

О. К. Черемних<sup>1</sup>, В. В. Гримальський<sup>2</sup>, О. Л. Івантишин<sup>3</sup>, В. Н. Івченко<sup>4</sup>, Л. В. Козак<sup>4</sup>, В. В. Кошовий<sup>3</sup>,  
В. П. Мезенцев<sup>5</sup>, М. Е. Мельник<sup>5</sup>, Р. Т. Ногач<sup>5</sup>, Ю. Г. Рапопорт<sup>4,1</sup>, Ю. О. Селіванов<sup>1</sup>, І. Т. Жук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України, Київ

<sup>2</sup> Національний інститут астрофізики, оптики і електроніки, Мехіко

<sup>3</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів

<sup>4</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>5</sup> Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України  
і Державного космічного агентства України, Львів

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШТУЧНОЇ АКУСТИЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ АТМОСФЕРИ ТА ІОНОСФЕРИ

*В 2013—2014 рр. в Україні було проведено два комплексних наземно-космічних експерименти з вивчення ефектів акустичного збурення іоносфери. Аналіз отриманих даних разом з експериментальними даними попередніх років дав нові знання про вплив низькочастотного звуку (в тому числі інфразвуку) на верхню атмосферу та іоносферу і відкрив перспективні напрямки подальших досліджень. В орбітальному сегменті космічні використовувались апарати DEMETER та «Чибіс-М», а в наземному — наземний низькочастотний акустичний випромінювач ННАВ (ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ), радіотелескоп УРАН-3 ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів). При аналізі виявлено періодичні та аперіодичні варіації статистичних характеристик даних і їхню кореляцію з приходом штучних акустичних збурень. Вперше розроблені фізико-математична модель та числовий алгоритм для моделювання поширення випромінювання ННАВ на шляху від поверхні Землі до іоносфери з урахуванням реальних параметрів середовища. Запропоновано вдосконалену схему проведення подальших наземно-космічних акустичних експериментів.*

**Ключові слова:** динамічні процеси, іоносфера, дія акустичного випромінювання, системний спектральний аналіз, радіофізичні методи.

### ВСТУП

Понад півстолітні дослідження акустичного впливу на іоносферу від наземних джерел (хімічні та ядерні вибухи, старту ракет-носіїв, землетруси) дали змогу виділити їхні основні ефекти. За результатами потужних вибухів, наприклад в експериментах МАССА [1] у 1982 р., було встановлено такі ефекти акустичної дії на іоносферу:

1. Просторово розподілена та довготривала активність акустико-гравітаційних і МГД-хвиль в іоносфері, ініційована імпульсним акустичним збуренням, що спостерігалась протягом приблизно 1 год на відстанях 250—1000 км від джерела.

2. Солітоноподібні збурення, ініційовані акустичним імпульсом в іоносфері, що вимірювались як короткотривалі (менше 0.1 с) магнітні імпульси на висотах F-області іоносфери.

3. Довготривала пляма плазмової турбулентності в іоносфері, ініційована акустичним збуренням, спостерігалась як область низькочастотної (50—5000 Гц) електростатичної турбулентності.

© О. К. ЧЕРЕМНИХ, В. В. ГРИМАЛЬСЬКИЙ, О. Л. ІВАНТИШИН,  
В. Н. ІВЧЕНКО, Л. В. КОЗАК, В. В. КОШОВИЙ,  
В. П. МЕЗЕНЦЕВ, М. Е. МЕЛЬНИК, Р. Т. НОГАЧ,  
Ю. Г. РАПОПОРТ, Ю. О. СЕЛІВАНОВ, І. Т. ЖУК, 2015

4. Нелінійна трансформація акустичного імпульсу в електромагнітні збурення в іоносфері.

5. Вихрова довготривала іоносферна структура, ініційована акустичним імпульсом, локалізована поблизу епіцентрів вибухів в інтервалі висот 150—500 км та з горизонтальним розміром в кілька сотень кілометрів.

Ці ефекти викликали інтерес і до інших наземних та приземних джерел звуку, що розвивався в напрямках: 1) вивчення іоносферних провісників землетрусів, вивержень вулканів, тайфунів; 2) вивчення шкідливого впливу на іоносферу запусків ракет-носіїв, польотів міжконтинентальних авіалайнерів; 3) вивчення можливостей дослідження іоносфери шляхом цілеспрямованого (програмованого) акустичного впливу на неї за аналогією з відомими системами HAARP (США) та «Сура» (РФ).

