

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.06.041>

УДК 550.388.2+520.6.05+534-6+520.27

Ю. О. Селіванов, Ю. Г. Рапопорт, О. К. Черемних

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ, Україна

ІОНОСФЕРНИЙ ВІДГУК НА АКУСТИЧНУ ДІЮ ЗА ДАНИМИ МІКРОСУПУТНИКІВ DEMETER ТА «ЧИБИС-М»

Активні наземно-космічні експерименти, виконані Інститутом космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІКД), Львівським центром Інституту космічних досліджень Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ЛЦ ІКД) та Фізико-механічним інститутом Національної академії наук України (ФМІ) у 2013 р. (з залученням мікросупутника «Чибис-М»), а у 2005 р. — ЛЦ ІКД спільно з ФМІ (з залученням мікросупутника DEMETER) були присвячені вивченню програмованого інфразвукового впливу на іоносферу Землі від акустичного джерела штучного походження. В даній роботі зосереджено увагу на вимірюваннях, виконаних вказаними супутниками під час активної дії наземного акустичного генератора. Дано описання специфіки експериментів, відповідних до цього методів аналізу даних, наведено деякі результати аналізу. Аналіз записів супутникових вимірювань низькочастотних варіацій електричного та магнітного полів в іоносфері на висотах 420 км (МС «Чибис-М») та 710 км (МС DEMETER) дозволив виявити проходження супутників крізь локалізовані області збудження, що відрізняються від оточуючого середовища іншою просторово-часовою варіабельністю. Аналіз просторово-часових зв'язків, які існували під час експериментів, дозволив інтерпретувати деякі із знайдених подій як кандидатів до збуджень, викликаних дією акустичного випромінювання наземного керованого акустичного випромінювача. Аналіз даних виконувався за допомогою реалізації методів ковзного нормованого медіанного абсолютного відхилення, вейвлетної ентропії у ковзному вікні та мультифрактального аналізу. Вироблено рекомендації щодо подальших етапів аналізу. Створене методичне та програмне забезпечення буде використано в дослідженнях космічного проекту «Іоносат-Мікро».

Ключові слова: активні наземно-космічні експерименти, іоносфера, програмований інфразвуковий вплив, наземний акустичний генератор, сучасні методи аналізу даних.

ВСТУП

Проблема вивчення взаємодії низькочастотних акустичних хвиль природного або штучного походження з іоносферою Землі набуває все більшої важливості з огляду на поширення таких небезпечних природних явищ, як потужні циклони, землетруси, виверження вулканів і різних техногенних катастроф [1, 21, 22, 28]. Останнім часом дослідники взяли до розгляду й такі потужні джерела можливого акустичного впливу на іоносферу: штатні та аварійні скидання води на потужних гідроелектростанціях [15], так звані «вітрові ферми» [14], де

на відносно невеликій площі зосереджено десятки вітроелектрогенераторів. До того ж інтенсивні бойові дії з використанням сучасного артилерійського та ракетного озброєння здійснюють хімічні (аерозольні) та, можливо, акустичні впливи на верхні шари атмосфери [7, 18]. Про актуальність проблеми свідчить збільшення кількості наукових публікацій [27—29] та увага, що приділяється останніми роками з боку відомств США, Китаю та РФ до таких досліджень [13]. Але слід зазначити, що всі вказані наукові роботи присвячені в основному вивченню впливу інфразвуку на іоносферу Землі від некерованих джерел, причому переважно природного походження.

