [8, 9, 82, 94]; зміна рівня космічного шуму до та після дії акустичного збурення (рис. 7, б); локальні зміни природного геліобумовленого інфразвуку; локальні зміни опадів і вітру; варіації параметрів геомагнітного поля внаслідок появи струмів, що створюють магнітні пульсації (рис. 7, г).

Моделі акустико-електромагнітної взаємодії. Модель зміни прозорості іоносфери для космічного радіовипромінювання під впливом низь-

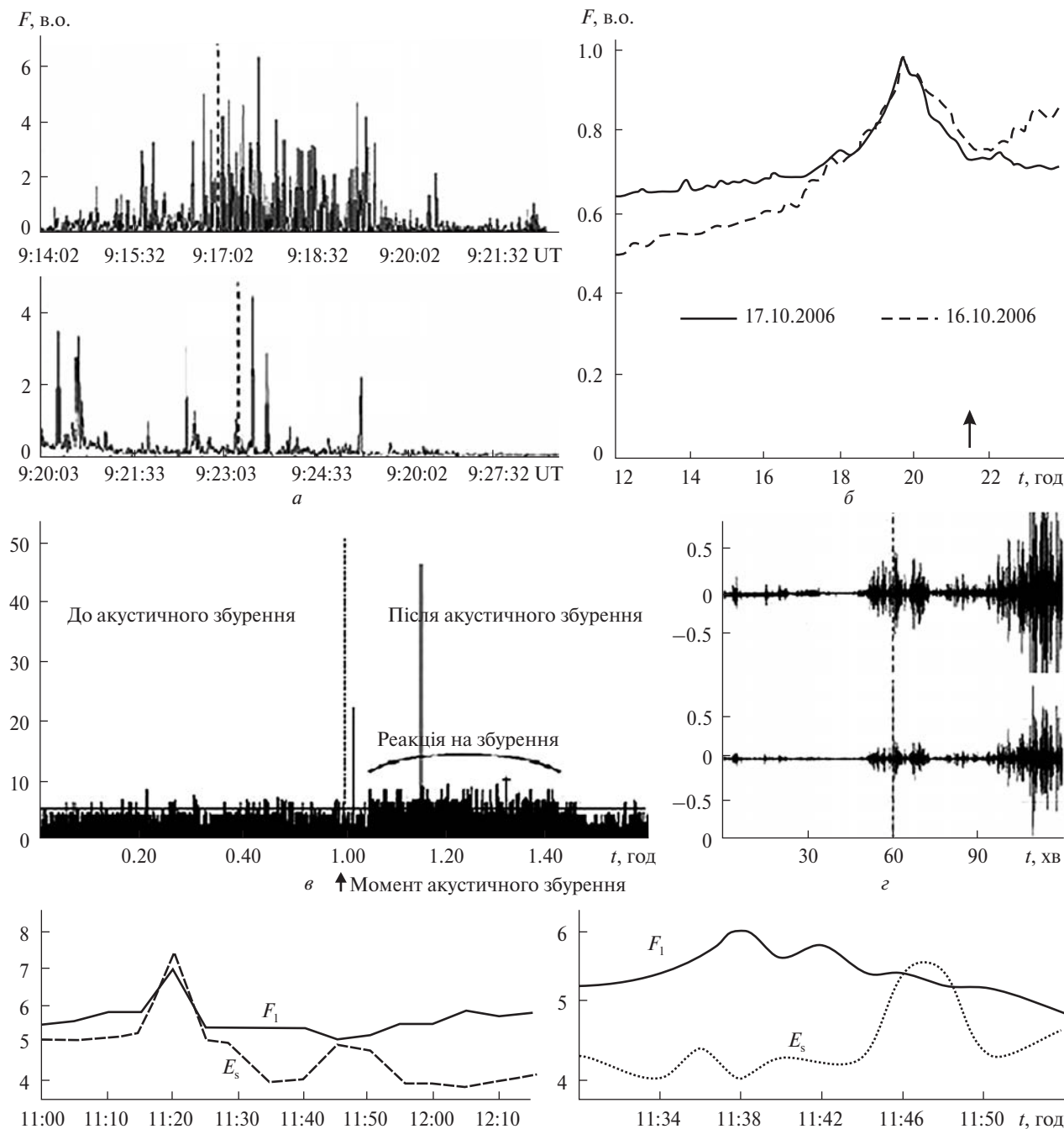


Рис. 7. Зміни параметрів сигналів, зареєстрованих супутником DEMETER (Франція) до, під час, після і без акустичного збудження (вертикальними штриховими лініями або стрілками позначено час початку збудження): *a* — сигнали навігаційної радіостанції на борту супутника DEMETER (вгорі — під час збудження, внизу — без збудження), *б* — рівень космічного шуму до і після, *в* — густина віслерів до (зліва) і після (справа), *г* — варіації геомагнітного поля до і після, *д* — динаміка зміни шарів F_1 та E_s 06.05.2006 р. після збудження в 11:12, *е* — динаміка зміни стану шарів F_1 та E_s 10.05.2006 р. після збудження в 11:35

кочастотної (НЧ) ААХ досліджено у спільних експериментах ФМІ — ЛЦ ІКД [11—15, 70—72, 74]. При цьому допускали, що ААХ, які досягають іоносфери, повинні мати частоти в діапазоні одиниць герц, оскільки більш високочастотні складові швидко розсіюються в навколоземному середовищі. У конструкціях НКВ, розроблених в ЛЦ ІКД, цю складність подолано за рахунок використання параметричного ефекту. Останній проявляється при одночасній роботі двох потужних акустичних генераторів, які випромінюють дві близькі частоти, формуючи в дальній зоні інфразвукову хвилю на різницевій частоті.

В роботах [70—72, 74] розглянуто різні аспекти моделі акустико-електромагнітної взаємодії космічного радіовипромінювання із іоносферними неоднорідностями у вигляді періодичної структури концентрації електронів і можливості її використання для інтерпретації експериментів. Це відповідало умовам проведення експериментів радіоастрономічним методом зондування іоносфери. При цьому автори роботи [74] вважають, що внаслідок впливу ААХ в іоносфері формується рухома неоднорідність у вигляді періодичної структури концентрації електронів із періодом, що дорівнює довжині ААХ $\Lambda = v_s / f_s$, де v_s — швидкість звуку. У випадку моделювання іоносфери півнескінченною плазмою коефіцієнт проходження радіохвиль крізь цю неоднорідність описується виразом, який демонструє резонансний характер взаємодії. Для космічного радіовипромінювання з довжиною хвилі $\lambda = c/f$ (c і f — швидкість і частота радіохвиль) при $\lambda = \Lambda/n$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (умова резонансу) коефіцієнт проходження швидко збільшується в діапазоні $\lambda = 10 \dots 100$ м, що демонструє можливість багатократного збільшення прозорості іоносфери, якщо Λ дорівнює цілому числу довжин радіохвиль.

У цих же роботах значну увагу приділено моделям, які описують трансформацію ААХ, генерованих на поверхні Землі, при їхньому поширенні у стратифікованому середовищі навколоземного простору. Так, у роботі [72] шляхом математичного моделювання на основі рівняння теорії пружності проаналізовано нелінійний механізм перетворення сейсмічних НЧ-хвиль в наднизь-

кочастотні ААХ (УНЧ). При аналізі враховано, що спектр сейсмічних хвиль, спричинений землетрусом, широкий, але до іоносфери доходять лише акустичні хвилі наднизької частоти. Моделювання показало, що у процесі літосферно-іоносферної взаємодії мають місце два послідовних процеси, а саме — нелінійна взаємодія двох атмосферних ААХ низької частоти та відповідна трансформація цих хвиль у хвилі УНЧ на частоті перенесення. Вищезначена модель нелінійного механізму перетікання енергії з літосфери в іоносферу додатково демонструє важливість акустичного каналу передачі енергії від літосфери до іоносфери під час сейсмічної активності.

У роботі [86] в рамках підготовки до активного експерименту з потужним наземним монохроматичним випромінювачем на модельному рівні досліджувалось явище модифікації іоносферної плазми інфразвуковими хвилями і теоретично вивчалась можливість збурення іоносфери акустичною хвилею на частоті 20 Гц і менше. Показано, що для того, щоб можна було спричинити акустико-іоносферні збурення в цьому випадку, потужність акустичного випромінювача повинна бути не меншою, ніж 10...100 кВт. Теоретичні моделі та чисельні розрахунки при цьому враховували реальну залежність температури від висоти, а модуляцію концентрації електронів на $H \approx 100$ км визначали з умови, що плазма є невеликою пасивною домішкою.

У роботі [70] розглянуто можливість збільшення прозорості атмосфери для космічного радіовипромінювання, зумовлену зменшенням концентрації електронів F -області іоносфери під дією акустичної хвилі УНЧ. Представлено також результати моделювання нелінійного частотного перетворення акустичних хвиль надзвичайно низької частоти (ННЧ) в акустичні хвилі УНЧ. При цьому моделювалося поширення збуджених УНЧ-хвиль у неізотермічній іоносфері та враховано підвищення прозорості іоносферної F -області для космічних радіохвиль за рахунок модуляції концентрації електронів у плазмі. Автори підкреслили, що це явище відбувається одночасно зі збільшенням прозорості, спричиненим періодичною структурою акустичних ННЧ-хвиль в E -шарі іоносфери, і що обидва явища були підтверджені

експериментально раніше. Аналогічні висновки були зроблені в одній із останніх робіт цих же авторів [71], присвяченій цій проблемі, в якій стверджується, що генерування різних типів хвиль в атмосфері та іоносфері, спричинене сейсмічними діями та виверженням вулканів, змінює прозорість для космічних радіохвиль. Проаналізовано дві вищезгаданих моделі акустико-електромагнітної взаємодії. У першій ААХ стимулює утворення в іоносфері періодичної структури концентрації електронів, що зумовлює резонансне проходження радіохвиль, коли довжина акустичної хвилі дорівнює одній або кільком довжинам радіохвилі. У другій — ААХ стимулює зниження концентрації електронів у F -області іоносфери, що призводить до збільшення прозорості іоносфери для космічних радіохвиль.

У роботі [75] розглянуто проблему генерації квазіперіодичних інфразвукових хвиль і оцінено їхній вплив на процес утворення акустико-іоносферних збурень концентрації електронів в іоносфері та на появу доплерівського зсуву частоти. Основну увагу у цій роботі було зосереджено на оцінюванні та порівнянні спектрів інфразвуку, випроміненого генераторами параметричного та пістонного типів, під час його поширення від поверхні Землі до іоносферних висот з урахуванням розбіжності хвильового фронту, нелінійних властивостей атмосфери та поглинання, а також на визначенні параметрів іоносферних збурень під дією інфразвуку.

У роботі [87] описано удосконалену модель поширення до іоносферних висот ААХ, згенерованих НК АВ параметричного типу, аналогічному розробленому в ЛЦ ІКД. Останній випромінює початкові основні частоти $f_1 = 600$ Гц і $f_2 = 625$ Гц з великими амплітудами ($100 \dots 420$ мс⁻¹) і частотною модуляцією частотою 0.016 Гц кожної хвилі. Щоб забезпечити необхідні умови для вертикального поширення ААХ та їхнього проникнення на висоту іоносфери, у моделі покладено двоступеневе сильно нелінійне перетворення основних ААХ в акустичну хвилю з різницевою частотою $\Delta f = f_2 - f_1$ в діапазоні висот $H = 0 \dots 100$ м і трансформація акустичної хвилі різницевої частоти при її поширенні в межах висот $H = 0.1 \dots 20$ км в акустичну гравіта-

ційну хвилю (АГХ) з частотною модуляцією, яка практично досягає висот іоносферних областей E та F . Новизна запропонованої аналітично-чисельної моделі пояснюється тим, що вона одночасно враховує нелінійність, дифракцію, втрати, дисперсію та наявність вищезначеного двоступеневого перетворення початкових ААХ в акустичну хвилю з різницевою частотою. Автори вважають, що сформовані АГХ можуть підвищити прозорість іоносфери для електромагнітних хвиль у діапазонах ВЧ (МГц) та ДНЧ (кГц). Ці результати є принципово важливими для моделювання впливу високоенергетичного випромінювання НК АВ на іоносферу. Розроблена у даній роботі теоретична модель використана для інтерпретації активних експериментів, які включали оцінку впливу енергетики НК АВ на систему «атмосфера — іоносфера», вимірювання електромагнітних та акустичних полів, дослідження змін іоносферної прозорості для радіовипромінювань від галактичних радіоджерел, оптичні вимірювання та оцінку впливу на атмосферні аерозолі. У цій же роботі показано відповідність отриманих теоретичних результатів щодо доплерівського зсуву частоти радіохвиль, які взаємодіють із штучними АІЗ, стимульованими дією НК АВ на іоносферу, та експериментальних результатів, отриманих раніше у роботах [7, 8, 9, 11—16, 19, 21, 74, 82, 92]. Запропонований підхід дозволяє краще зрозуміти механізм акустичного каналу сейсмо-іоносферного зв'язку.

У роботі [90] проаналізовано оригінальну модель поширення атмосферних хвиль із поверхні Землі з урахуванням реалістичного висотного температурного профілю в атмосфері. В рамках лінеаризованого рівняння теоретично досліджено формування вузької області з підвищеним тиском в резонансній області, де швидкість горизонтальної фази хвилі дорівнює швидкості звуку. Чисельне моделювання різних моделей профілів атмосферної температури та в'язкості підтвердили аналітичний результат для конкретних властивостей хвильових полів, зокрема формування вузької області з неоднорідностями плазми в областях D і E нижньої іоносфери, створених сингулярністю акусто-гравітаційних хвиль.

Модель впливу акустичних збурень, яка описує переміщення іоносферних шарів E , F_1 , F_2 , досліджували у спільних експериментах ЛЦ ІКД, Інституту іоносфери НАН та МОН України та ХНУ ім. В. Н. Каразіна методом вертикального зондування іоносфери з використанням автоматичної іоносферної станції «Базис» на основі вимірювання критичної частоти та динаміки її зміни. Незважаючи на те що енергетика НК АВ недостатня для створення суттєвих змін у таких глобальних структурах, як шари E , F_1 , F_2 , у ряді експериментів спостерігались певні зміни у структурі шарів нижньої іоносфери [6]. Наприклад, після включення НК АВ 6 травня 2006 р. о 11:12 різко збільшився ступінь розвитку шару F_1 , який о 11:20 (через 8 хв) досяг максимуму (рис. 7, d , e — по осі X відкладено час, а по осі Y — відносні значення критичної частоти для шарів E , E_s , F_2 і ступінь іонізації для F_1). Видно, що після дії акустичного збудження розрив між висотно-частотними характеристиками шарів F_1 і F_2 зріс і досяг максимуму в 11:20. Це свідчить про утворення міжшарової впадини $F_1 - F_2$. З 11:25 цей розрив і, відповідно, розрив міжшарової впадини $F_1 - F_2$ поступово зникає. В цей же день при повторному включенні НК АВ о 14:30 спостерігали протилежний ефект. Розрив між висотно-частотними характеристиками шарів $F_1 - F_2$ змінюється і почав зменшуватись (рис. 7, e). О 14:44 він досягнув мінімуму, та після 14:45 почав повертатися до попереднього значення. Відзначимо, що в цих експериментах протилежно змінювалися і варіації геомагнітного поля в діапазоні 1...40 Гц (рис. 7, z). В 11:12 включення НК АВ призвело до різкого зростання цих варіацій, а в 14:30 — до різкого падіння. Пояснення цього ефекту поки що немає.

Методологія і обладнання для дослідження процесів штучної акустичної модифікації іоносфери. Запропонована методологія ґрунтується в основному на можливостях наявних у ФМІ та ЛЦ ІКД інструментальних засобів. Вона передбачає використання різних методик і обладнання для реалізації акусто-електромагнітного зондування іоносфери, розроблення інформаційних технологій ідентифікації АІЗ та інтерпретації можли-

вих фізичних механізмів акустико-іоносферної та акустико-електромагнітної взаємодії.