Спільним знаменником у всіх вказаних проблемах є проблема енергетичної достатності впливу. Питання про достатність потужності акустичного джерела для появи іоносферного відгуку є також і питанням про умови «акустичної прозорості» атмосфери. Іншим важливим питанням є характер іоносферного відгуку та можливість його виділення на фоні звичайного іоносферного шуму. Дослідження авторів даної роботи лежать саме в цьому колі проблем.

В 2013 — 2014 рр. в Україні було проведено два комплексних наземно-космічних експерименти з вивчення ефектів акустичного збурення іоносфери. Автори експериментів (і даної публікації) використали в орбітальному сегменті космічні апарати DEMETER та «Чибіс-М», а в наземному — наземний низькочастотний акустичний випромінювач ННАВ (ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ) та радіотелескоп УРАН-3 (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів). Для виконання аналізу також було зібрано та систематизовано унікальні дані наземно-космічних експериментів минулих років щодо збурення іоносфери за допомогою ННАВ. За даними супутника DEMETER виявлено ефект збільшення прозорості іоносфери для електромагнітних хвиль ДНЧ-діапазону під дією акустичного випромінювача. Встановлено наявність ефекту приблизно в 70 % випадків. Аналогічний ефект виявлено за допомогою

вимірювань галактичного тла радіотелескопом УРАН-3. В даних вимірювань супутника «Чибіс-М» (12.11.2014 р., висота орбіти 340 км) знайдено дві події (аномальні хвильові збурення  $z$ -компонента магнітного поля), що за часом появи можуть бути ідентифіковані як реакція на акустичний імпульс. На основі аналізу даних було розроблено нову фізико-математичну модель та числовий алгоритм для моделювання особливостей розповсюдження випромінювання акустичного генератора на шляху до іоносфери. Критичне вивчення проведених експериментів дало змогу розробити проект нового комплексного експерименту, з тим, щоб його результати лягли в основу досліджень з програмованого акустичного впливу на іоносферу та моделювання впливів природних стихійних явищ з метою їхнього передбачення.

#### **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ**

Проведено підбір, систематизацію і подання даних щодо низькочастотних акустичних експериментів в атмосфері та іоносфері, зокрема за участю КА DEMETER і «Чибіс-М» та радіотелескопа УРАН-3. На основі зібраних та систематизованих в ЛЦ ІКД даних наземно-космічних експериментів з акустичного впливу на іоносферу створено першу чергу інформаційно-аналітичної системи КОДІОНА (КОмплексні Дослідження ІОносферної Акустики) Каталог файлів даних містить дані експериментів за період з 2005 по 2013 рік, файли опису структури подання (формату) даних, файли траєкторної інформації (для експериментів за участю космічних засобів) — всього 495 файлів загальним обсягом більш ніж 15 Гбайт. Другий каталог — наборів даних за сеансами вимірювань — містить інформацію про кількість даних, отриманих в сеансі, їхнє розміщення в загальному файлі даних, час та, якщо потрібно, координати, що відповідають початку та завершенню сеансу, графічні файли QuickLook для даних та картографічні файли для просторової конфігурації під час сеансу (для низки наборів даних). Сукупність цих даних дозволяє провести аналіз впливу форми, тривалості штучних акустичних збурень на стан іоносфери при різних параметрах метеорологічної обста-

новки і стану сонячної активності (рентгенівські сонячні спалахи).

Зроблено аналіз статистичних методів і підходів, які можна використати для аналізу збурень параметрів при акустичних експериментах в іоносфері для визначення типу динамічних процесів (ламінарний чи турбулентний процес та тип турбулентного процесу). Для подальшого аналізу динамічних процесів було відібрано три незалежні підходи: аналіз функції густини ймовірностей флуктуацій вимірюваних параметрів, аналіз ексцесу та аналіз структурних функцій високих порядків.