© Ю. О. СЕЛІВАНОВ, Ю. Г. РАПОПОРТ, О. К. ЧЕРЕМНИХ, 2018

На відміну від цього ми вивчали програмований інфразвуковий вплив на іоносферу Землі за допомогою акустичного джерела штучного походження, як це мало місце у дослідженнях при проведенні активних наземно-космічних експериментів Інститутом космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ІКД), Львівським центром Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ЛЦ ІКД) та Фізико-механічним інститутом Національної академії наук України (ФМІ). Схеми експериментів та отримані результати достатньо вичерпно описані в низці публікацій [2, 4, 5, 22]. Одержані в керованих експериментах результати досліджень щодо впливу на верхні шари атмосфери та іоносферу певним чином сформованих інфразвукових хвиль від потужних технічних випромінювачів можуть бути ефективно використані при моделюванні дії на іоносферу інфразвуку від природних джерел небезпеки та техногенних катастроф. Крім того, як зазначено у роботах [5, 22], ми звертаємо увагу на фундаментальний характер, який набувають такі дослідження з огляду на розв'язання задачі визначення характеристик наземного сигналу та визначення його мінімальної потужності, за якої все ще є наявний відгук іоносфери, тобто задачі про ефективність впливу. Задача про оптимізацію поширення до іоносфери акустичного сигналу вже розглядається, але в дещо протилежному аспекті — щодо пошуку оптимальних параметрів атмосфери для зменшення енергетичних втрат сигналу на шляху до іоносфери [3]. В наших дослідженнях виявилось, наприклад, що до числа параметрів, за рахунок яких можна оптимізувати поширення акустичного сигналу до іоносфери, слід віднести також вид статистичного розподілу його фазових характеристик. Одним з позитивних наслідків такого дослідження може бути методика оцінювання «іоносферної ефективності» природних та техногенних акустичних джерел.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ми виходимо з того припущення, що відгук іоносфери на акустичну дію є її той чи інший не-

стабільний стан, у якому деякий час перебуває певна локальна область іоносфери. На сьогодні маємо досить великий масив інформації щодо явищ, спричинених акустичним впливом на іоносферу [1, 12, 16, 19]. В наших дослідженнях ми використовували уявлення про іоносферу як про «чутливий індикатор потужних процесів у нижній атмосфері та іоносфері», що було сформульоване в 2007—2008 рр. та описане у наших роботах [6, 21, 23, 24]. Але у випадку наземного акустичного генератора ЛЦ ІКД випромінювана енергія на один — чотири порядки величини менша за енергію землетрусу чи ядерного вибуху. Фактично генератор працює на межі «акустичного вікна прозорості» атмосфери, а його ефективність щодо іоносфери, як це було з'ясовано в експериментах та моделюванні, визначається застосованою в ньому каскадною схемою перетворення частот акустичного пакету при його поширенні до іоносфери [22].

Найбільш детальний відомий нам виклад ситуації з акустоіоносферними збуреннями зроблено в роботі В. В. Кошового [16], що базується на спостереженнях іоносфери за допомогою радіотелескопа УРАН-3 під час роботи такого ж акустичного генератора, який був використаний в наших експериментах. Було знайдено, що вплив є, а детектовані іоносферні ефекти, викликані низькочастотною акустичною хвилею від наземного керованого генератора, у першу чергу включають: короткочасне локальне зростання прозорості іоносфери для випромінювання від космічних джерел, зміни просторової структури та характерних розмірів маломасштабних неоднорідностей у певній області іоносфери, формування рухомих іоносферних неоднорідностей з різними швидкостями поширення.

Цікаві також викладені в цій роботі спостереження руху іоносферних збурень з вертикальною швидкістю порядку швидкості звуку. Разом з тим відмітимо, що згадані ефекти стосуються висот 100...300 км, що нижче типових орбіт дослідницьких супутників.

У роботі О. А. Похотелова з колегами [19] порівнюються результати супутникових вимірювань акустичних збурень іоносфери від двох