Стационарний НК АВ, в якому використано ефекти параметричної взаємодії, модуляції надзвукового потоку повітря та формування періодичної послідовності ударних хвиль, забезпечує такі параметри генерації: потужність електроприводу $P_e \approx 150$ кВт; випромінена акустична енергія 1.8 МДж (при роботі НК АВ впродовж 60 с); основні частоти випромінювання — 100 Гц і 110 Гц або 600 і 630 Гц; різницева частота $f_p = 1...10$ Гц або $f_p \approx 30$ Гц; тиск ААХ на відстані 1 м — 165 дБ; спектр поля на зрізі рупорів — лінійчатий дискретний; маса — 2 т; габарити — $2.5 \times 1.5 \times 1.5$ м³.

РТ УРАН-3, основні параметри якого: декаметровий діапазон радіохвиль 4...30 МГц; антена містить 256 вібраторів з двома поляризаціями; площа антени становить 14400 м², а ефективна площа — 4320 м² на частоті $f = 25$ МГц та 5760 м² на частоті $f = 16.7$ МГц; коефіцієнт корисної дії приблизно дорівнює 0.3 на $f = 25$ МГц і 0.4 — на $f = 16.7$ МГц; кути променя діаграми спрямованості складають $3.5^\circ \times 15^\circ$ відповідно в напрямках Сх-Зх і Пн-Пд, сканування діаграмою спрямованості по схиленню і азимуту; можливість електричного керування відхиленням від зеніту $\chi \approx \pm 70^\circ$, де χ — часовий кут схилення; чутливість складає $I \approx 50$ Ян · Вт/(м² · Гц) на $f = 25$ МГц у частотній смузі $\Delta f = 14$ кГц; похибка вимірювання потоку $\delta_1 \approx 15\%$ при відношенні сигнал/шум = 1:10; канали прийому, реєстрації і обробки прийнятих сигналів — два радіоінтерферометричних і два радіометричних, калібрування, комп'ютерної обробки, відображення; реєстровані параметри — потужності сигналів P_A і P_B кожної поляризації, модуль взаємно кореляційної функції $|r_{12B}(t)_{s,c}|$ сигналів кожної половини антени, амплітуда замирань A і доплерівський зсув частоти F_D сигналів. Для проведення експериментів на базі радіотелескопа УРАН-3 створено ряд радіофізичних засобів [73]: іоносферно-діагностичний комплекс, мініінтерферометр із базою $D = 100$ м, короткобазовий радіоінтерферометр на шасі автомобіля ЗІЛ-151 зі змінною базою $D = 0...40$ км, в якому використано розбірну 16-елементну антену і блок ретрансляції сигналів.

Методи дистанційного зондування іоносфери, які були застосовані для дослідження процесів штучної АМІ з використанням НК АВ (рис. 5): а) радіоастрономічний, в якому використовується радіовипромінювання дискретних космічних джерел і галактичного тла), б) слабонахилого радіозондування іоносфери, в) об'ємного розсіювання радіохвиль на дрібномасштабних неоднорідностях іоносфери.

Методологія зондування враховує:

а) прогнозовану відносно низьку енергетику відгуку іоносфери на дію акустичного збудження, генерованого НК АВ, і очікувані низькі рівні значення відношення *сигнал / завада*;

б) інформаційні особливості іоносферних сигналів, сформованих в результаті проявів акусто-електромагнітної взаємодії в іоносфері: *трансмійного* у радіоастрономічному методі, *відбитого* у методі слабонахилого зондування, *розсіяного* у методі об'ємного розсіювання;

в) необхідність використання різних радіофізичних методів діагностики АІЗ завдяки різноманітності проявів акусто-електромагнітної взаємодії;

г) необхідність застосування декількох режимів роботи НК АВ — однократного, багатократного (рівномірного або нерівномірного), одночастотного, з регульованою різницевою частотою, тощо.

Запропоновано методики дослідження процесів штучної АМІ.

1. Методики № 1 (рис. 5, а) і № 2 (рис. 5, б), в яких використано радіоастрономічний метод і радіовипромінювання дискретних космічних радіоджерел — 3С10, 3С84, 3С123, 3С134, 3С144, 3С218 та інших, ефект радіомерехтінь, технологію оцінювання статистичних характеристик інтенсивності, поляризаційну вибірковість.

2. Методика № 3 (рис. 5, б), в якій використано радіоастрономічний метод, радіовипромінювання дискретних космічних радіоджерел та галактичного тла, радіоінтерферометричні вимірювання з допомогою мініінтерферометра.

3. Методика № 4 (рис. 5, в), в якій використано метод слабонахилого зондування, іоносферно-діагностичний комплекс УРАН-3, КХ-радіостанції, реєстрацію рухомих іоно-

сферних збурень на односкачковій трасі «КХ-радіостанція — радіоінтерферометр УРАН-3» та визначення їхніх параметрів на основі даних про флуктуації траєкторних параметрів дзеркально відбитих іоносферних сигналів, зокрема кута приходу та доплерівського зсуву частоти.

4. Методика № 5 (рис. 5, г), в якій використано метод об'ємного розсіювання, КХ-радіостанції, дві половини антени радіотелескопа УРАН-3 по двох поляризаціях, вимірювання амплітудно-поляризаційно-часових залежностей рухомих іоносферних збурень на робочих частотах $f_p > f_{M3CF2}$, де f_{M3CF2} — максимально застосовна частота.

Аналіз результатів досліджень явища штучної АМІ, виконаних на основі згаданих вище методик дистанційного зондування іоносфери та наземного і космічного обладнання, дозволив зробити такі висновки.

1. Вперше експериментально підтверджено достатність енергетики випромінювача типу НК АВ, створеного ЛЦ ІКД, для реалізації штучної, керованої з поверхні Землі, акустичної модифікації різних шарів навколоземного середовища, зокрема й іоносфери.

2. Одержано якісні та кількісні оцінки інформаційних характеристик іоносферних радіосигналів, придатні для застосування інформаційних технологій виявлення й ідентифікації АІЗ наземного акустичного походження.

3. У більшості наземних експериментів наявні реакції іоносфери на дію акустичного збудження з характерними часами затримки $T_s \approx 5, 20, 40$ хв.

4. Супутникові спостереження підтвердили адекватність моделі модуляції прозорості іоносфери для радіовипромінювання ДНЧ-діапазону, а також гіпотези про подібність реакцій іоносфери на акустичні збудження сейсмічного та штучного походжень.

5. За результатами аналізу поширення акустичних хвиль у системі «Земля — атмосфера — іоносфера» та частотних характеристик хвильових процесів в іоносфері встановлено, що для частот $f_s \approx 30$ Гц адекватними є моделі збурення іоносферного альвенівського резонатора та модуляції прозорості іоносфери, зокрема і для

ДНЧ-радіодіапазону, а для частот $f < 10$ Гц — модель збурення E - і F -шарів.

6. В експериментах із застосуванням радіоастрономічного методу при дії штучного акустичного збудження та реєстрації *трансмісійних* іоносферних сигналів встановлено:

а) перша реакція іоносфери реєструється через $\tau_3 \approx 5...6$ хв після початку акустичного збудження на поверхні Землі, що із врахуванням середньої швидкості висотного поширення ААХ відповідає часові її поширення до іоносферних висот; перша реакція супроводжується розширенням спектру сигналу, а опис її моделі відповідає зміні прозорості іоносфери для космічних радіохвиль при вертикальному поширенні ААХ крізь іоносферу;

б) повторні реакції іоносфери із затримками $\tau_3 \approx 10, 20, 30, 40$ і 60 хв після початку акустичного збудження на поверхні Землі теж мають розширений частотний спектр і вищі амплітуди, що відповідає процесу поширення різних типів акустико-плазмових хвиль в іоносфері з різними швидкостями, причому найбільш стабільна та інтенсивна реакція має затримку $\tau_3 \approx 40$ хв;

в) для виявлення АІЗ рекомендовано такі інформаційні параметри радіосигналів, зареєстрованих при скануванні космічних радіоджерел: часові співвідношення між іоносферними збуреннями, гранична частота $F_{\text{гп}}$ розширення частотного спектру, залежності відносного зсуву фаз на фіксованому відрізку часу.

7. В експериментах із застосуванням методу слабонахиленого зондування при дії штучного акустичного збудження та реєстрації *відбитих* іоносферних сигналів встановлено:

а) збільшення амплітуди сигналів із затримкою $\tau_3 = 11...13$ хв після початку акустичного збудження на поверхні Землі;

б) зміну форми автокореляційної функції (АКФ) сигналів тривалістю 1 хв, а саме — при відсутності акустичного збудження вигляд АКФ є плавно загасаючим, а при його наявності — коливний і швидко загасаючий;

в) зміни в доплерограмах сигналів, зокрема з затримкою $\tau_3 \approx 32$ хв після початку акустичного збудження, що полягають у коливанні параметрів доплерівського зсуву частоти сигналу

з наростаючою амплітудою в діапазоні частот $f_d = 0.5...1.0$ Гц і періодів $T_d = 15...16$ хв;

г) появу двомодовості у відбитих сигналах із рознесенням мод у межах $0.2...0.4$ Гц;

д) вірогідну модель для опису процесу акустико-електромагнітної взаємодії — коливання E - і F -шарів іоносфери, обумовлені дією НЧ ААХ;

е) кореляцію дисперсії флуктуацій кута нахилу еліпса поляризації відбитого сигналу з початком акустичного збудження, причому акустично модифікованій іоносфері відповідає зменшення флуктуацій кута нахилу еліпса;

ж) інформаційні параметри відбитих від іоносфери радіосигналів КХ-радіостанцій, рекомендовані для виявлення АІЗ: крутизна спадання та періоди коливань нормованих АКФ короткотривалих реалізацій сигналів тривалістю порядку 1 хв, час появи, період, кількість та інтенсивність мод коливань на доплерограмах, дисперсія флуктуацій еліпса поляризації сигналу та параметри її часових змін.

8. В експериментах із застосуванням методу слабонахиленого зондування при дії штучного акустичного збудження та реєстрації *розсіяних* іоносферних сигналів встановлено:

а) кореляцію змін амплітуди сигналу з початком акустичного збудження;

б) прояв першої реакції із затримкою $\tau_3 \approx 7$ хв у вигляді незначного короткотривалого підвищення амплітуди (приблизно удвічі за $10...15$ хв);

в) значне (у $5...6$ разів) довготривале ($\tau \approx 1$ год) підвищення амплітуди сигналу з затримкою $\tau_3 \approx 25$ хв і її коливання з періодом $10...12$ хв;

г) закономірності флуктуацій параметрів сигналу (амплітуди, періоду) у збуреному стані іоносфери, коли його амплітуда зростає, та незбуреному; це відповідає моделі акустико-іоносферної взаємодії у вигляді зміни просторового розподілу дрібномасштабних неоднорідностей, кількість яких у збуреному акустикою стані збільшується, що призводить до підвищення вкладу ревербераційних процесів в іоносфері та відповідного зростання амплітуди флуктуацій розсіяного сигналу;

д) зміни в доплерівських спектрах сигналу, які свідчать про наявність вертикальної динаміки створених АІЗ із швидкостями переміщення

$\nu_{AI3} \approx \nu_s$; про це свідчать такі ефекти: розширення спектру приблизно на 1 Гц; поява доплерівського зсуву частоти до 7 Гц тривалістю менше 1 хв із затримкою $\tau_3 \approx 7$ хв; поява двомодовості сигналу; поява коливань доплерівського зсуву з амплітудою менше 1 Гц і періодами 10...11 хв і 22...24 хв на тих ділянках доплерограм, які збігаються з підвищенням амплітуди сигналу; періодичне (з періодом приблизно 35 хв) розширення областей доплерівського зсуву на 7 Гц в координатах «час — амплітуда», що можна описати такою моделлю — НЧ-ААХ поширюється в атмосфері, і на 7-й хвилині проходить через досліджувану розсіювальну область іоносфери, короткочасно стимулюючи організоване вертикальне переміщення дрібномасштабних неоднорідностей; у подальші відрізки часу внаслідок отримання коливного імпульсу певного типу ці неоднорідності перебудовуються, утворюючи більш крупні області та генеруючи різні типи плазмових хвиль; останні у процесі руху в іоносферному каналі з урахуванням впливу геомагнітного поля спричиняють коливний в часі ефект розсіювання, спрямований в напрямку приймальної антени;

е) інформаційними характеристиками розсіяних сигналів КХ-радіостанцій, рекомендованими для виявлення АІЗ, є параметри часових залежностей потужності сигналу (середній рівень на проміжку тривалістю 1 хв; рівень флуктуацій; періоди коливань середнього рівня; доплерівський зсув на 5...10 Гц, що відповідає швидкостям переміщення $\nu_{дін} \approx \nu_s$ дрібномасштабних іоносферних неоднорідностей), а також наявність коливань і параметри доплерограм розсіяного сигналу (час появи, період, кількість та інтенсивність мод, доплерівський зсув частоти).

9. Високі чутливість і завадостійкість, широка функціональність радіофізичних комплексів на базі радіотелескопа УРАН-3, а також можливість реалізації різних методик зондування іоносфери дозволяють розв'язувати задачі дистанційного виявлення та діагностики енергетично слабких АІЗ, стимульованих впливом хвиль, генерованих НК АВ.

Сформульовані висновки є результатом попереднього вивчення проблеми штучної АМІ на

основі використання НК АВ і аналізу параметрів інфразвукових хвиль, генерованих випадковими природними та рукотворними джерелами. Ця робота реалізується в рамках Цільової програми НАН України з космічних досліджень на період 2018—2022 рр. і передбачає: удосконалення наявної наземної низькочастотної акустичної та радіоастрономічної інфраструктури з метою створення комплексу акусто-електромагнітного зондування іоносфери у сейсмічно небезпечному Прикарпатському регіоні; оптимізацію застосованих технологій отримання й обробки даних; проведення довготривалих серій активних експериментів з використанням удосконаленого НК АВ у різних режимах і частотних діапазонах генерації інфразвуку для отримання статистично стійких оцінок іоносферних сигналів і перевірки різних моделей акустико-іоносферної взаємодії; узагальнення результатів досліджень з проблеми штучної акустичної модифікації іоносфери.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПРОБАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНОГО КОМПЛЕКСУ

Радіоастрономічна інфраструктура. Удосконалення комплексу стосувалося системи реєстрації та накопичення даних радіотелескопа УРАН-3 в частині розширення частотної смуги пропускання, підвищення чутливості й оптимізації форми подання й обробки даних. У даний час система дозволяє реєструвати космічне радіовипромінювання у вигляді динамічних частотних спектрів декаметрової складової в діапазоні 16.5...33 МГц з частотним розділенням $\Delta f = 12$ кГц і часовим розділенням $\Delta t = 1$ мс...1 хв.

Одним із основних компонентів удосконаленого комплексу є широкосмугова цифрова система реєстрації. На відміну від попередніх досліджень в даний час вона складається з двох таких модулів.

1. Модуль аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), який забезпечує високі параметри перетворення, швидку адаптацію аналогової вхідної частини до розширеного частотного діапазону вхідного сигналу шириною 1...60 МГц, а також суттєве зниження рівня внутрішніх шумів.