Розроблено аналітичну модель та алгоритм чисельного моделювання динамічних процесів в атмосфері, пов'язаних з акустичними експериментами. Розвинуті теоретична модель та алгоритм включають, відповідно, чисто гідродинамічний підхід до ЗХ/АГХ в нелінійній стратифікованій неізотермічній та дисипативній атмосфері та спектрально-різницевий чисельний алгоритм. Розглядається наземне джерело хвиль заданої форми, що якісно відповідає апертурі наземного генератора звуку, і враховуються відповідні початково-граничні умови, що відповідають наявності двох «несучих» частот 625 Гц та 600 Гц, що випромінюються акустичним генератором. Розглядаються швидкості середовища порядку 300 м/с на рівні Землі  $Z \sim 300$  м/с. Враховується також наявність низькочастотної модуляції. Вперше побудована тристадійна гідродинамічна модель проникнення з нижньої атмосфери в іоносферу «звукові хвилі (ЗХ) з несучою частотою» — «ЗХ з різницевою частотою» — «атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) з модуляційною частотою». Аналітичний підхід призводить до рівнянь типу Хохлова — Заболотької для стратифікованого неізотермічного середовища. Алгоритм для моделювання заснований на спектрально-різницевому чисельному методі.

Отримані результати аналізу та інтерпретації експериментальних даних на основі порівняння з ними теоретичних результатів. Вперше отримані результати попередніх розрахунків за тристадійною гідродинамічною моделлю проникнення з нижньої атмосфери в іоносферу «звукові хвилі (ЗХ) з несучою частотою» — «ЗХ з різницевою частотою» — «атмосферні гравітаційні хвилі

(АГХ) з модуляційною частотою». При вхідних швидкостях порядку 300 м/с в атмосферу проникають АГХ зі швидкостями порядку декількох метрів за секунду. Стадії 1, 2 та 3 проникнення ЗХ/АГХ від наземного звукового генератора в іоносферу відбуваються в областях висот 0—0.1 км, 0.1—10 км та від 10 км до іоносферних висот відповідно. Спостерігалися ефекти «електромагнітного просвітлення» (підвищення інтенсивності відповідних хвиль) іоносфери в ДНЧ- (кГц) діапазоні в результаті впливу звукового генератора при проходженні електромагнітних хвиль ДНЧ-діапазону «знизу вгору», при чому використовувалися як випромінювачі (наземні) навігаційні станції РСДН-20 («Альфа») з частотами 11, 13 і 15 кГц, а прийом вівся бортовою апаратурою супутника DEMETER. Ефект «просвітлення» спостерігався також при проходженні електромагнітних хвиль ДНЧ/вістлерного діапазону «згори вниз», при чому використовувалися наземні ДНЧ-приймачі. «Просвітлення іоносфери» в результаті дії звукового генератора спостерігалось також для електромагнітних хвиль МГц-діапазону від космічних джерел (галактичні радіоemisії), що приймалися за допомогою радіотелескопа УРАН-3. Гіпотетично можливими ефектами, що пояснюють вплив на іоносферу, що спричиняє звуковий генератор є: 1) трансформація УНЧ АГХ у плазмові хвилі (можливо, в *E*-шарі); 2) «лінзування» (або зміна ефектів затухання/розсіяння) для радіохвиль в кГц- (вістлерному) ДНЧ-діапазоні та зміна ефектів затухання/розсіяння в МГц-діапазоні. Оцінки дають, що типові розміри «області дії» акустичного генератора в іоносфері відповідають декільком довжинам хвиль вістлерного (ДНЧ) діапазону, що відповідає можливості утворення відповідної лінзи для електромагнітних хвиль. Основні результати, викладені в даному параграфі, опубліковані в роботах [7, 15—18].

#### ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ НА 2015 р. І ДАЛІ

**Унікальність експерименту.** 1. З точки зору фізики дії на іоносфері, це єдиний в світі, на даний час, активний експеримент зі штучного акустичного впливу на іоносфері.

2. З точки зору енергетики — потужність близька до мінімально можливої/порогової величини [11, 14], при якій ще можна зареєструвати дію на іоносферу. Це є важливим і саме по собі. Потужність менша, ніж для всіх інших відомих випадків, коли, як відомо, реалізувалися ефекти фізичних зв'язків нижньої атмосфери з літосферою, в тому числі пов'язані з землетрусами, циклонами, стартаками ракет та ін. Це дозволяє реєструвати «тригерні ефекти» виділення енергії в системі «літосфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЛАІМ)». Це виділення *значної* енергії може відбуватися за рахунок відносно слабкої дії від «зовнішнього джерела», в даному випадку звукових хвиль (ЗХ)/атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) від звукового генератора.