наземних вибухів з енергією в 1 тону TNT (слабке джерело з енергією 4.2 ГДж) та 4.8 кілотонн TNT (досить потужне джерело, 20 ТДж). Вважалося, що в першому випадку вдасться дослідити лінійні ефекти від слабого впливу, тоді як в другому — нелінійні ефекти потужного вибуху. Експеримент продемонстрував, що акустичний фронт генерує в іоносфері структуру маломасштабної турбулентності. У роботі зазначається, що збудження іоносферної турбулентності спостерігалось не лише в області над точкою вибуху, а і на відстанях порядку декілька сотень кілометрів від неї. На висотах спорадичного E_s -шару в цій області спостерігалась фрагментація неоднорідностей до типових просторово-часових масштабів, таких як 2...10 км та 1...2 с. Турбулізація плазми також спостерігалась в області, розташованій в нижній частині F -шару. Для пояснення механізму формування турбулентності у F -шарі у роботі [19] пропонувались два процеси. Один з них пов'язаний з турбулізацією нейтрального компонента іоносфери. Вірогідний район генерації турбулентності може лежати на висотах, де нелінійні акустичні пучки фокусуються. Другий же механізм, згідно з роботою [19], може спричинятись передачею турбулентного руху з динамо-області певними вертикально спрямованими струмами. Цьому механізму на основі інтерпретації спостережень та моделювання віддають перевагу також автори недавньої роботи [8], вказуючи на паралельні струми, що поширюються вздовж магнітного поля. Під час прольоту супутника крізь область, що відповідає «магнітній силевій трубці», пов'язаній з місцем вибуху (що проходить через низ іоносфери над місцем вибуху), було детектовано «шумову пляму», що містила низькочастотну (50...5000 Гц) електростатичну турбулентність. Формування такої «шумової плями», як вказано у роботі [8], було підтверджено і іншими експериментами, також були оцінені розміри «плями». Її початковий діаметр звичайно складав близько 200 км (принаймні для потужних вибухів) з центруванням на силевій трубці. Магнітні компоненти таких коливань, як правило, були дуже малі, тому збудження роз-

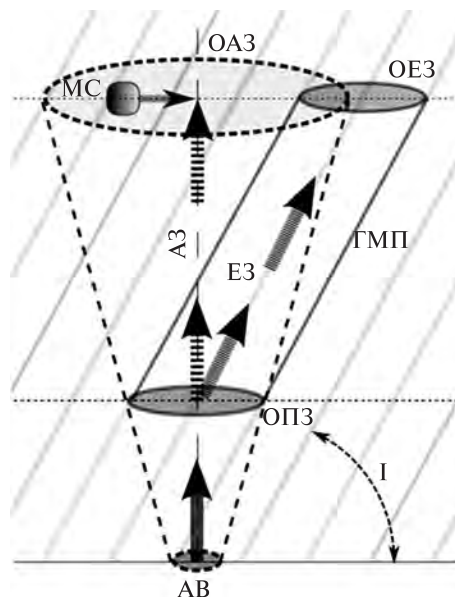


Рис. 1. Гіпотетична конфігурація зони експерименту: АВ — наземний акустичний випромінювач, ОПЗ — область первинного збурення в E -шарі іоносфери, АЗ — акустичне збурення, що поширюється в напрямку орбіти мікросупутника (МС), ОАЗ — гіпотетична область акустичного збурення на висоті орбіти МС, ЕЗ — електродинамічне збурення, що розповсюджується від ОПЗ вздовж силових ліній геомагнітного поля (ГМП), ОЕЗ — гіпотетична область ЕЗ на висоті орбіти МС, І — нахил ГМП, циліндр з основами ОПЗ та ОЕЗ — «силеві трубка акустичного збурення»

глядалися як електростатичні. Згідно з вимірюваннями коливання в околі магнітної трубки вибуху тривали до 35 хв після вибуху. У вказаній роботі також описано випадки, коли такі коливання в E -області з часом поширювались у радіальному напрямку («розпливання плями»).

Оскільки досі експерименти з наземним генератором не спрямовувались на вимірювання просторових структур в області очікуваного іоносферного відгуку, ми не можемо вважати властивості таких структур відомими. У такій ситуації наша основна гіпотеза зводиться до того, що область іоносферного відгуку повинна відрізнятися за критерієм нестійкості від навколишньої іоносфери. Тобто, статистика флуктуацій полів, які вимірюються супутником при прольоті через (гіпотетичну) область відгуку, повинна змінюва-

тись. Виходячи з результатів згаданих вище робіт, в нашій інтерпретації вимірювань ми розглядаємо гіпотетичну конфігурацію зони експерименту, зображену на рис. 1.