2. Модуль цифрової обробки сигналів ADP64Z2PCI з регульованими параметрами: два

канали АЦП, 16 біт із частотою оцифрування до 130 МГц, смуга аналізу до 66 МГц (відношення *сигнал / завада* перевищує 72 дБ, динамічний діапазон, вільний від паразитних складових, — понад 100 дБ, шумовий поріг дорівнює 115 дБ); вибір частотного діапазону здійснюється від власного стабільного кварцового генератора ($f = 66$ МГц) або від зовнішнього генератора ($f = 10 \dots 130$ МГц); число вихідних спектральних каналів дорівнює 8192; часове вікно Ханна обирається за замовчуванням; перекриття сигналу в часовій області складає 8192 відліків; внутрішнє ядро комплексного швидкого перетворення Фур'є містить 16384 точок, розрядність обчислень — 28; кількість накопичень спектрів потужності — $1 \dots 1024$; розрядність накопичувача спектрів — 60 біт; вихідна розрядність спектральних даних — 32 біт; формат вихідних даних для спектрів — 32-бітове беззнакове ціле або 25-бітова мантиса, 5-бітова експонента; максимальний неперервний вихідний потік даних дорівнює 240 Мбайт/с (частота оцифрування 66 МГц); передавання даних у персональний комп'ютер здійснюється по інтерфейсу PCI-X (підтримка специфікацій 32/33, 32/66, 64/66); запис «сирих» даних відбувається з виходу АЦП (швидкість передачі з можливістю запису на жорсткий диск (*RAID 0*) — до 240 МБ/с); швидкість запису даних у пакетному режимі передачі — до 260 МБ/с; відображення спектрограм організовано у реальному часі.

Акустичну інфраструктуру комплексу в експериментах, проведених впродовж 2018 р., представляв варіант стаціонарного ВЧ НК АВ [11, 12, 14, 15] після часткової модернізації та відновлення працездатності його механічних блоків (заміна роторів, приведення в робочий стан ремінної передачі та системи подачі мастила). Він забезпечував генерацію хвиль з частотою $f_s \approx 30$ Гц.

Експериментальна апробація комплексу. Для апробації комплексу акустико-електромагнітного зондування іоносфери з 25 до 29 вересня 2018 р. проведено серію з 15 експериментів за схемою рис. 5, а. При цьому враховували поточні погодні умови, оскільки останні можуть суттєво впливати на поширення ААХ на частотах, близьких до $f_s \approx 30$ Гц, (значення, яке незначно перевищує верхню межу інфразвукового діапазону).

Мета експериментів — оцінити можливість керованого створення та виявлення слабких АІЗ.

Дослідження штучних АІЗ проведено радіоастрономічним методом з використанням зондувального космічного радіовипромінювання ряду дискретних джерел та галактичного тла у смузі 20...25 МГц. Часові реалізації сигналів від радіохвиль, що пройшли крізь іоносферу, аналізували перед, під час та після роботи НК АВ, а також без акустичного збудження при фіксованих положеннях діаграми спрямованості радіотелескопа УРАН-3. Геометрію вибрано так, щоб радіовипромінювання могло взаємодіяти з акустичною хвилею на висотах іоносфери $H = 50 \dots 200$ км, а його інтенсивність відповідала чутливості радіотелескопа. Цим вимогам задовольняли в цей час радіоджерела 3С274 і 3С348 з параметрами відповідно: кути кульмінації 51° і 44° , густина потоку 5300 і 2300 Ян.

На рис. 8 наведено експериментальні записи (тривалістю 1 год) динамічних частотних спектрів космічного радіовипромінювання джерела 3С348 у смузі 20...25 МГц (рис. 8, а, вгорі) і часового профілю зареєстрованого радіосигналу на частоті $f = 22$ МГц (рис. 8, а, внизу). Експеримент проведено 28.09.2018 р. з 14:40:00 UT до 15:30:00 UT. На рис. 8, а, вгорі, початок роботи НК АВ позначено стрілкою, що відповідає моменту часу 14:42:00 UT (17:42:00 LT) і враховує час кульмінації джерела 14:49 UT. НК АВ генерує в режимі триразового повтору акустичного імпульсу типу «звучання 60 с — пауза 60 с». На рис. 8, б показано аналогічні записи спостережень, проведені 29.09.2018 р. без акустичного випромінювання, коли НК АВ не вмикали. Місцевий час проведення цих спостережень збігається з часом експерименту від 28.09.2018 р., коли НК АВ випромінював. Порівняння часових характеристик режиму НК АВ із часовими профілями та динамічними часовими спектрами пройденого через іоносферу радіовипромінювання (рис. 8) дозволяє стверджувати про появу на записах на 5-6-й хв після початку акустичного збудження ділянки тривалістю 7—10 хв змінної інтенсивності, яка виділена еліпсом.

Із записів часових профілів і динамічних спектрів на частоті $f = 22$ МГц, представлених на

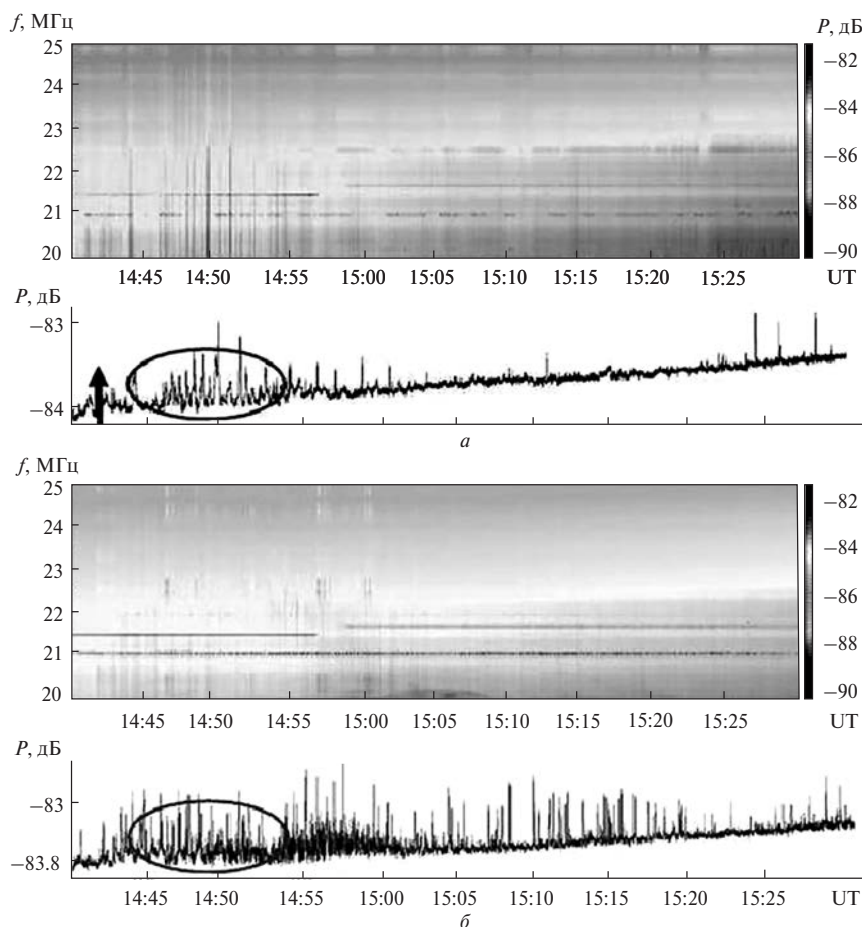


Рис. 8. Динамічні частотні спектри космічного радіовипромінювання (зображення вгорі) і часові профілі (графіки внизу), зареєстровані 28.09.2018 р. на частоті 22 МГц з акустичним збудженням (а) і 29.09.2018 р. без нього (б). Тривалість запису — 1 год. Стрілкою позначено час початку роботи випромінювача. Еліпсом окреслено часову ділянку прояву реакції іоносфери, спричиненої поширенням через неї акустичної хвилі

рис. 8, а, виокремлено і зображено у збільшеному масштабі на рис. 9 виділену еліпсом ділянку. Відносно чіткий прояв коливань на записах від 28 вересня 2018 р. може свідчити про реєстрацію сигналу після проходження радіовипромінювання крізь акустично модифіковану іоносферу. Його ймовірне часове положення оцінено на основі розрахованого середнього значення швидкості v_s поширення акустичної хвилі. На записах від 29 вересня 2018 р. без акустичного збудження на фоні галактичного тла реєстрували шум, який був сильнішим, аніж напередодні з акустичним збудженням. Проте періодичних викидів не зафіксовано, зокрема і у момент кульмінації радіоджерела 3С348 (14:45 UT).

Таким чином, за наведеними вище результатами експрес-аналізу виявлено зміни, зумовлені, ймовірно, процесом АМІ на висотах понад 100 км. Виявлені іоносферні турбуленції можна ідентифікувати як штучні АІЗ, спричинені дією НК АВ, на основі розрахунку часової затримки проходження акустичної хвилі до іоносфери. Цей результат підтверджує можливість застосування моделі резонансного просвітлення іоносфери за рахунок формування рухомої періодичної області концентрації електронів іоносферної плазми з періодом, що дорівнює тривалості ААХ [74]. Згідно з цією моделлю для пройденого крізь іоносферу космічного радіовипромінювання у певних умовах може мати місце резонансне збільшення

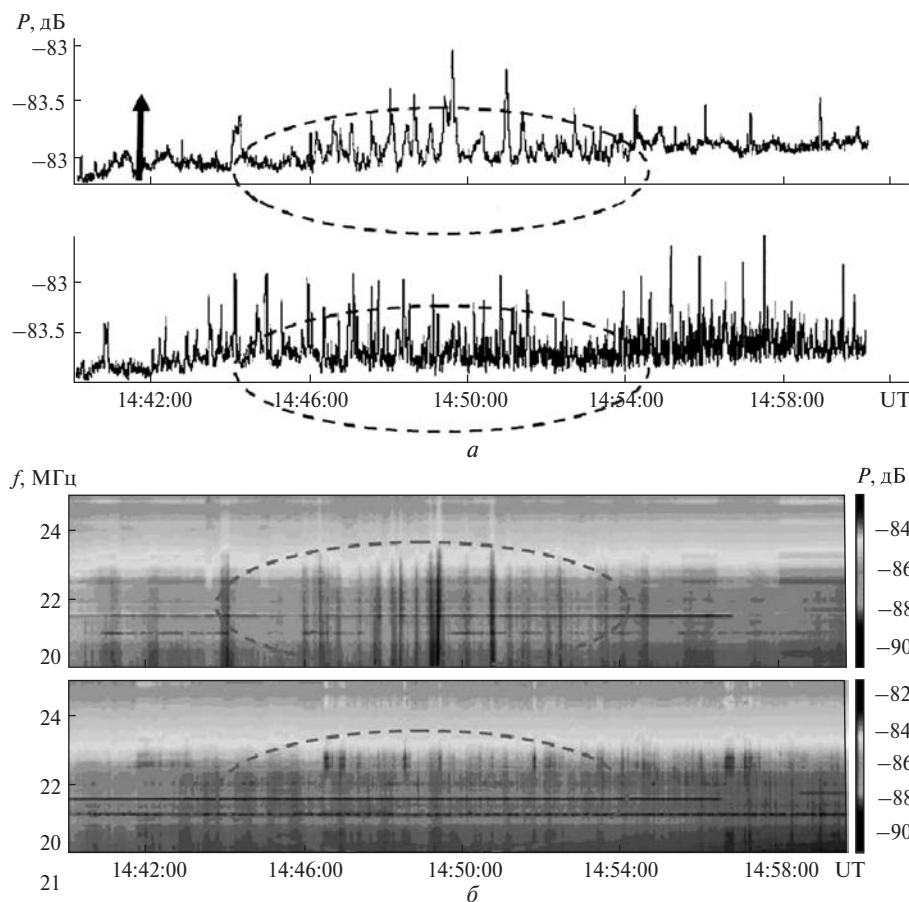


Рис. 9. Виділені для аналізу ділянки тривалістю 20 хв на записах часових профілів (а, верхній) та динамічних частотних спектрів (б, верхній) космічного радіовипромінювання на $f = 22$ МГц, зареєстрованих при дії акустичного збудження і без нього (а, б, нижні)

її прозорості, причому коефіцієнт проходження хвилі може багатократно збільшуватися.

Апробація інформаційних технологій опрацювання даних експериментів. Наведений на рис. 8 і 9 приклад однократного генерування випромінювачем ААХ на частоті $f_s \approx 30$ Гц і виявлення стимульованих її дією штучних АІЗ демонструє: а) енергетичну слабкість іоносферних сигналів від штучних АІЗ, сформованих в іоносфері, б) невисоку ефективність використаних інформаційних технологій. Тому були застосовані інші варіанти опрацювання сигналів і оцінено ефект від їхнього застосування.

1. Повторюваність штучної акустичної модифікації. Рис. 10 демонструє результати порівняння реалізацій трансмісійних сигналів від

космічного радіовипромінювання під час наземного випромінювання ААХ з допомогою НК АВ (рис. 10, а, г — 27.09.2018 р., рис. 10, б, д — 28.09.2018 р.) і без випромінювання ААХ (рис. 10, в, е — 29.09.2018 р.). Початок роботи НК АВ відповідає позначці $t = 0$ с на різних часових ділянках. Рис. 10, а—в демонструє ділянку 0...1200 с, а рис. 10, г—е — ділянку 500...800 с. Результат порівняння — формування в іоносфері штучних АІЗ при роботі НК АВ супроводжується появою ділянки тривалістю 400...800 с, яка містить періодичні коливання з більш-менш стійким періодом, причому реалізації іоносферних сигналів більш зашумлені, а діапазон зміни періоду коливань амплітуди значно ширший при відсутності генерації ААХ.

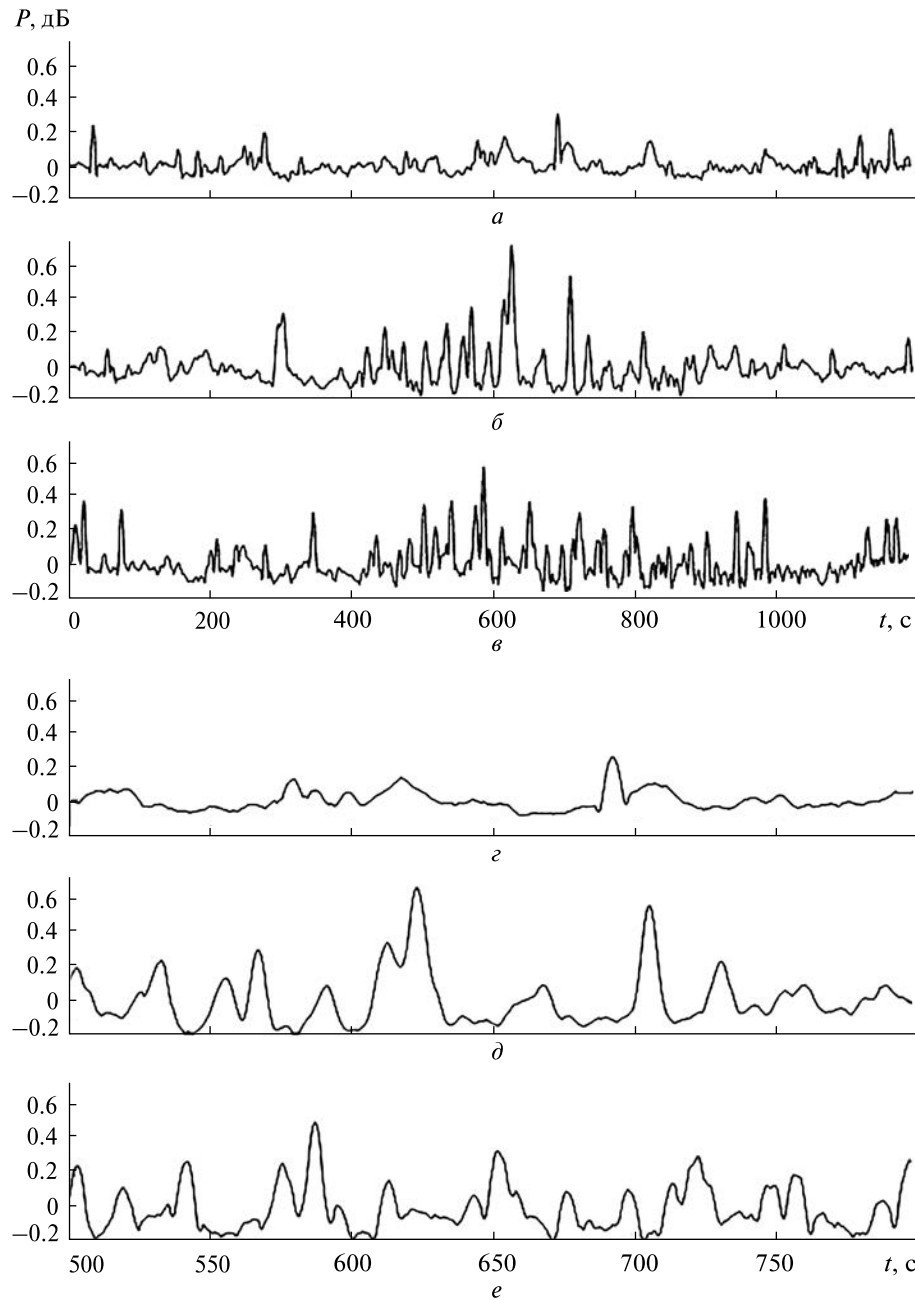


Рис. 10. Порівняння часових реалізацій трансмісійних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с (а, б, в) та їхні ділянки в діапазоні тривалості 500...800 с (г, д, е) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. (а, г) і 28.09.2018 р. (б, д) (початок роботи випромінювача відповідає позначці $t = 0$ с) та без нього 29.09.2018 р. (в, е)