3. Вплив на іоносферу від звукового генератора може призводити до оптичного ефекту згідно з даними [2, 3], а саме — до «зеленої» оптичної емісії кисню (551.7 нм) на висотах Е-області іоносфери (110—120 км). Але це відповідає «оптичній енергії» порядку 1 еВ, або підвищенню електронної температури до 11000 К. Згідно з нашими оцінками, це з великою імовірністю означає наявність певних «тригерних ефектів». Такий експеримент, виходячи з сучасних оптичних засобів, може бути зараз проведений навіть ефективніше, ніж в роботах [2, 3]. Якщо результати [2, 3] будуть підтверджені, це буде означати не тільки підтвердження штучного акустичного впливу на іоносферу, а й вкаже на підтвердження наявності тригерних ефектів. Це дуже важливо і для фізики сейсмоіоносферної взаємодії та космічної погоди.

**Фундаментальне значення експерименту.** 1. В даному експерименті створено «ідеальні» умови для знаходження так званих «тригерних ефектів» в іоносфері [5, 6, 8, 13, 19]. При цьому можуть бути виявлені та досліджені нові комбіновані типи нестійкостей в системі ЛАІМ, наприклад, типу «гідродинамічні-фотохімічні-теплові-струмові-плазмові». При цьому принципово важливим є дослідження ролі аерозолів [2, 39, 10].

2. Даному експерименту характерні сильна нелінійність та турбулентність в нижній атмосфері та відносно слабкий атмосферно-гравітаційно-хвильовий сигнал в іоносфері, що дає можливість

експериментально вивчити «мезомасштабні» з точки зору перетворень енергії явища, де є і «сильні» і «слабкі» впливи в одному експерименті.

**Значення для сейсмоіоносферних досліджень та космічної погоди.** Ці експерименти дають можливість вивчити механізми сейсмоіоносферної взаємодії, космічну погоду, а саме природу універсальної інфразвукової взаємодії та акустично-електромагнітного зв'язку в системі ЛАІМ [2, 6, 8, 13]. Сюди включається збудження інфразвуку природними та штучними джерелами в нижній атмосфері/літосфері, від полярних сьайв, блискавок, механічну складову МГД-збурень, що проникають в систему ЛАІМ/МІАЛ від сонячного вітру, вплив АГХ на шуманівський та альвенівський резонатори і т. д.

**Метод когерентно-некогерентного акустичного впливу на іоносферу.** Попередні теоретичні оцінки показують, що група некогерентних імпульсів від штучного наземного акустичного джерела може проникати з нижньої атмосфери до іоносфери значно ефективніше, ніж один когерентний сигнал з сумарною інтенсивністю. Це відкриває шлях для реалізації нового методу цілеспрямованого когерентно-некогерентного акустичного впливу на іоносферу «знизу».

## ВИСНОВОК

На основі викладених вище результатів досліджень перелічимо роботи, що плануються на майбутнє.

1. Проведення додаткових числових розрахунків за розвиненими моделями для інтерпретації експериментальних даних та планування подальших експериментів. Подальший розвиток теоретичної моделі для моделювання прямих іоносферних ефектів від генератора звуку. Подальший розвиток теоретичної моделі для моделювання впливу на іоносферу когерентно-некогерентних сигналів з метою: а) дослідження фізичного механізму дії генератора звуку на іоносферу, б) розуміння механізмів сейсмоіоносферного зв'язку, в) розробки алгоритмів цілеспрямованої акустичної дії на іоносферу.

2. Попередня робота для виявлення технічної можливості проведення експериментів з вимірювань спектру акустичних збурень в області ви-

сот та радіусів порядку декількох кілометрів від акустичного генератора. Це буде дуже корисним як для розуміння фізики впливу акустичного генератора на іоносферу, так і для розуміння механізмів сейсмоіоносферного зв'язку та планування наступних експериментів.

3. Обробка даних експериментів із супутником DEMETER з виявлення збурень іоносфери під впливом атмосферних акустичних збурень в умовах різної сонячної активності. Розгляд експериментальних даних з точки зору причин, що призводили до відсутності ефектів у іоносфері від генератора звуку або можливості «хибного спрацювання» у відсутності ефекту від звукового генератора.

4. Проведення спільних експериментів з радіотелескопом УРАН-3 з виявлення збурень іоносфери від впливом акустичних хвиль в атмосфері в умовах різної сонячної активності. Включення дослідження акусто-оптичного та аерозольного ефектів у атмосфері та іоносфері з метою підтвердження наявності «тригерних» ефектів акустичного атмосферно-іоносферного зв'язку.

5. Аналіз даних моніторингу атмосферного інфразвуку для виявлення його взаємозв'язку з сейсмічними явищами з наміром показати, що інфразвук є їхнім передвісником.