Слід зазначити, що ОАЗ буде мати скінченний розмір через те, що акустичні промені будуть відбиватись вниз на висоті, порівняній з ОПЗ, внаслідок наявності в атмосфері шару з градієнтом температури. Промені, що проходять вище, будуть належати конусу з кутом розкриття приблизно 40° .

Основне завдання, яке ми ставимо перед собою в цій роботі, полягає в тому, щоб орієнтовно оцінити розміри областей ОАЗ і ОЕЗ, їхнє можливе розташування та характер зміни флуктуацій електричного і магнітного полів в них. Ще одне припущення полягає в тому, що при розширенні області ОПЗ відбудеться розширення області передачі збурень ЕЗ, що призведе до збільшення області ОЕЗ.

ВІДБІР ДАНИХ

Дослідження, стисло описані в даній роботі, базуються на накопичених за майже три десятиліття великих обсягах вимірювальних даних у експериментах, проведених у ЛЦ ІКД, що не мають аналогів в світі. Значна частина таких даних була отримана при проведенні комплексних наземно-космічних експериментів, під час яких в космічному сегменті були задіяні мікросупутники (МС) DEMETER [11] та «Чибис-М» [5], а в наземному — інформаційно-вимірювальна система на базі радіотелескопа УРАН-3 [5, 16].

В даному дослідженні були використані бортові дані вимірювань електричного і магнітного полів в ДНЧ-діапазоні з DEMETER та «Чибис-М». Дані були зосереджені в БД КОДІОНА [4], ство-

реній спільно ІКД НАН України та ДКА України та ЛЦ ІКД у 2014 р. Всього доступними для використання є 168 файлів даних з МС DEMETER (2005 р.) та 33 файли даних з МС «Чибис-М» (2013 р.). Із 168 файлів МС DEMETER було вибрано сеанс вимірювань, який виконувався у схожих зовнішніх умовах (що контролювались в експерименті з МС «Чибис-М» і були реконструйовані для МС DEMETER), з можливо близькими частотами дискретизації та однаковими параметрами акустичного сигналу. Характеристики цих наборів даних вказані в табл. 1. Тут і далі ми використовуємо всесвітній час UT та місцевий сонячний час LT .

ЕКСПЕРИМЕНТ 12.05.2005 р.

Наземно-космічний експеримент виконувався на базі наземного акустичного параметричного генератора (Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України) та МС DEMETER (ЄКА).

Генератор. Наводимо фрагмент діаграми вмикань генератора з робочих матеріалів експерименту (табл. 2). Форма сигналу, наведена у графі 7 табл. 2, потім використовувалась в експерименті з МС «Чибис-М». Це три пакети коливань з частотою 600/624 Гц, кожний тривалістю 60 с та паузами по 60 с. Кожен пакет має початкову енергію 20 кДж, рівень акустичного тиску на висоті 1 м над верхнім зрізом рупора генератора складає 165 дБ, що відповідає початковому надлишковому тиску в 3 кПа. Як видно з табл. 2, генерація акустичного сигналу розпочалась за 9 хв до моменту найближчого проходження траси супутника відносно наземного пункту розміщення генератора.