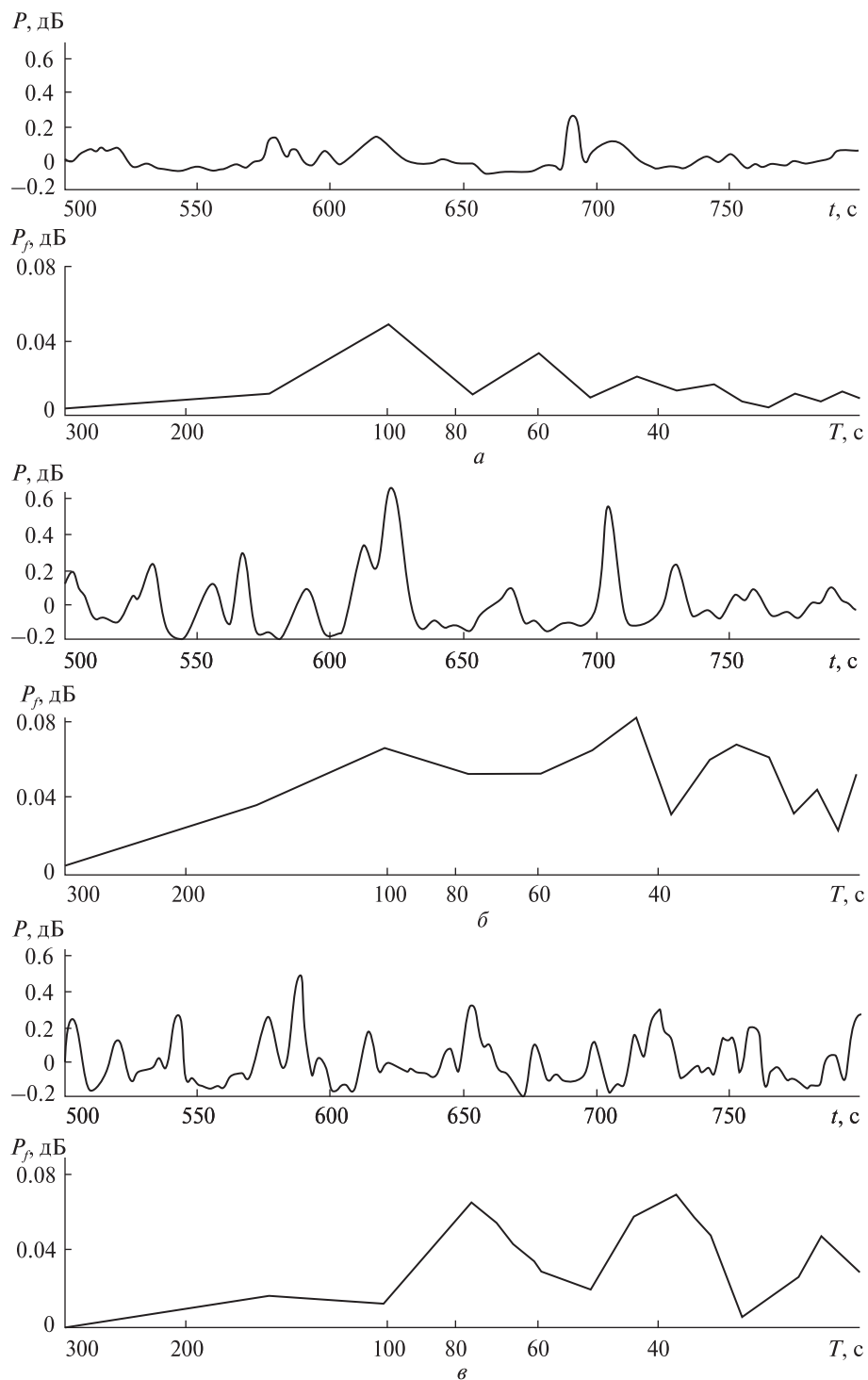


Рис. 11. Ділянка тривалістю 500...800 с часових реалізацій трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання (а, б, в — вгорі) та амплітудні спектри (а, б, в — внизу) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. (а) і 28.09.2018 р. (б). Початок роботи випромінювача відповідає позначці $t = 0$ с. Запис без акустичного збудження — 29.09.2018 р. (в)

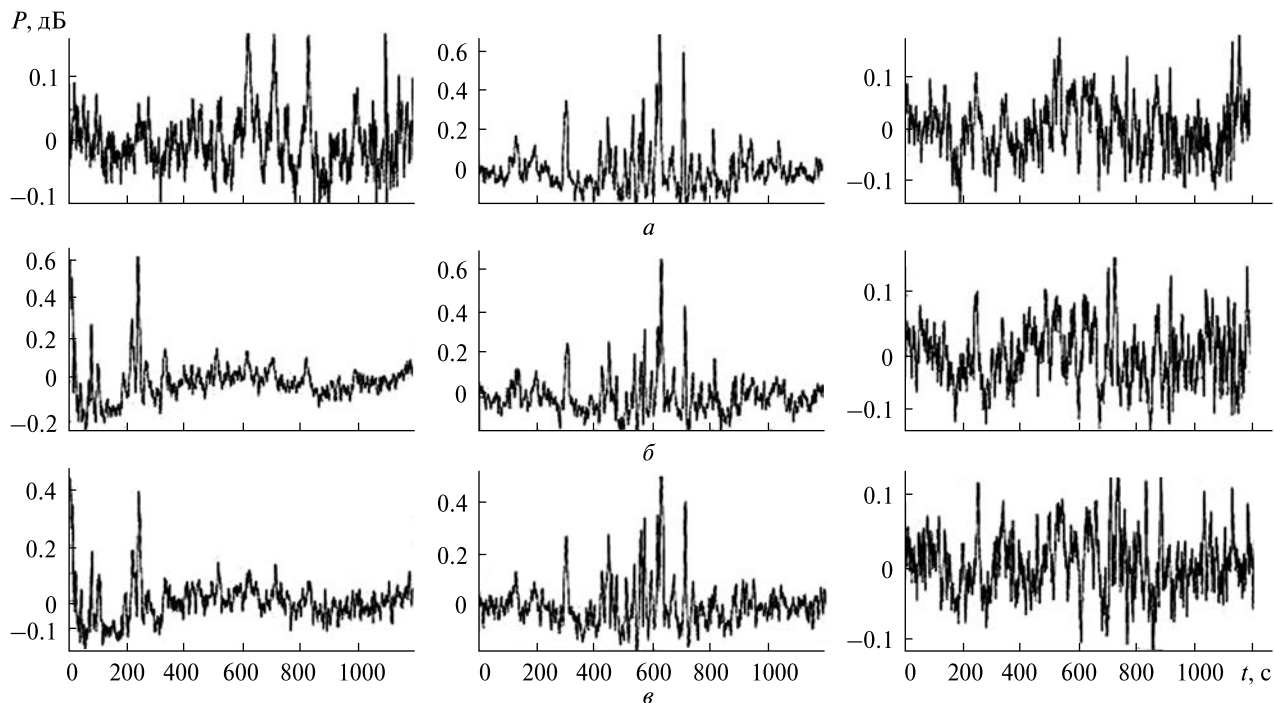


Рис. 12. Часові реалізації трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с, зареєстровані після їхньої фільтрації на частотах $f = 22, 23$ і 24 МГц у смузі 4 кГц (відповідно *а, б, в*) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27 і 28 вересня 2018 р. (лівий і середній стовпчики, початок роботи випромінювача відповідає позначці $t = 0$ с) і без нього 29.09.2018 р. (правий стовпчик)

2. Інформативність амплітудних спектрів.

На рис. 11 наведені записи часових реалізацій сигналу в діапазоні 500...800 с та їхні амплітудні спектри під час роботи НК АВ (рис. 11, *а, б*) і без генерації ААХ (рис. 11, *в*), зареєстровані відповідно 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. під впливом ААХ, і 29.09.2018 р. — без нього. Записи демонструють, що на частотах акустичної стимуляції $f_s \approx 30$ Гц відсутня стійка повторюваність амплітудних спектрів у різних умовах наземного акустичного збудження. Записи не містять чітких інформаційних ознак, які б дозволяли ідентифікувати штучні АІЗ, стимульовані роботою НК АВ.

3. Частотна фільтрація. На рис. 12 наведені записи часових реалізацій сигналу в діапазоні 0...1000 с, зареєстровані 27.09.18 р. і 28.09.2018 р. під час наземної генерації ААХ (лівий і середній стовпці) і 29.09.2018 р. без неї (правий стовпець). Початок роботи НК АВ відповідає позначці $t = 0$ с. Після фільтрації на частотах 22, 23 і 24 МГц у смузі 4 кГц реалізації сигналу зображені відпо-

відно на рис. 12, *а—в*. З результатів їхнього аналізу випливає, що прояви штучної АМІ на різних частотах відрізняються. Це свідчить про вплив частоти зондувального сигналу на інформативність цього процесу при реалізації спостережень радіоастрономічним методом та про необхідність оптимізації частотних параметрів приймального тракту для такого класу експериментів.

4. Вейвлет-перетворення відфільтрованих реалізацій. Результати застосування інформаційних технологій спектральної обробки часових реалізацій сигналів тривалістю 0...1000 с демонструє рис. 13. Технологія експерименту включає послідовні операції: а) реєстрація сигналів 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. під час генерації ААХ (відповідно — рис. 13, *а, з*, лівий і середній) і 29.09.2018 р. без неї (рис. 13, *а, з*, правий); б) фільтрація на частоті $f = 22$ МГц у смузі 4 кГц; в) вейвлет-перетворення на основі двох базисних функцій — Добеші (рис. 13, *б*) і Морле (рис. 13, *в*). Якісне порівняння отриманих результатів

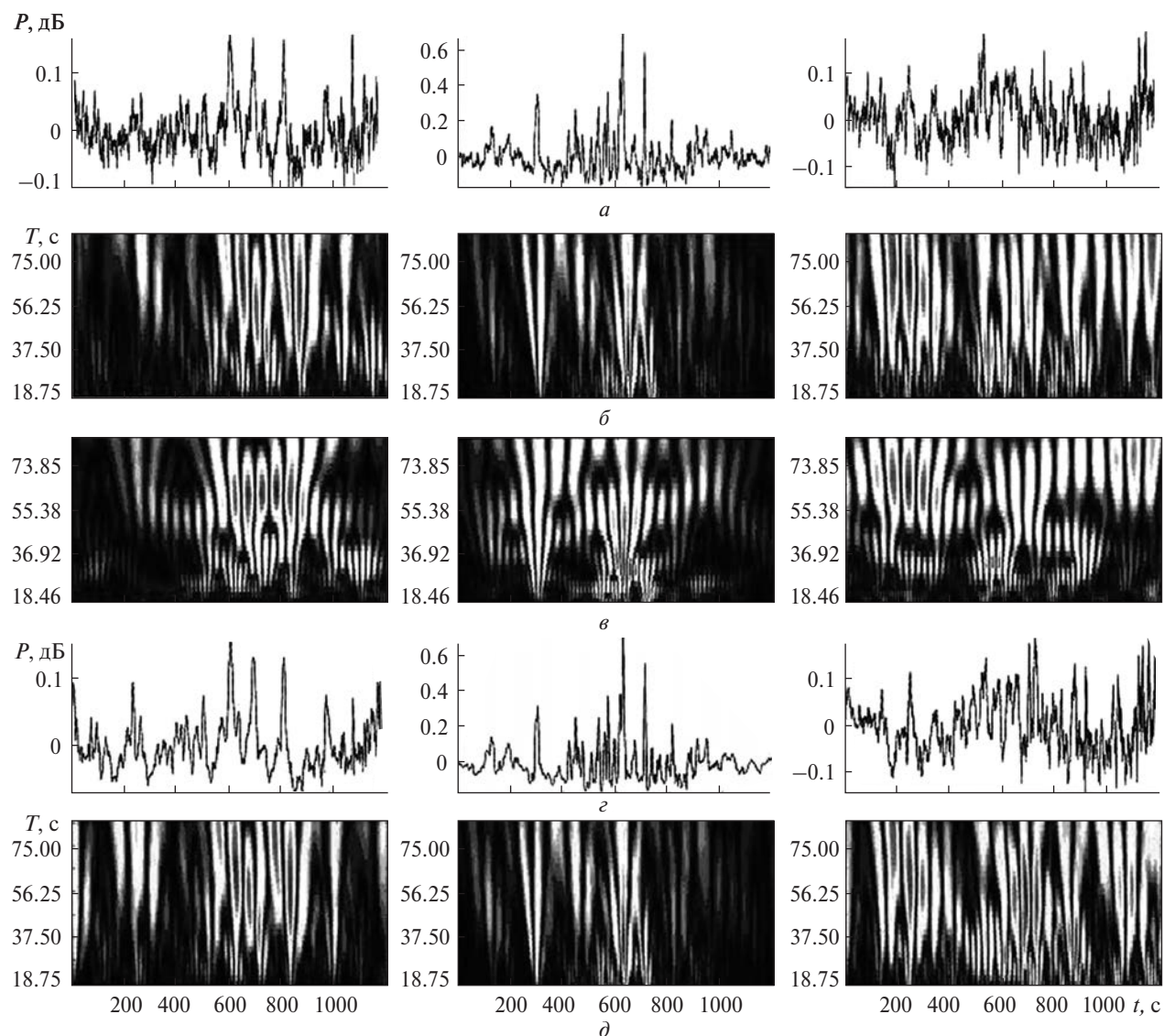


Рис. 13. Приклад застосування інформаційних технологій для обробки часових реалізацій трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с: *реєстрація* під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (відповідно *а*, *г* — лівий і середній стовпчики, початок роботи випромінювача відповідає позначці $t = 0$ с) і без нього 29.09.2018 р. (*а*, *г* — правий стовпчик), *фільтрація* на частоті $f = 22$ МГц (*а*, *г*) в смугах 4 кГц (*а*) і 400 кГц (*г*), *вейвлет-перетворення* Добеші (*б*, *д*) та Морле (*в*)

застосування перетворень Добеші та Морле для виявлення слабких АІЗ не дозволило зробити в даному випадку висновок про перевагу якогось з них.