6. Проведення проектних робіт, виготовлення і монтажних робіт для можливості плавного перестроювання частоти випромінювання стаціонарного акустичного випромінювача. Проведення робіт з підтримки дієздатності мобільного акустичного випромінювача потужністю 550 кВт.

7. Комплексне та цілеспрямоване наземно-супутникове дослідження штучного акустичного впливу на атмосферу та іоносферу за допомогою широкого класу радіофізичних та оптичних методів та інструментів, зокрема дослідження аерозольних ефектів.

1. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферное взаимодействие и его моделирование // Российский журн. наук о Земле. — 2010. — 2. — С. 95—108.
2. Негода А. А., Сорока С. А. Акустический канал космического влияния на биосферу Земли // Космична наука і технологія. — 2001. — 7, № 5/6. — С. 85—93.

3. Aramyán A. R., Galechyan G. A., Harutyunyan G. G., et al. Modeling of interaction of acoustic waves with ionosphere // IEEE Transactions on Plasma Sci. — 2008. — 36, N 1. — P. 305—309.
4. Arrowsmith S. J., Johnson J. B., Drob D. P., Hedlin M. A. H. The seismoacoustic wavefield: a new paradigm in studying geophysical phenomena // Revs Geophys. — 2010. — 48, RG4003. — P. 8755—1209. — (Paper N 2010RG000335).
5. Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. M. Hayakawa. — Tokyo: TERRAPUB, 1998. — P. 777—787.
6. Bespalov P. A., Savina O. N. Possibility of magnetospheric VLF response to atmospheric infrasonic waves // Earth Planets Space. — 2012. — 64. — P. 451—458.
7. Cheremnykh O. K., Klimov S. I., Koshoviy V. V., et al. Ground-space experiment on artificial acoustic modification of the ionosphere. The first results // Space Sci. and Technol. — 2014. — 20, N 6.
8. Hecht J. H. Instability layers and airglow imaging // Rev. Geophys. — 2004. — 42, RG1001.—12 p.
9. Hedlin M. A. H., Walker K., Drob D. P., de Groot-Hedlin C. D. Infrasonics: connecting the solid Earth, oceans, and atmosphere // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. — 2012. — 40. — P. 327—54.
10. Jing Liu, Jianping Huang, Xuemin Zhang. Ionospheric perturbations in plasma parameters before global strong earthquakes // Adv Space Res. — 2014. — 53. — P. 776—787.
11. Krasnov V. M., Kuleshov Yu. V. Variation of infrasonic signal spectrum during wave propagation from Earth's surface to ionospheric altitudes // Acoustic. Phys. — 2014. — 60. — P. 19—28.
12. Laštovička J., Baše J., Hruška F., et al. Simultaneous infrasonic, seismic, magnetic and ionospheric observations in an earthquake epicentre // J. Atmos. and Solar-Terrest. Phys. — 2010. — 72. — P. 1231—1240.
13. Meister C.-V., Mayer B., Dziendziel P., et al. On the acoustic model of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling before earthquakes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. — 2011. — 11. — P. 1011—1017.
14. Rapoport V. O., Bespalov P. A., Mityakov N. A., et al. Feasibility study of ionospheric perturbations triggered by monochromatic infrasonic waves emitted with a ground-based experiment // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2004. — 66. — P. 1011—1017.
15. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Grimalsky V. V., et al. Ionosphere as a sensitive indicator of powerful processes in the lower atmosphere/lithosphere, artificial acoustic influence and space weather // EMSEV 2014 International conference on electromagnetic phenomena associated with seismic and volcanic activities. Konstancin Jeziorna, Poland, 2014. — P. 133—135.
16. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., et al. The coupling phenomena in LAIM/MIAL system and active influence of the sound generator on the atmosphere

and ionosphere // 14-та Укр. конф. з космічних досліджень (8—12 вересня 2014 р., Ужгород): Абстракт. — Київ, 2014. — 1 с.