Таблиця 1. Вибрані для аналізу бортові дані вимірювань Z-складових електричного поля E та магнітного поля B з мікросупутників DEMETER та «Чибис-М»

Мікросупутник	Дата	UT	Діапазон/поле (компоненти)	Одиниця вимірювання	Частота дискретизації F_d , Гц
DEMETER	12.05.2005	09:14:32	ДНЧ/ E (Z)	мкВ/м	40000.0
«Чибис-М»	28.11.2013	07:26:41	ДНЧ/ B (Z)	нТл	9765.625

Супутник. На рис. 2 зображено трасу МС DEMETER під час сеансу вимірювань. На момент проведення експерименту він мав полярну кругову орбіту з висотою 711 км при проходженні над м. Львів. Орбітальна швидкість супутника становила 7.50 км/с. Прилади супутника були ввімкнуті 12.05.2005 в 09:14:32.413000 UT, коли супутник мав координати (60.337639N, 29.869967E) та висоту 711.95 км. Вимикання приладів відбулось 12.05.2005 в 09:42:00.477000 UT, коли супутник мав координати (-38.177578N, 1.760144E) та висоту 717.84 км. Загальна тривалість сеансу становила 00:27:28.064.

Для аналізу були виділені фрагменти записів з 09:17:02.531 до 09:18:02.537 UT. Для оцінювання просторового розташування МС за часовими даними в нашому аналізі було застосовано програмне забезпечення, що реалізує відомий алгоритм SGP-4, вхідними даними до якого є дволінійні набори середніх елементів орбіти (TLE). Перший момент відповідає положенню супутника приблизно на 225 км північніше Львова, другий — на 225 км південніше. Проходженню над генератором (Львів) приблизно відповідає момент 09:17:30.00 UT.

Область експерименту. На даний момент ми не маємо оцінок реальної величини збурення в ОАЗ (по акустичному каналу). Але за результатами комп'ютерного моделювання можемо поставити

під сумнів можливість виділити акустичні збурення від інших наявних на цій висоті (717 км). Тому ми розглядаємо збурення ЕЗ, що поширюються в силовій трубці акустичного збурення до області ОЕЗ. Оскільки швидкість поширення таких збурень не менша, ніж альвенівська, у межах точності наших міркувань приймаємо, що збурення досягає ОЕЗ практично миттєво.

Нахил геомагнітного поля в околі м. Львів складає $I = 66^{\circ}27'$ (див. рис. 1). Тоді супутник з висотою орбіти $H_o = 711$ км увійде у магнітну силову трубку, що виходить з нижньої частини іоносферного шару E ($h_E \sim 100$ км) над околком пункту, що розташованого на південь від Львова на $L = (H_o - h_E) \text{ctg } I = 266$ км.

Враховуючи, що область генерації збудження в E -шарі (ОПЗ) має скінченну товщину, маємо оцінку відстані центру ОЕЗ у 255...270 км на південь від Львова.

Враховуючи описаний вище ефект «розпливання плями» іоносферного збудження (ОПЗ) в околі силової трубки, те, що акустичний сигнал досягне відповідних висот E -шару за час 330...390 с, а супутник прибуде в ОЕЗ (рис. 1) через 560 с після початку наземної генерації, то між початком збудження трубки в E -шарі (область ОПЗ) до прибуття супутника в область ОЕЗ пройде 170...230 с, і супутник може виявити сигнал від збудження в каналі вимірювань електричного

Таблиця 2. Просторово-часові параметри вибраного для аналізу експериментів з акустичним генератором та МС DEMETER і «Чибис-М»

Мікросупутник	№	Дата	Момент найменшої відстані до траси МС	Найменша відстань до траси МС, км	Момент вмикання акустичного генератора	Часова діаграма акустичного сигналу, UT
DEMETER	19	12.05. 2005	09:17:30 UT (11:53:19 LT)	23	09:08:30 UT (11:44:19 LT)	<p>60 с 09:08:30 09:13:30</p>
«Чибис-М»	2	28.11.2013	07:31:14 UT (11:53:19 LT)	20	07:07:00 UT (11:44:19 LT)	<p>60 с 07:07:00 07:10:00</p>



Рис. 2. Траса МС DEMETER 12.05.2005 р. Наземний пункт — м. Львів (зірочка). Світлими кружками позначено період вимірювань (09:17:02...09:18:02 UT), до якого застосовано аналітичні методи



Рис. 3. Просторово-часова схема руху мікросупутника та збурень від третього акустичного пакету після його (можливого) прибуття в ОПЗ (див. рис. 1). За нуль просторової шкали вздовж орбіти прийнято точку, що лежить над розташуванням наземного акустичного випромінювача

поля приблизно о 09:18:00 UT, коли наблизиться до області ОЕЗ. Просторово-часову схему представлено на рис. 3.