Ефект від застосування вейвлет-перетворення Добеші для виявлення слабких штучних АІЗ демонструє рис. 13, *г*, *д*. Часові реалізації сигналів

після фільтрації на частоті $f = 22$ МГц у смузі частот 400 кГц наведені на рис. 13, *г*. Вони демонструють, що при наявності ААХ, генерованої з допомогою НКВ, прояв її впливу на іоносферу є чіткішим і відношення *сигнал / завада* вищим. За відсутності ААХ зареєстрований сигнал значно більше зашумлений. На спектрограмах До-

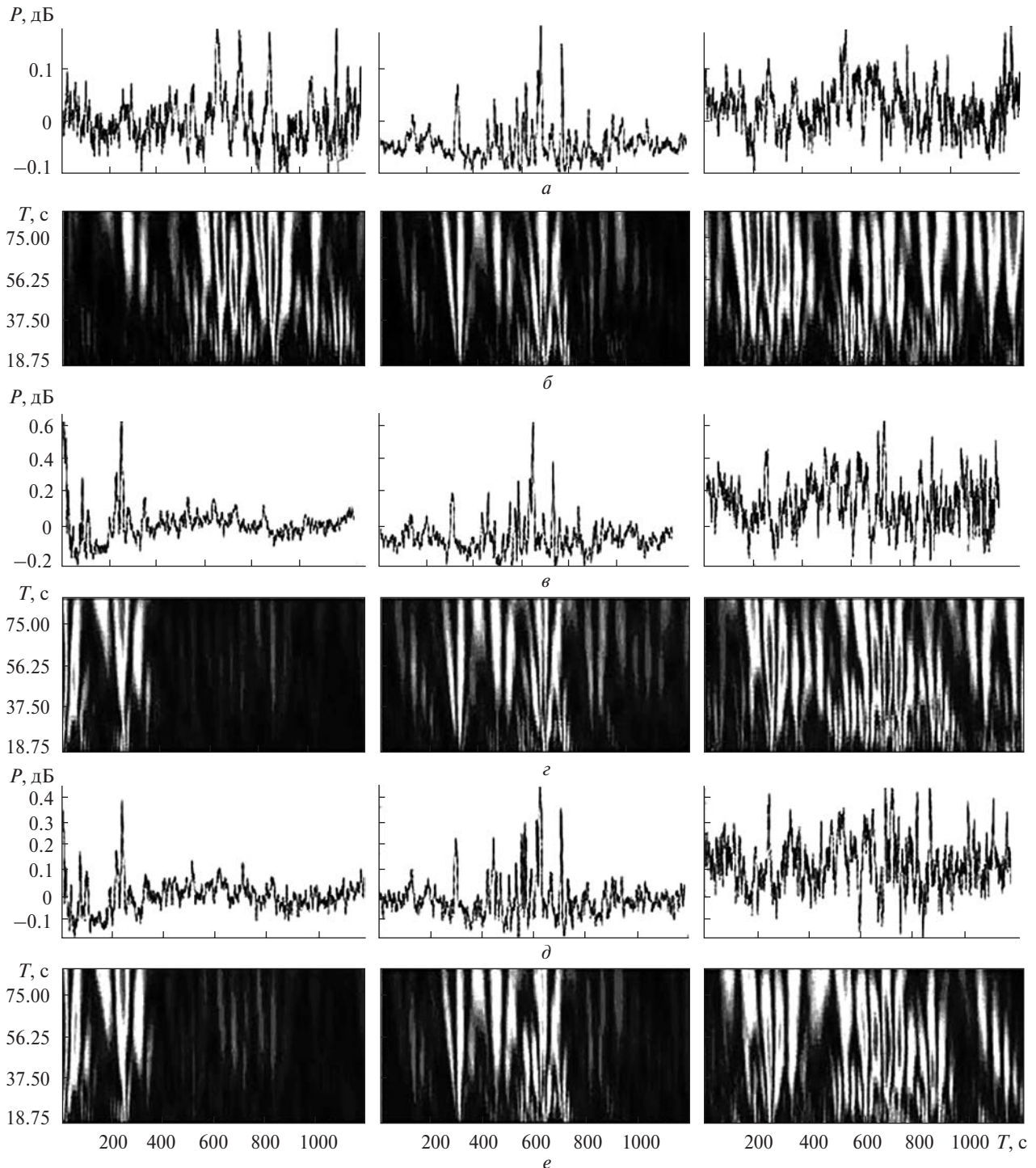
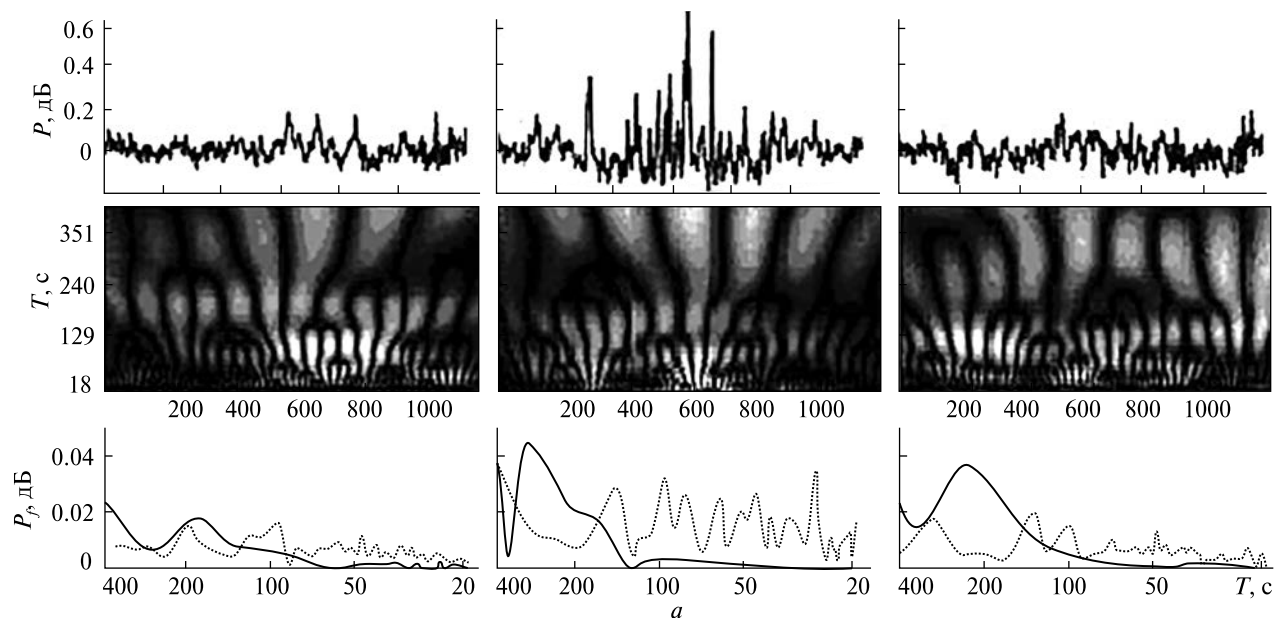


Рис. 14. Часові реалізації тривалістю 0...1000 с та вейвлет-перетворення Добеші трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання: після *реєстрації* під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (відповідно *а*, *в*, *д* — лівий і середній стовпчики, початок роботи випромінювача відповідає позначці $t = 0$ с) і без нього 29.09.2018 р. (*а*, *в*, *д* — правий стовпчик), після *фільтрації* на частотах $f = 22, 23$ і 24 МГц у смузі 4 кГц (*а*, *в*, *д*) і вейвлет-перетворення Добеші (*б*, *г*, *д*)



беші (рис. 13, д) цей висновок підтверджує ефект локалізації інтенсивності спектру сигналу на тих часових ділянках, які відповідають ймовірним проявам АІЗ за розрахунками часу поширення ААХ на часових реалізаціях сигналу. При відсутності ААХ спектральні складові розподілені хаотично вздовж горизонтальної осі (час поширення) спектрограми Добеші.

5. Системний спектральний аналіз. Апробовано один із варіантів методики розширеного спектрального аналізу з метою виявлення слабких АІЗ, спричинених дією НКВ на частотах $f_s \approx 30$ Гц. Цей варіант передбачає послідовне застосування операцій частотної фільтрації і вейвлет-перетворення. На рис. 14, а, в, д зліва і посередині наведено часові реалізації сигналу тривалістю 0...1000 с, зареєстровані при генерації ААХ відповідно 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (момент початку генерації відповідає позначці $t = 0$ с), а на рис. 14, а, в, д справа — 29.09.2018 р. без генерації ААХ. Представлені на рис. 14, а, рис. 14, в і рис. 14, д реалізації сигналу профільтовані на частотах $f = 22, 23$ і 24 МГц у смузі 4 кГц. За результатами спектрального аналізу з використанням базисної функції Добеші отримано спектрограми (рис. 14, б, г, е), які підтвердили, що основний вклад

у позитивний ефект від застосування цього аналізу вносить операція вейвлет-перетворення, а не фільтрації.

6. Розширений системний спектральний аналіз. Представлений вище варіант технології обробки часових реалізацій сигналів доповнено побудовою скейлограми на основі обчислення сумарних значень періодів НЧ-коливань за час реєстрації реалізацій. На рис. 15 для порівняння наведені часові реалізації (верхні рядки), вейвлет-спектрограми Морле (середні рядки), амплітудні спектри (віконне швидке перетворення Фур'є) та скейлограми (нижні рядки) сигналів, зареєстрованих 27.09.2018 р. і 28.08.2019 р. під час генерації ААХ (рис. 15, а, рис. 15, б) і 29.09.2018 р. без неї (рис. 15, в) на $f = 22, 23, 24$ МГц у смузі 4 кГц. На рис. 16 ці залежності для трьох частот представлені у виокремленому вигляді та збільшеному масштабі. На ньому ліві і середні стовпчики відповідають датам 27.09.2018 р. і 28.08.2019 р., коли була генерація ААХ, а праві — даті 29.09.2018 р., коли вона була відсутня. Амплітудні спектри і скейлограми представлені на рис. 16, а, б, в відповідно штриховими і суцільними лініями.

Використання скейлограми дозволило виявити переважаючі періоди НЧ-коливань часових

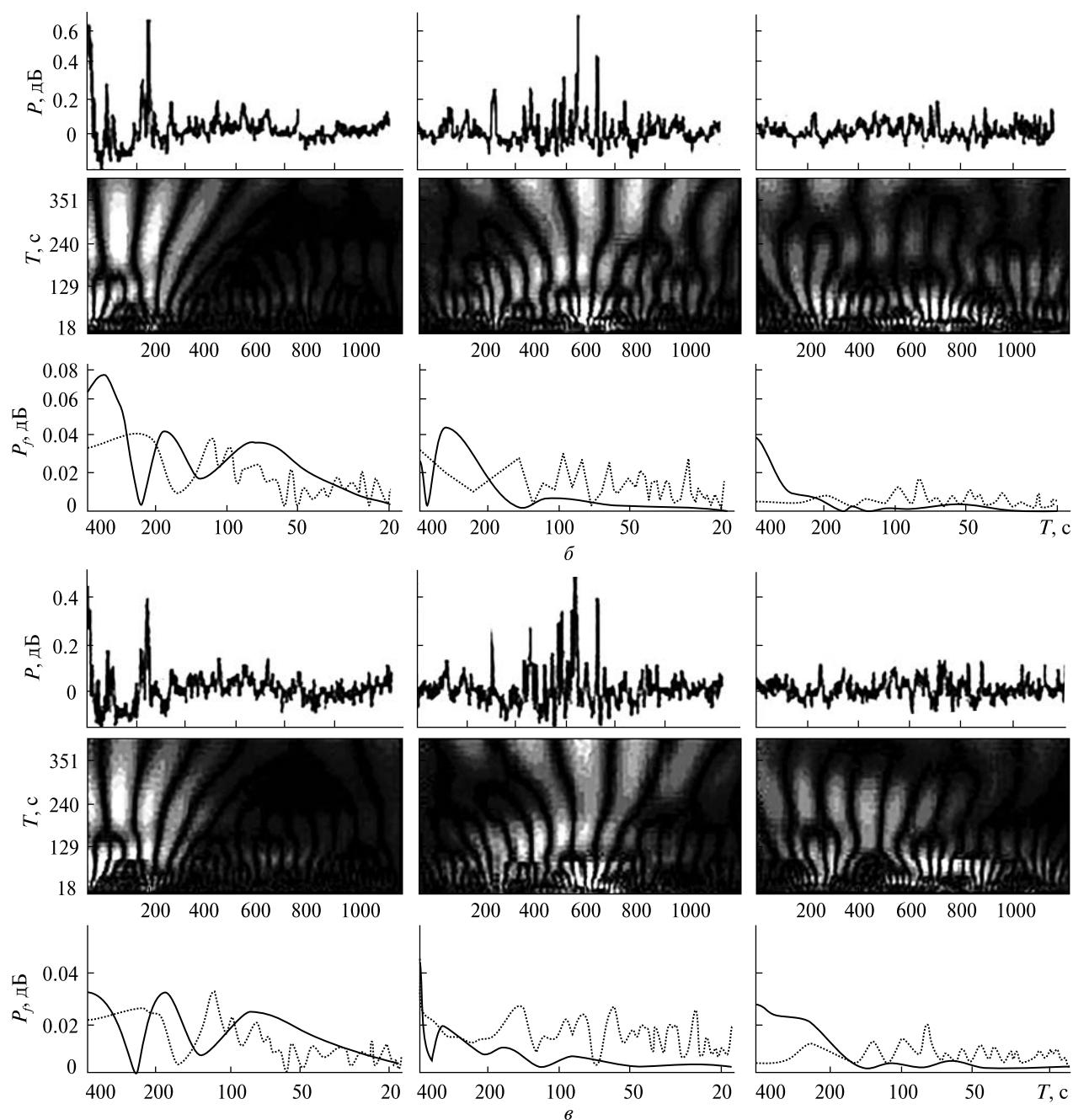


Рис. 15. Параметри трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання, отримані на частотах $f = 22, 23$ і 24 МГц у смузі 4 кГц (відповідно *а, б, в*) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27 і 28 вересня 2018 р. (лівий і середній стовпчики на фрагментах *а, б, в*) та без нього — 29 вересня 2018 р. (правий стовпчик). Верхні рядки на фрагментах *а, б, в* — часові реалізації, середні рядки — вейвлет-спектрограми Морле, нижні рядки — амплітудні FFT-спектри часових реалізацій (пунктирні криві) і скейлограми (суцільні криві)