17. *Rapoport Yu., Selivanov Yu., Ivchenko V., et al.* Excitation of planetary electromagnetic waves in the inhomogeneous ionosphere // *Ann. Geophys.* — 2014. — 32. — P. 1—15.
18. *Rapoport Yu., Selivanov Yu., Ivchenko V., et al.* The new models of electromagnetic and hydromagnetic wave processes in the ionosphere. Possible applications to coupling phenomena in LAIM/MIAL system // *Astron. and Space Phys. (Annual Internat. Conf., Kyiv, Ukraine, May 27 — 30, 2014): Book of Abstrs.* — 2014 — 1 p.
19. *Seismo* electromagnetics: lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling / Eds Ma. Hayakawa, O. A. Molchanov. — Tokyo, TERRUPUB, 2002. — P. 363—370.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2014

*О. К. Черемных<sup>1</sup>, В. В. Гримальский<sup>2</sup>, О. Л. Ивантишин<sup>3</sup>, В. Н. Ивченко<sup>4</sup>, Л. В. Козак<sup>4</sup>, В. В. Кошовый<sup>3</sup>, В. П. Мезенцев<sup>5</sup>, М. Е. Мельник<sup>5</sup>, Р. Т. Ногач<sup>5</sup>, Ю. Г. Рапопорт<sup>4,1</sup>, Ю. О. Селиванов<sup>1</sup>, И. Т. Жук<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Государственного космического агентства Украины, Киев

<sup>2</sup> Національний інститут астрофізики, оптики і електроніки, Мехіко

<sup>3</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенко Національної академії наук України, Львов

<sup>4</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>5</sup> Львівський центр Інститута космічних досліджень Національної академії наук України та Государственного космического агентства Украины, Львов

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

В 2013—2014 гг. в Украине были проведены два комплексных наземно-космических эксперимента по изучению эффектов акустического возмущения ионосферы. Анализ полученных данных совместно с экспериментальными данными предыдущих лет дал новые знания о влиянии низкочастотного звука (в том числе инфразвука) на верхнюю атмосферу и ионосферу и открыл перспективные направления дальнейших исследований. Авторы публикации использовали в орбитальном сегменте космические аппараты DEMETER и «Чибис-М», а в наземном — наземный низкочастотный акустический излучатель ННАИ (ЛЦ ИКД НАНУ и ГКАУ), радиотелескоп УРАН-3 ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины (Львов). При анализе обнаружены периодические и аperiodические вариации статистических характеристик

данных и их корреляция с приходом искусственных акустических возмущений. Впервые разработаны физико-математическая модель и численный алгоритм для моделирования распространения излучения ННАИ на пути от поверхности Земли до ионосферы с учетом реальных параметров среды. Предложена усовершенствованная схема проведения дальнейших наземно-космических акустических экспериментов.

**Ключевые слова:** динамические процессы, ионосфера, действие акустического излучения, системный спектральный анализ, радиофизические методы.

*О. К. Черемных<sup>1</sup>, В. В. Гримальский<sup>2</sup>, О. Л. Ивантишин<sup>3</sup>, В. М. Ивченко<sup>4</sup>, Л. В. Козак<sup>4</sup>, В. В. Кошовый<sup>3</sup>, В. П. Мезенцев<sup>5</sup>, М. О. Мельник<sup>5</sup>, Р. Т. Ногач<sup>5</sup>, Ю. Г. Рапопорт<sup>4,1</sup>, Ю. А. Селиванов<sup>1</sup>, И. Т. Жук<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup> National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics, Mexico

<sup>3</sup> Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Lviv

<sup>4</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv

<sup>5</sup> Lviv Centre of Institute for Space Research

#### EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF ARTIFICIAL ACOUSTIC MODIFICATION OF THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

Two complex ground-space experiments to study effects of acoustic perturbations on the ionosphere were conducted in Ukraine in 2013—2014. The analysis of the obtained data together with experimental data of previous years gave a new knowledge on the influence of a low-frequency sound (including an infrasound) on the upper atmosphere and ionosphere and opened the perspective fields of further researches. We used in these experiments the DEMETER and «Chibis-M» satellites in an orbital segment, and a ground-based low-frequency acoustic emitter LFAE (Lviv Center of Space Research Institute of NASU and SSAU) and the URAN-3 radio telescope (Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, Lviv) in the ground segment. Analysis of the obtained data allows us to conclude that there are periodic and aperiodic variations in their statistical characteristics as well as correlation between the manifestation of the effect and the arrival of an acoustic wave to the ionosphere. At first the physical and mathematical models and novel numerical algorithm were developed for modeling of LFAE's radiation propagation from the ground to the ionosphere, which take into account real parameters of the environment. The advanced scheme of further combined ground-space acoustic experiments is offered.

**Key words:** dynamic processes, ionosphere, acoustic radiation action, system spectral analysis, radiophysical techniques.