Умови експерименту. В період експерименту космічна погода (активність Сонця, аномалії сонячного вітру) була спокійною. Для характеристики стану іоносфери наведемо дані Міжнародного центру даних з геомагнетизму (Кіото) по індексу D_{st} для травня 2005 р.: 12 травня індекс не опускався навіть до 20 нТл, що можна характеризувати як спокійний стан, на відміну від магнітної бурі, яка розпочалася пізніше, 14 травня.

ЕКСПЕРИМЕНТ 28.11.2013 р.

Наземно-космічний експеримент виконувався на базі наземного акустичного параметричного генератора (Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України) та МС «Чибіс-М» (Інститут космічних досліджень РАН) [5].

Генератор. В експерименті було використано той же генератор, що і в експерименті 2005 р. Часова діаграма генерованого сигналу була залишена тією ж. За грубими оцінками час приходу переднього фронту акустичного сигналу на висоту орбіти супутника (область ОАЗ), яка становить приблизно 450 км, при використанні атмосферної моделі MSISE2000 дорівнює 600 с, а для заднього фронту — 900 с.

Супутник. МС «Чибіс-М» на час експерименту мав практично кругову орбіту (перигей — 444 км, апогей — 459 км) з нахилом 51.635° . Це призвело до того, що в околі м. Львова супутник рухався майже в зональному напрямку (див. рис. 4, де вибрану нами трасу позначено сірими кружками). Для аналізу були вибрані записи вимірювань з 07:31:00 до 07:31:30 UT тривалістю 30 с. На початку цих записів супутник перебував приблизно за 115 км на захід від Львова, в кінці — на 115 км на схід. Львів супутник проходив з 07:31:13.6 до 07:31:15.4 UT.

Область експерименту. Повторюючи обчислення, описані вище, отримуємо для МС «Чибіс-М» діапазон відстаней на південь від м. Львів, що характеризують точку зустрічі супутника з магнітною силовою трубкою, яка збуджується

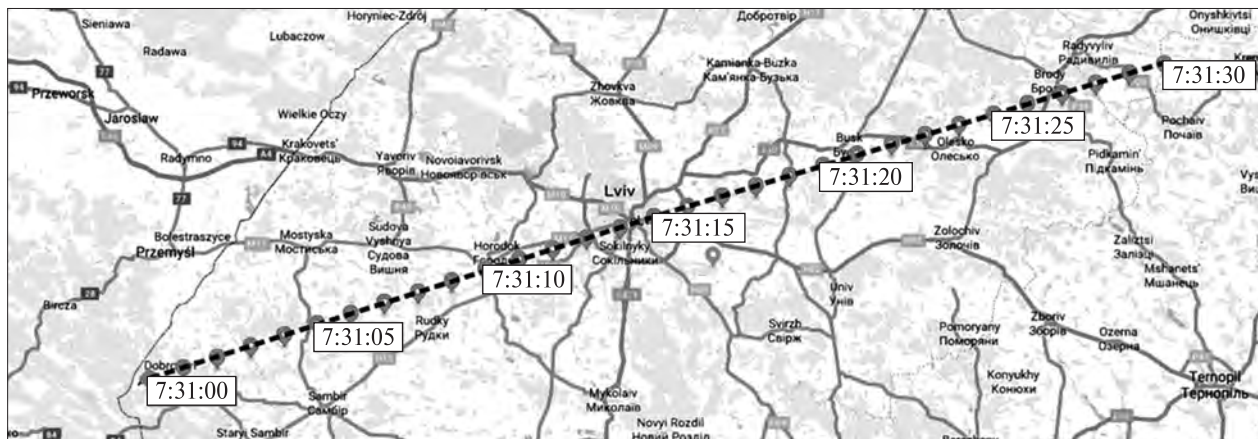


Рис. 4. Вибраний для аналізу відрізок траси супутника «Чибис-М» 28.11.2013 р. з 07:31:00 до 07:31:30 UT, позначки розташовані з інтервалом 1 с