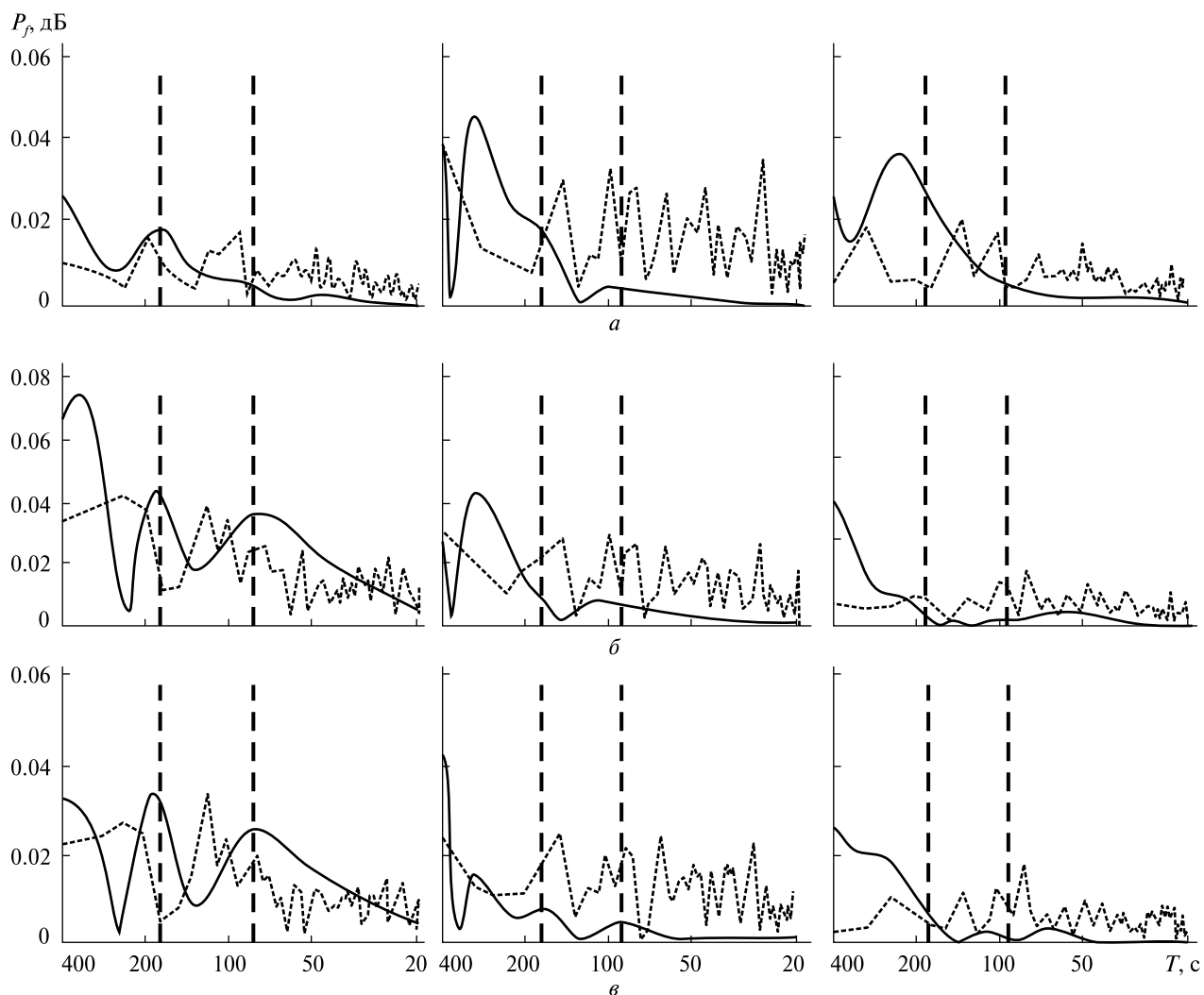


Рис. 16. Амплітудні спектри (віконне FFT — штрихові криві, скейлограми — суцільні криві) трансмісійних іоносферних сигналів космічного радіовипромінювання тривалістю 0...1000 с, зареєстровані на частотах $f = 22, 23$ і 24 МГц у смузі 4 кГц (відповідно *а*, *б*, *в*) під час роботи наземного акустичного випромінювача 27.09.2018 р. і 28.09.2018 р. (лівий і середній стовпчики) і без нього 29.09.2018 р. (правий стовпчик). Штрихові вертикальні лінії — переважні періоди коливань (~ 95 с і 190 с)

реалізацій трансмісійних іоносферних сигналів на ділянках 0...1000 с. У даному прикладі їх стабільно реєстрували 27.09.2018 р. і 28.03.2019 р. за наявності генерації ААХ, причому вказані періоди склали приблизно 95 с і 190 с (на рис. 16, *а* їхнє положення позначено вертикальними штриховими лініями). При відсутності генерації ААХ (29.03.2019 р.) ці переважаючі значення періодів не зареєстровані. Отриманий результат підтверджує доцільність застосування інформаційної

технології побудови скейлограми для виявлення слабких АІЗ, утворення яких в іоносфері стимульовано дією НК АВ на частотах $f_s \approx 30$ Гц.

ВИСНОВКИ

В даній роботі на основі узагальнення результатів досліджень проблеми акустичної модифікації середовища навколоземного простору, включаючи іоносферу, сформульовано вимоги до удосконалення комплексу акустико-електромагнітного

зондування іоносфери з використанням наземного керованого акустичного випромінювача та декаметрового радіотелескопа УРАН-3.

Показано, що для стимуляції ефекту штучної акустичної модифікації іоносфери на основі використання наземного керованого акустичного випромінювача необхідно забезпечити певні частотні і енергетичні параметри генерованих атмосферних акустичних хвиль. Зроблене з цією метою відповідне вдосконалення акустичного випромінювача дозволило провести у 2018 р. перший етап його експериментальної апробації, за результатами якого оцінено можливість реалізації штучної акустичної модифікації іоносфери на частотах $f_s \approx 30$ Гц, що відповідає верхній границі інфразвукового діапазону.

Аналіз перших результатів апробації удосконаленого комплексу та результати застосування сучасних інформаційних технологій розширеного системного спектрального аналізу сигналів радіовипромінювання космічних радіоджерел

підтвердили, що у випадку наземної генерації інфразвуку з частотою біля верхньої границі інфразвукового діапазону є можливість досягнення ефекту штучної модифікації іоносфери та виявлення слабких акустоіоносферних збурень. Цей ефект спостерігається при певних станах приземної і верхньої атмосфери, які визначаються погодними умовами та рівнем завад і впливають на поширення атмосферних акустичних хвиль. Наступний етап роботи передбачає дослідження виявлених ефектів з використанням наземного керованого акустичного випромінювача в діапазоні 2...10 Гц, який точніше відповідає умовам сейсмо-іоносферної взаємодії.

Робота частково підтримана Цільовою комплексною програмою НАН України з наукових космічних досліджень на період 2018—2022 рр. та бюджетними НДР, які виконуються ФМІ НАН України та кафедрою космічної радіофізики ХНУ ім. В. Н. Каразіна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Альперович Л. С., Афраймович Э. Л., Вугмейстер Б. О., Гохберг М. Б., Дробжев В. И., Ерушенков А. И., Иванов Е. А., Калихман А. Д., Кудрявцев В. П., Куличков С. Н., Краснов В. М., Мордухович М. И., Матвеев А. К., Нагорский П. М., Пономарев Е. А., Салихов Н. М., Тарашук Ю. Е., Троицкая В. А., Федорович Г. В. Акустическая волна взрыва. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 32—42.
2. Госреестр открытий СССР. Явление воздействия сейсмичности Земли через акустические волны на ионосферу / Бирфельд Я. Г., Таранцов А. В. № 128, 02.09.1963, приоритет от 25.09.1963.
3. Госсард Э., Хук У. *Волны в атмосфере*. Москва: Мир, 1975. 532 с.
4. Дробжева Я. В. *Распространение акустических волн в верхней атмосфере*: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Алматы, 2003. 143 с.
5. Дробжева Я. В., Краснов В. М. Итоги проекта «МАССА» через 15 лет. *Взрывное дело*. 1997. № 3. С. 34—39.
6. Емельянов Л. Я., Живолуп Т. Г., Сорока С. А., Черемных О. К., Черногор Л. Ф. Наземное акустическое воздействие на атмосферу: результаты наблюдений методами некогерентного рассеяния и вертикального зондирования. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. 20, № 1. С. 37—47.
7. Івантишин О. Л. Інформаційно-вимірювальний комплекс на базі радіотелескопа УРАН-3 для дослідження слабких акусто-іоносферних збурень: автореф. дис. канд. техн. наук. Львів: Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, 2007. 20 с.
8. Калита Б. И., Каратаева Л. М., Мезенцев В. П., Ногац Р. Т. Активные акустические эксперименты со спутником DEMETER. *Космический проект «Ионосат-Микро»*: монография (Ред. С. А. Засуха, О. П. Федоров). Киев: Академперіодика, 2013. С. 193—199.
9. Каліта Б. І., Каратаєва Л. М., Мезенцев В. П., Ногац Р. Т., Сорока С. О. Вплив акустичних збурень на прозорість іоносфери. *Відбір і обробка інформації*. 2011. № 35 (111). С. 77—83.
10. Каллистратова М. А., Кон А. И. *Радиоакустическое зондирование атмосферы*. Москва: Наука, 1985. 195 с.
11. Кошевой В. В. Радиофизическая и радиоастрономическая диагностика ионосферных эффектов, вызванных наземным инфразвуковым излучателем (предварительные результаты). *Изв. вузов. Радиофизика*. 1999. 42, № 8. С. 785—798.

12. Кошевой В. В., Ивантишин О. Л. Выявление слабых акусто-ионосферных возмущений методом рассеивания радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях с использованием декаметрового радиотелескопа УРАН-3. *Отбор и обработка информации*. 1998. **12** (88). С. 32—36.
13. Кошовий В. В., Ивантишин О. Л. Дослідження штучних акусто-іоносферних збурень радіоастрономічним методом. *Відбір і обробка інформації*. 1999. **13** (89). С. 21—25.
14. Кошовий В. В., Сорока С. О. Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем. I. Експериментальне виявлення акусто-іоносферних збурень. *Космічна наука і технологія*. 1998. **4**, № 5-6. С. 3—17.
15. Матвийчук Я. Н., Сорока С. А. Возможный механизм электромагнитных откликов на акустические возмущения в атмосфере. *Космічна наука і технологія*. 2002. **9**, додаток до № 2. С. 194—201.
16. Назарчук З. Т., Кошевой В. В., Сорока С. А., Ивантишин О. Л., Лозинский А. Б., Романишин И. М. К вопросу акустико-электромагнитного зондирования ионосферы. *Космічна наука і технологія*. 2002. **9**, додаток до № 2. С. 120—131.
17. Негода А. А., Сорока С. А. Перспективы развития исследований атмосферы и ионосферы с использованием искусственного акустического воздействия. *Космічна наука і технологія*. 1999. **5**, № 2-3. С. 3—12.
18. Пат. України на корисну модель № 59531 МПК G01W 1/08 (2006. 01). Ивантишин О. Л., Кошовий В. В., Лозинський А. Б., Назарчук З. Т., Романишин І. М., Сорока С. О. Спосіб оцінювання інфразвукової обстановки на поверхні землі на основі акусто-електромагнітного моніторингу іоносфери.
19. Селиванов Ю. О., Рапопорт Ю. Г., Черемных О. К. Ионосферный відгук на акустичну дію за даними мікросупутників DEMETER та «Чибис-М». *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 6. С. 41—56.
20. Хргиан А. Х., Кузнецов Г. И. Атмосферный озон, его вариации и геофизические связи. Взаимодействие в системе литосфера — гидросфера — атмосфера. Москва: Недра, 1996. С. 241—267.
21. Черемных О. К., Климов С. И., Корепанов В. Е., Кошовый В. В., Мельник М. Е., Ивантишин О. Л., Мезенцев В. П., Ногач Р. Т., Рапопорт Ю. Г., Селиванов Ю. А., Семенов Л. П. Наземно-космический эксперимент по искусственной акустической модификации ионосферы. Первые результаты. *Космічна наука і технологія*. 2014. **20**, № 6. С. 60—73.
22. Черногор Л. Ф. Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1997. **2**, № 4. С. 463—472.
23. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження». *Космічна наука і технологія*. 1999. **5**, № 1. С. 38—47.
24. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март — апрель 2003 г.). *Космічна наука і технологія*. 2003. **9**, № 2/3. С. 13—33.
25. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофиз. журн.* 2004. **26**, № 4. С. 31—44.
26. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь. *Геофиз. журн.* 2004. **26**, № 6. С. 61—73.
27. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2006. № 6. С. 522—535.
28. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 2/3. С. 16—26.
29. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 4. С. 359—369.
30. Черногор Л. Ф. *О нелинейности в природе и науке*: монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
31. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*: монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
32. Черногор Л. Ф. Катастрофа на наибольшем арсенале боеприпасов. *Наука и техника*. 2017. № 5 (132). С. 4—10.
33. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. **22**, № 1. С. 53—66.
34. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики параметров метеороидов в атмосфере Земли. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. **34**, № 3. С. 42—58.
35. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кинематика и физика небесных тел*. 2019. **35**, № 4. С. 35—56. Ч. 2. № 5. С. 25—47. Ч. 3. № 6. С. 34—61.
36. Черногор Л. Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. **59**, № 3. С. 400 — 408.
37. Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми взрывами на арсенале боеприпасов. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 4. С. 280—293.

38. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Глобальная статистика болидов в атмосфере Земли. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. **22**, № 2. С. 138—145.
39. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвукового сигнала, сгенерированного взрывом мощного вулкана, от расстояния. *Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка*. 2017. **27**. С. 57—60.
40. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 1. С. 24—35.
41. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной тунгусским космическим телом, от расстояния. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. **23**, № 2. С. 94—103.
42. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. **34**, № 3. С. 59—75.
43. Черногор Л. Ф., Ляшук О. І., Шевелев М. Б. *Параметри інфра звукових сигналів в атмосфері, згенерованих протягом техногенної катастрофи поблизу м. Вінниця: результати обробки даних української мережі мікробарографів*. Обчисл. методи і системи перетв. інформації: зб. пр. V НТК, Львів, 4 — 5 жовтня 2018 р. Львів: ФМІ НАНУ, 2018. Вип. 5. С. 99—103.
44. Arrowsmith S. J., ReVelle D. O., Edwards W. N., Brown P. G. Global detection of infrasonic signals from three large bolides. *Earth, Moon, and Planets*. 2008. **102**, № 1-4. P. 35—363.
45. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. *J. Geophys. Res.* 1979. **84C**, № 4. P. 1735—1745.
46. Balachandran N. K., Donn W. L. Characteristics of infrasonic signals from rockets. *Geophys. J. International*. 1971. **26**, № 1—4. P. 135—148.
47. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*. 1977. **197**, № 4298. P. 47—49.
48. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. *Ann. Geophys.* 1985. **3**. P. 673—688.
49. Blaunstein N. (2001). Method of earthquake prediction, The United States Patent No. US 6,246,964 B1.
50. Brown P., Pack D., Edwards W. N., Revelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., Tagliaferri E. The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*. 2004. **39**, № 11. P. 1781—1796.
51. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. Infrasonic observations of the bolide explosion over Romania on January 7. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2015. **33**, № 6. P. 276—290.
52. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Infrasonic signals generated by a series of chemical explosions near Vinnytsia city*. Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. (Kyiv, Ukraine, May 29—June 01, 2018): Book of Abstracts. 2018. P. 87—88.
53. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. *Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot*. Proceedings of the XIXth International young scientists' conference on applied physics (May 21—25, 2019). Kyiv, 2019. P. 100—101.
54. Chernogor L. F., Shevelev N. B. Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2018. **34**, № 3. P. 147—160.
55. Chernogor L. F., Qiang Guo, Rozumenko V. T., Shevelev M. B. *The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid*. Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. (Kyiv, Ukraine, May 29—June 01, 2018): Book of Abstracts. 2018. P. 89—90.
56. Che Y., Park J., Kim I. Infrasonic signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophys. J. International*. 2014. **198**, № 1. P. 495—503.
57. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*. 1993. **361**, № 6407. P. 40—44.
58. Cook R. K., Young J. M. Strange Sounds in the Atmosphere. Part II. *Sound: Its Uses and Control*. 1962. **1**, № 3. P. 25—33.
59. Donn W. L. Exploring the atmosphere with sonic booms: or how i learned to love the concorde. *American Scientist*. 1978. **66**, № 6. P. 724—733.
60. Donn W. L., Balachandran N. K. Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Airwaves and explosive yield. *Science*. 1981. **213**, № 4507. P. 539—541.
61. Donn W. L., Posmentier E., Fehr U., Balachandran N. K. Infrasonic at long range from Saturn V, 1967. *Science*. 1967. **162**, № 3858. P. 1116—1120.
62. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. **68**. P. 1136—1160.
63. ElGabry M. N., Korrat I. M., Hussein H. M., Hamama I. H. Infrasonic detection of meteors. *NRIAG J. Astron. and Geophys.* 2017. **6**, № 1. P. 68—80.

64. Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N. Infrasound production by bolides: A global statistical study. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2012. **80**. P. 208—229.
65. Galperin Yu., Hayakawa M. On magnetospheric effects of experimental ground explosions observed from AUREOL-3. *Geoelectric*. 1996. **48**. P. 1241—1263.
66. Galperin Yu., Hayakawa M. On possibility of parametric amplifier in the stratosphere-mesosphere suggested by active MASSA experiments with the AUREOL-3 satellite. *Earth Planets Space*. 1998. **50**. P. 827—832.
67. Gi N. Using bolide airwaves to estimate meteoroid source characteristics and window damage potential. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. 2017. **4688**. 165 p. URL: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4688> (дата звернення 17.07.2019).
68. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. Lithosphere-ionosphere coupling and its modeling. *Russian J. Earth Sci.* 2000. **2**. P. 95—108.
69. Gotynyan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G., Parrot M. Ionospheric disturbances excited by the lithospheric gas source of acoustic gravity waves before earthquakes. *Space Sci. and Technol.* 2003. **9**, No. 2. P. 89 — 105.
70. Koshevaya S. V., Grimalsky V. V., Perez-Enriquez R., Kotsarenko A. Increase of the transparency for cosmic radio waves due to the decrease of density of the ionosphere caused by acoustic waves. *Physica Scripta*. 2006. **72**(1). P. 91.
71. Koshevaya, S., Kotsarenko, Yu., Escobedo, J. A., Kotsarenko and Yutsis, V. A. Cosmic radio waves caused by seismic volcano activities. *J. Electromagnetic Analysis and Applications*. 2014. **6**. P. 335—341. URL: <http://www.scirp.org/journal/jemaa>, <http://dx.doi.org/10.4236/jemaa.2014.611034> (дата звернення 17.07.2019).
72. Koshevaya, S., Makarets, N., Grimalsky, V., Kotsarenko, A., Perez Enríquez R. Spectrum of the seismic-electromagnetic and acoustic waves caused by seismic and volcano activity. *Natural Hazards and Earth System Science*, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2005, **5** (2), P. 203-209. HAL Id: hal-00299144. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299144> (дата звернення 17.07.2019).
73. Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L., Lozynskyy A. B., et al. Radiophysical complexes for cosmic investigations based on Ukrainian radiotelescope URAN-3. *Asta Cosmologica*. FASCICULUS XXIII-2. 1997. P. 67—70.
74. Kotsarenko N. Ya., Soroka S. A., Koshevaya S. V., Koshovyy V. V. Increase of the transparency of the ionosphere for cosmic radiowaves caused by a low frequency wave. *Physica Scripta*. 1999. **59**, № 2. P. 174—181.
75. Krasnov V. M., Kuleshov Yu. V. Variation of infrasonic signal spectrum during wave propagation from Earth's surface to ionospheric altitudes. *Acoust. Phys.* 2014. **60**, № 1. P. 19—28. DOI: 10.1134/S1063771013060109.
76. Landès M., Ceranna L., Le Pichon A. Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network. *J. Geophys. Res.* 2012. **117D**, № 6. Doi: 10.1029/2011JD01668406102.
77. Le Pichon A., Blanc E. Hauchecorne A. (Eds.). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. New York: Springer Science + Business Media. 2010. 735 p.
78. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C. V., Liperovskaya E. V. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. **48**. № 6. P. 795—806.
79. Liszka L. *Infrasound: a summary of 35 years of infrasound research*. Swedish Institute of Space Physics. 150 p.
80. *Meteor Infrasound. What is Infrasound?* The Department of Physics and Astronomy, the University of Western Ontario, Meteor Physics. URL: http://meteor.uwo.ca/research/infrasound/is_whatIS.html (дата звернення 17.07.2019).
81. Olson J. Infrasound rocket signatures. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2012. **1**. P. 82.
82. Parrot, M., Hayosh, M., Soroka, S. O. Acoustic experiments in the ionosphere with the DEMETER satellite. *EGU General Assembly* (15—20 April 2007). Vienna, 2007. 1607-7962/gra/EGU2007-A-04428.
83. Pichon A., Garcés M., Blanc E., et al. Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *J. Acoust. Soc. Amer.* 2002. **111**, № 1. P. 629—641.
84. Ponomarev E. A., Erushchenkov A. I. Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1978. **20**, № 12. P. 1218—1229.
85. Proksch N. *Lightning detection with infrasound*. Master's Thesis. Utrecht University. Royal Netherlands Meteorological Institute, 2017. 53 p.
86. Rapoport V. O., Bepalov P. A., Mityakov N. A., Parrot M., Ryzhov N. A. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2004. **66**, № 12. P. 1011—1017. DOI 10.1016/j.jastp.2004.03.010.
87. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Koshovyy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Nogach R. T., Selivanov Yu. A., Grimalsky V. V., Mezentsev V. P., Karataeva L. M., Ivchenko V. M., Milinevsky G. P., Fedun V. N., Tkachenko E. N. Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. *Ann. Geophys.* 2017. **35**. P. 53—70. DOI:10.5194/angeo-35-53-2017.
88. Reed J. W. Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. *J. Geophys. Res.* 1987. **92**, № D10. P. 11979—11992. DOI: 10.1029/JD092iD10p11979.

89. Sakurai A. *Blast wave theory*. Basic developments in fluid dynamics. Holt M. (ed). New York: Academic Press, 1965. Vol. 1. P. 309—375.
90. Savina O. N., Bespalov P. A. Ionospheric response to the acoustic gravity wave singularity. *Acta Geophysica*. 2015. **63**, № 1. P. 319—328. DOI: 10. 2478/s11600-014-0246-1. URL: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/> (дата звернення 17.07.2019).
91. Silber E. A. *Observational and theoretical investigation of cylindrical line source blast theory using meteors*. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 2014. Paper 2112. 582 p.
92. Silber E. A., Brown P. G. Optical observations of meteors generating infrasound. I. Acoustic signal identification and phenomenology. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2014. **119**. P. 116—128.
93. Silber E. A., Brown P. G., Krzeminski Z. Optical observations of meteors generating infrasound: weak shock theory and validation. *J. Geophys. Res: Planets*. 2015. **120**, № 3. P. 413—428.
94. Soroka S. O., Kalita B. I., Karataeva L. M., et al. Active acoustic experiments with the satellite DEMETER. *International Conference DEMETER*, Toulouse, 14—16 June 2006.
95. Whipple F. J. W. The great Siberian meteor, and the waves, seismic and aerial, which it produces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1930. **56**, № 236. P. 287—301.

Стаття надійшла до редакції 17.07.2019

REFERENCES

1. Al'perovych L. S., Aphraimovych E. L., Vugmeister B. E., et al. (1985). Acoustic wave of explosion. *Earth Physics*, **11**, 32—42 [in Russian].
2. Birfel'd Ja. H., Tarancov A. V. (1963). The effect of Earth's seismicity through acoustic waves on the ionosphere. *State Register of Discoveries of the USSR*, № 128 [in Russian].
3. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975). *Waves in the Atmosphere*. Moscow: Publishing Mir.
4. Drobzheva Ya. V. (2003). *Propagation of acoustic waves in the upper atmosphere*. Doctor's Thesis, Almaty, 143 p. [in Russian].
5. Drobzheva Ya. V., Krasnov V. M. (1997). Results of the project «MASSA» after 15 years. *Explosive Case*, **3**, 34—39 [in Russian].
6. Emelyanov L. Ya., Zhivolup T. G., Soroka S. A., Cheremnykh O. K., Chernogor L. F. (2015). Ground-based acoustic effects on the atmosphere: the results of observations by means of incoherent scattering and vertical sounding techniques. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **20** (1), 37—47 [in Russian].
7. Ivantyshyn O. L. (2007). *Information — measuring complex based on the radio telescope URAN-3 for the study of weak acousto — ionospheric disturbances*. Extended abstract of candidate's thesis. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
8. Kalita B. I., Karatayeva L. M., Mezentsev V. P., Nogach R. T., Parrot M. (2013). *Active acoustic experiments with the satellite DEMETER. Space project "Ionosat—Micro"*: Monograph. (Eds S. A. Zasukha, O. P. Fedorov). Kyiv: Academperiodika, 193—199 [in Russian].
9. Kalita B. I., Karatayeva L. M., Mezentsev V. P., Nogach R. T., Soroka S. O. (2011). The effect of acoustic disturbances on a transparency of the ionosphere. *Information Selection and Processing*, **35** (111), 77—83 [in Ukrainian].
10. Kallystratova M. A., Kon A. Y. (1985). *Radioacoustic sounding of the atmosphere*. Moscow: Nauka [in Russian].
11. Koshovyy V. V. (1999). Radiophysical and radioastronomical diagnostics of ionospheric effects caused by the ground — based infrasound emitter (preliminary results). *Universities News. Radiophysics*, **42** (8), 785—798 [in Russian].
12. Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L. (1998). Detection of weak acousto-ionospheric disturbances by the method of radiowaves scattering on small — scale inhomogeneities using the decameter radio telescope URAN-3. *Information Selection and Processing*, **12** (88), 32—36 [in Ukrainian].
13. Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L. (1999). Research of the acoustic artificial ionospheric disturbances by the radio astronomical method. *Information Selection and Processing*, **13** (89), 21—25 [in Ukrainian].
14. Koshovyy V. V., Soroka S. O. (1998). Acoustic disturbance of ionospheric plasma by a ground-based radiator. I. Experimental detection of the acoustic and ionospheric disturbances. *Space Science and Technology*, **4** (5/6), 3—17 [in Ukrainian].
15. Matvijchuk Ja. N., Soroka S. A. (2002). Possible mechanism of electromagnetic responses to acoustic disturbances in the atmosphere. *Space Science and Technology*, **8** (2), 194—200.
16. Nazarchuk Z. T., Koshevoy V. V., Soroka S. A., Ivantishin O. L., Lozynskyi A. B., Romanishin I. M. (2003). To the question of acousto — electromagnetic sounding of the ionosphere. *Space Science and Technology*, **9**, Suppl. 2, 17—23 [in Russian].
17. Negoda A. A., Soroka S. A. (1999). Prospects for the development of atmospheric and ionospheric studies using artificial acoustic effects. *Space Science and Technology*, **5** (2/3), 3—12 [in Russian].
18. Patent of Ukraine № 59531 МПК G01W 1/08 (2006. 01). Ivantyshyn O. L., Koshovyy V. V., Lozynskyi A. B., Nazarchuk Z. T., Romanyshyn I. M., Soroka S. O. Methods of estimation of the infrasonic environment on the ground surface based on acousto-electromagnetic monitoring of the ionosphere [in Ukrainian].

19. Selivanov Ju. O., Rapoport Ju. G., Cheremnyh O. K. (2018). Ionospheric response to acoustic action according to the data of micrometers DEMETER and Chibis-M. *Space Science and Technology*, **24** (6), 41–56 [in Ukraine].
20. Hrgian A. H., Kuznecov G. I. (1996). Atmospheric ozone, its variations and geophysical relations. *Interaction in the "lithosphere — hydrosphere — atmosphere" system*. Moscow: Nedra, 241–267.
21. Cheremnykh O. K., Klimov S. I., Korepanov V. E., Koshovyy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Mezentssev V. P., Nogach R. T., Rapoport Yu. G., Selivanov Yu. A., Semenov L. P. (2014). Ground — space experiment for artificial acoustic modification of the ionosphere. Some preliminary results. *Space Science and Technology*, **20** (6), 60–73 [in Russian].
22. Chernogor L. F. (1997). Infrasound impact of earthquakes and their precursors on the parameters of near — Earth space. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **2** (4), 463–472 [in Russian].
23. Chernogor L. F. (1999). Energetics of processes in the atmosphere and near — Earth space in the light of the project «Warning». *Space Science and Technology*, **5** (1), 38–47 [in Russian].
24. Chernogor L. F. (2003). Physical processes in the near — Earth environment that accompanied hostilities in Iraq (March — April 2003). *Space Science and Technology*, **9** (2/3), 13–33 [in Russian].
25. Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and geocological consequences of mass chemical explosions in military warehouses in city Artyomovsk. *Geophysical J.*, **26** (4), 31–44 [in Russian].
26. Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and environmental consequences of fire and explosions at the military base near Melitopol. *Geophysical J.*, **26** (6), 61–73 [in Russian].
27. Chernogor L. F. (2006). Ecological consequences of mass chemical explosions in a technological catastrophe. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 6, 522–535 [in Russian].
28. Chernogor L. F. (2006). Tropical cyclone as an element of the Earth system. *Space Science and Technology*, **12** (2/3), 16–26 [in Russian].
29. Chernogor L. F. (2008). Geocological consequences of the explosion of an ammunition depot. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, № 4, 359–369 [in Russian].
30. Chernogor L. F. (2008). *On the nonlinearity in nature and science*. Monograph. Kharkiv: Karazin Kharkiv National University [in Russian].
31. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Monograph. Kharkiv: Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
32. Chernogor L. F. (2017). Largest arsenal ammunition catastrophe. *Sci. and Tekh.*, **5** (132), 4–10 [in Russian].
33. Chernogor L. F. (2017). Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. *Radiophysics and Radioastronomy*, **22** (1), 53–66 [in Russian].
34. Chernogor L. F. (2018). Statistical Characteristics of Meteoroid Parameters in the Earth's Atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (3), 134–146 [in Russian].
35. Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **35** (4), 174–188. Part 2. **35** (5), 217–230. Part 3. **35** (6), 271–285 [in Russian].
36. Chernogor L. F. (2019). Possible Generation of Quasi — Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, **59** (3), 374–382.
37. Chernohor L. F., Liaschuk A. Y., Shevelev N. B. (2018). Parameters of infrasound signals in the atmosphere generated by massive explosions in the ammunition arsenal. *Radiophysics and Radioastronomy*, **23** (4), 280–293 [in Russian].
38. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2017). Global'naja statistika bolidov v atmosfere Zemli [Global statistics of bolides in the terrestrial atmosphere]. *Radiophysics and Radioastronomy*, **22**(2), 138–145 [in Russian].
39. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2017). Dependence of the amplitude of the infrasonic signal generated by the explosion of a powerful volcano, on the distance. *Karazin National University Bulletin. Ser. Radiophysics and Electronics*, **27**, 57–60 [in Russian].
40. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2018). Characteristics of the infrasound signal generated by the Chelyabinsk space body: global statistics. *Radiophysics and Radioastronomy*, **23** (1), 24–35 [in Russian].
41. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2018). Dependence of the amplitude of the infrasonic wave generated by the Tungus cosmic body, from a distance. *Radiophysics and Radioastronomy*, **23** (2), 94–103 [in Russian].
42. Chernohor L. F., Shevelev N. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (3), 59–75 [in Russian].
43. Chornohor L. F., Liaschuk O. I., Shevelev M. B. (2018). *Parameters of infrasonic signals in the atmosphere caused by a technogenic catastrophe near Vinnitsa: results and processing of data from the Ukrainian microbarographs net*. Fifth Conf. "Computational methods and systems of information transformation". Collection of papers. L'viv, 2018: Karpenko FMI of the NASU, 99–103 [in Ukrainian].
44. Arrowsmith S. J., ReVelle D. O., Edwards W. N., Brown P. G. (2008). Global detection of infrasonic signals from three large bolides. *Earth, Moon, and Planets*, **102**(№ 1–4), 357–363.
45. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. (1979). *J. Geophys. Res.*, **84C** (№ 4), 1735–1745.

46. Balachandran N. K., Donn W. L. (1971). Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets. *Geophys. J. International*, **26** (№ 1–4), 135–148.
47. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. (1977). Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*, **197** (№ 4298), 47–49.
48. Blanc E. (1985). Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. *Ann. Geophys.*, **3**, 673–688.
49. Blaunstein N. (2001). Method of earthquake prediction. The United States Patent No.: US 6,246,964 B1.
50. Brown P., Pack D., Edwards W. N., Revelle D. O., Yoo B. B., Spalding R. E., Tagliaferri E. (2004). The orbit, atmospheric dynamics, and initial mass of the Park Forest meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, **39**, № 11, 1781–1796.
51. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. (2015). Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **33** (№ 6), 276–290.
52. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Rozumenko V. T., Shevelev M. B. (2018). *Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv Un-ty, Kyiv, Ukraine, May 29–June 01, 2018. Book of Abstracts, 87–88.
53. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2019). *Parameters of infrasonic signals generated in the atmosphere by multiple explosions at an ammunition depot*. Proceedings of the XIX Intern. young scientists' conference on applied physics (May 21–25, 2019). Kyiv, 2019, 100–101.
54. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (3), 147–160.
55. Chernogor L. F., Qiang Guo, Rozumenko V. T., Shevelev M. B. (2018). The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University*, Kyiv, Ukraine, May 29–June 01, 2018. Book of Abstracts, 89–90.
56. Che Y., Park J., Kim I. (2014). Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophysical J. International*, **198**, № 1, 495–503.
57. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. (1993). The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, **361** (№ 6407), 40–44.
58. Cook R. K., Young J. M. (1962). Strange Sounds in the Atmosphere. Part II. *Sound: Its Uses and Control*, **1** (3), 25–33.
59. Donn W. L. (1978). Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *American Scientist*, **66** (№ 6), 724–733.
60. Donn W. L., Balachandran N. K. (1981). Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Airwaves and explosive yield. *Science*, **213** (№ 4507), 539–541.
61. Donn W. L., Posmentier E., Fehr U., Balachandran N. K. (1967). Infrasound at long range from Saturn V, 1967. *Science*, **162** (№ 3858), 1116–1120.
62. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. (2006). Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **68**, 1136–1160.
63. ElGabry M. N., Korrat I. M., Hussein H. M., Hamama I. H. (2017). Infrasound detection of meteors. *NRIAG J. Astronomy and Geophysics*, **6** (№ 1), 68–80.
64. Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N. (2012). Infrasound production by bolides: A global statistical study. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **80**, 208–229.
65. Galperin Yu., Hayakawa M. (1996). On Magnetospheric Effects of Experimental Ground Explosions Observed From AU-REOL-3. *Geoelectric*, **48**, 1241–1263.
66. Galperin Yu., Hayakawa M. (1998). On possibility of parametric amplifier in the stratosphere — mesosphere suggested by active MASSA experiments with the AUREOL-3 satellite. *Earth Planets Space*, **50**, 827–832.
67. Gi N. (2017). Using Bolide Airwaves To Estimate Meteoroid Source Characteristics and Window Damage Potential. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, **4688**, 165 p. URL: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4688> (Last accessed 17.07.2019).
68. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (2000). Lithosphere — ionosphere coupling and its modeling. *Russian J. Earth Sciences*, **2**, 95–108.
69. Gotynyan O. E., Ivchenko V. M., Rapoport Yu. G., Parrot M. (2003). Ionospheric disturbances excited by the lithospheric gas source of acoustic gravity waves before earthquakes. *Space Science and Technology*, **9**, Suppl. No. 2, 89–105.
70. Koshevaya S. V., Grimalsky V. V., Perez-Enriquez R., Kotsarenko A. (2006). Increase of the Transparency for Cosmic Radio Waves due to the Decrease of Density of the Ionosphere Caused by Acoustic Waves. *Physica Scripta*, **72** (1), 91.
71. Koshevaya, S., Kotsarenko, Yu., Escobedo, J. A., Kotsarenko and Yutsis, V. A. (2014). Cosmic Radio Waves Caused by Seismic Volcano Activities. *J. Electromagnetic Analysis and Applications*, **6**, 335–341. URL: <http://www.scirp.org/journal/jemaa>, <http://dx.doi.org/10.4236/jemaa.2014.611034> (Last accessed 17.07.2019).

72. Koshevaya S., Makarets N., Grimalsky V., Kotsarenko A., Perez Enríquez R. (2005). Spectrum of the seismic-electromagnetic and acoustic waves caused by seismic and volcano activity. *Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union*, **5** (2), P. 203–209. HAL Id: hal-00299144. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299144> (Last accessed 17.07.2019).
73. Koshovyy V. V., Ivantyshyn O. L., Lozynskyi A. B., et al. (1997). Radiophysical complexes for cosmic investigations based on Ukrainian radiotelescope URAN-3. *Asta Cosmologica. FASCICULUS XXIII-2*, 67–70.
74. Kotsarenko N. Ya., Soroka S. A., Koshevaya S. V., Koshovyy V. V. (1999). Increase of the transparency of the ionosphere for cosmic radiowaves caused by a low frequency wave. *Physica Scripta*, **59** (№ 2), 174–181.
75. Krasnov V. M., Kuleshov Yu. V. (2014). Variation of infrasonic signal spectrum during wave propagation from Earth's surface to ionospheric altitudes. *Acoust. Physics*, **60** (No. 1), 19–28. DOI: 10. 1134/S1063771013060109.
76. Landès, M., Ceranna L., Le Pichon A. (2012). Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network. *J. Geophys. Res.*, **117D** (No. 6). DOI: 10. 1029/2011JD016684.
77. Le Pichon A., Blanc E. Hauchecorne A. (Eds). (2010). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. New York: Springer Science+Business Media, 735 p.
78. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C. V., Liperovskaya E. V. (2008). Physical models of coupling in the lithosphere — atmosphere — ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, **48** (№ 6), 795–806.
79. Liszka L. (2008). *Infrasound: a summary of 35 years of infrasound research*. Swedish Institute of Space Physics. 150 p.
80. Meteor Infrasound. What is Infrasound? The Department of Physics and Astronomy, the University of Western Ontario, Meteor Physics. URL: http://meteor.uwo.ca/research/infrasound/is_whatIS.html (Last accessed 17.07.2019 p.)
81. Olson J. (2012). Infrasound rocket signatures. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, **1**, 82.
82. Parrot M., Hayosh M., Soroka S. O. (2007). Acoustic experiments in the ionosphere with the DEMETER satellite. EGU General Assembly, Vienna, 15–20 April 2007, 1607-7962/gra/EGU2007-A-04428.
83. Pichon A., Garcés M., Blanc E., Barthelemy M., Drob P. (2002). Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *J. Acoustical Soc. Amer.*, **111** (№ 1), 629–641.
84. Ponomarev E. A., Erushchenkov A. I. (1978). Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*, **20** (№ 12), 1218–1229.
85. Proksch N. (2017). *Lightning detection with infrasound*. Master's Thesis. Utrecht University. Royal Netherlands Meteorological Institute, 53 p.
86. Rapoport V. O., Bessalov P. A., Mityakov N. A., Parrot M., Ryzhov N. A. (2004). Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **66**(12), 1011–1017. DOI 10. 1016/j. jastp. 2004. 03. 010.
87. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Koshovyy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Nogach R. T., Selivanov Yu. A., Grimalsky V. V., Mezentshev V. P., Karataeva L. M., Ivchenko V. M., Milinevsky G. P., Fedun V. N., Tkachenko E. N. (2017). Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. *Ann. Geophys.*, **35**, 53–70. DOI: 10. 5194/angeo-35-53-2017.
88. Reed J. W. (1987). Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. *J. Geophys. Res.*, **92D** (№ 10), 11979–11992. DOI: 10. 1029/JD092iD10p11979.
89. Sakurai A. (1965). *Blast wave theory*. Basic developments in fluid dynamics. Holt M. (ed). New York: Academic Press, Vol. 1, 309–375.
90. Savina O. N., Bessalov P. A. (2015). Ionospheric Response to the Acoustic Gravity Wave Singularity. *Acta Geophysica*, **63**(1), 319–328 DOI: 10. 2478/s11600-014-0246-1. URL: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/> (Last accessed 17.07.2019).
91. Silber E. A., Brown P. G. (2014). Optical observations of meteors generating infrasound. I. Acoustic signal identification and phenomenology. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **119**, 116–128.
92. Silber E. A., Brown P. G., Krzeminski Z. (2015). Optical observations of meteors generating infrasound: weak shock theory and validation. *J. Geophys. Res.: Planets*, **120** (№ 3), 413–428.
93. Silber E. A. (2014). Observational and Theoretical Investigation of Cylindrical Line Source Blast Theory Using Meteors. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, Paper 2112, 582 p.
94. Soroka S. O., Kalita B. I., Karataeva L. M., et al. (2006). Active acoustic experiments with the satellite DEMETER. *International Conference DEMETER*, Toulouse, 14–16 June 2006.
95. Whipple F. J. W. (1930). The great Siberian meteor, and the waves, seismic and aerial, which it produces. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **56** (№ 236), 287–301.

Received 17.07.2019

*В. В. Кошовий*¹, вед. науч. сотруд., канд. техн. наук. Лауреат Гос. премии Украины в области науки и техники
E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua; volodymyrkoshovy@gmail.com

*О. Л. Ивантишин*¹, зав. лаб., канд. техн. наук

*Р. Т. Ногай*², науч. сотруд.

*Л. Ф. Черногор*³, д-р физ.-мат. наук, проф., Лауреат Государственной премии УРСР в области науки и техники, дважды Лауреат Премии Совета Министров СССР, Лауреат Премии МВССО СССР,

Заслуженный деятель науки и техники Украины

*З. Т. Назарчук*¹, директор, д-р физ.-мат. наук, проф., акад. НАН Украины. Лауреат Гос. премии Украины в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины

*Н. О. Мельник*², зав. отделом, канд. техн. наук

*Б. И. Калита*², зам. зав. отделом

*Б. С. Харченко*¹, зав. сектором

*И. М. Романишин*¹, старш. науч. сотруд., канд. техн. наук

*А. Б. Лозинский*¹, мл. науч. сотруд.

*Б. П. Русин*¹, зав. отделом, д-р техн. наук, проф.

*Л. М. Каратаева*², мл. науч. сотруд.

*З. И. Любинецкий*², зам. зав. лаб.

*Л. В. Алёхина*², зав. лаб.

*В. К. Липский*², зав. сектором

¹ Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины

ул. Наукова 5, Львов, Украина, 79053

² Львовский центр Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины

ул. Наукова 5А, Львов, Украина, 79060

³ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

Площадь Свободы 4, Харьков, Украина, 61022

ИСКУССТВЕННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЫ

Статья посвящена исследованию некоторых возможностей реализации искусственной акустической модификации околоземной среды от поверхности Земли до ионосферных высот, используя наземный управляемый акустический излучатель инфразвукового диапазона. Проанализированы результаты предыдущих исследований, а также рассмотрены характерные параметры инфразвука, генерируемого природными явлениями и рукотворными процессами, а также особенности его влияния на состояние околоземной среды. Обоснованы основные условия реализации искусственной акустической модификации ионосферы. Приведены и обсуждены результаты первого этапа верификации предложенной методологии. Для ее верификации использованы: радиоастрономический метод дистанционного зондирования ионосферы, радиоизлучение космических радиоисточников как зондирующее, наземный комплекс акустико-электромагнитного зондирования ионосферы в составе радиотелескопа УРАН-3 и наземного управляемого акустического излучателя параметрического типа. Первый этап верификации проводили на частотах, близких к верхней границе инфразвукового диапазона (~ 30 Гц). Предварительный анализ полученных результатов подтвердил, что уже в случае наземной генерации инфразвука с частотой $f \sim 30$ Гц в околоземном пространстве могут существовать условия, позволяющие реализовать управляемую акустическую модификацию ионосферы и выявлять слабые акустико-ионосферные возмущения. Последние могут формироваться в ионосфере при определенных состояниях плазмы, а также при состояниях среды приземной и верхней атмосферы, которые, в свою очередь, определяют погодные условия в приземном слое и влияют на параметры генерации и распространения атмосферных акустических волн. Следующий этап работы предполагает исследование возможностей реализации искусственной акустической модификации ионосферы с использованием наземного управляемого акустического излучателя в частотном диапазоне 2...10 Гц.

Ключевые слова: околоземное пространство, искусственная акустическая модификация ионосферы, наземный управляемый акустический излучатель, радиотелескоп УРАН-3, акустико-ионосферные возмущения, радиоастрономический метод, трансмиссионный радиосигнал, расширенный спектральный анализ.

*V. V. Koshovyy*¹, Chief Researcher, Cand. Sci. in Engineering, Laureate of the State Prize in Science and Technology, Head of the Shatsk Interdepartmental Scientific Research Laboratory of Ecology

E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua; volodymyrkoshovyy@gmail.com

*O. L. Ivantyshyn*¹, Head of Laboratory, Cand. Sci. in Engineering

*R. T. Nogach*², Researcher

*L. F. Chernogor*³, Dr. Sci., Professor, Laureate of the State Prize in Science and Technology of the Ukrainian SSR, twice Laureate of the USSR Council of Ministers Prize, Laureate of the USSR MVSSO Prize, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

*Z. T. Nazarchuk*¹, Director of Institute, Acad. NAS of Ukraine, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

*M. O. Melnyk*², Head of Department, Cand. Sci. in Engineering

*B. I. Kalita*², Deputy Head of Department

*B.C. Kharchenko*¹, Head of Division

*I.M. Romanyshyn*¹, Senior Researcher, Cand. Sci. in Engineering

*A. B. Lozynskyi*¹, Research Assistant

*B. P. Rusyn*¹, Head of Department, Dr. Sci. in Engineering, Professor

*L. M. Karatayeva*², Research Assistant

*Z. I. Lyubinetsky*², Deputy Head of Laboratory

*L. V. Alyohina*², Head of Laboratory

*V. K. Lipsky*², Head of Section of devices construction

¹ Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

5 Naukova Str., L'viv, 79053 Ukraine

² L'viv Center of the Space Research Institute of the NAS of Ukraine and SSA of Ukraine

5A, Naukova Str., L'viv, 79060 Ukraine

³ V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

ARTIFICIAL ACOUSTIC MODIFICATION OF THE NEAR-EARTH ENVIRONMENT

The article is devoted to the study of some possibilities of implementing artificial acoustic modification of the near-Earth medium from the Earth's surface to ionospheric heights using a ground-based controlled acoustic infrasonic emitter. The results of previous studies are analyzed, and the characteristic parameters of infrasound generated by natural phenomena and man-made processes, as well as the features of its influence on the state of the near-Earth environment, are examined. The basic conditions for the implementation of artificial acoustic modification of the ionosphere are substantiated. The results of the first stage of the verification of the proposed methodology are presented and discussed. For the verification, we used: the radio astronomy method of remote sensing of the ionosphere, the radio emission of space radio sources as sounding ones, the ground-based complex of the acoustic-electromagnetic sounding of the ionosphere as a part of the URAN-3 radio telescope and the ground-based acoustic emitter of the parametric type. The first stage of the verification was carried out at frequencies close to the upper boundary of the infrasound range (~30 Hz). A preliminary analysis of the obtained results confirmed that even in the case of ground-based infrasound generation with a frequency of $f \sim 30$ Hz, conditions might arise in the near-Earth space that allow the realization of controlled acoustic modification of the ionosphere and the detection of weak acoustic-ionospheric disturbances. The latter can be formed in the ionosphere under certain plasma conditions, as well as in environmental conditions of the surface and upper atmosphere, which, in turn, determine the weather conditions in the surface layer and affect the parameters of generation and propagation of atmospheric acoustic waves. The next stage of the work will involve the study of the possibilities of implementing artificial acoustic modification of the ionosphere using a ground-based controlled acoustic emitter in the frequency range 2...10 Hz.

Keywords: near-Earth space, artificial acoustic modification of the ionosphere, ground-based controlled acoustic emitter, URAN-3 radio telescope, acousto-ionospheric disturbances, radio astronomy method, transmission radio signal, advanced spectral analysis.