в E -шарі іоносфери: $L \approx 150 \dots 165$ км. Момент входження супутника в окіл сигової трубки (область ОЕЗ) віддалений від моменту приходу сигналу в E -область (270...330 с після початку роботи генератора) на 900 с, якщо прийняти, що найближча відстань до ОЕЗ буде досягаться в 07:31:13...07:31:15 UT. Таким чином, якщо за 900 с «шумова пляма» розміється до розмірів порядку 150...165 км, то електростатичні збурення в ОЕЗ можуть бути детектовані в 07:31:13...07:31:15 UT. З іншого боку, висота МС «Чибис-М» ще досяжна для акустогравітаційних хвиль, що можуть виникнути завдяки описаному нами [22] каскадному процесу з початкового сигналу генератора. Тоді з моменту приходу заднього фронту акустичного збурення до появи супутника над Львовом (07:31:13...07:31:15 UT) пройде 300 с. Таким чином, у вказаний період супутник може отримати (ослаблені) сигнали від області сигової трубки (область ОЕЗ) і від прямого акустичного збурення (область ОАЗ).

Умови експерименту. У період експерименту космічна погода (активність Сонця, аномалії сонячного вітру) була спокійною. Для характеристики стану іоносфери наведемо дані Міжнародного центру даних з геомагнетизму (Кіото) по індексу D_{st} для листопада 2013 р.: у вибраний для експерименту день геомагнітна обстановка була спокійною, значення індексу D_{st} були навіть злегка додатні (< 10 нТл).

АНАЛІТИЧНИЙ АПАРАТ

У нашій роботі 2015 р. [4] щодо вибору аналітичного апарату її співавтором Л. В. Козак були сформульовані положення, що серед статистичних методів аналізу динамічних процесів в іоносфері є корисними три незалежні підходи: аналіз функції густини ймовірностей флуктуацій вимірюваних параметрів, аналіз ексцесу та аналіз структурних функцій високих порядків. Такий підхід дозволяє визначити наявність чи відсутність неоднорідності в досліджуваному середовищі та порівняти спостережувані значення із наявними моделями.

Вже маючи досвід моделювання обстановки акустичних експериментів, зауважимо, що ідея про пошук границь між областями іоносфери з різними статистичними властивостями флуктуацій виявилася плідною. У випадку наших експериментів, коли іноді доводиться вимірювати власне «слід» від збудження іоносфери, саме такі підходи мають рацію. Слід додати, що вимірюваний «слід» невинно релаксує, змінюючи конфігурацію, і про стаціонарність розподілів можна не говорити.

Виходячи з усього сказаного вище, ми зосередили увагу на методах, які можна вважати адекватними ситуації: медіанних, ентропійних та мультифрактальних.

Ефективним методом медіанного оцінювання є обчислення нормованого медіанного абсолют-

ного відхилення (*MAV*), яке працює навіть в умовах нестійкості оцінювання за допомогою стандартного відхилення (сигнали з нескінченними дисперсіями) [9]. Для послідовності A_i ($i = 1, \dots, N$) *MAV* визначається формулою

$$MAV = c \cdot \text{median} (|A_i - \text{median}(A)|), \quad i = 1, \dots, N,$$

де $\text{median}(A)$ — медіана послідовності A , константа $c = -1/(\sqrt{2} \cdot \text{erfcinv}(3/2))$, де функція $\text{erfcinv}(x)$ — обернена додаткова функція похибок. Ми розробили алгоритм, де *MAV* обчислюється у ковзному вікні. В результаті для впорядкованої за зростанням часу послідовності вимірювань ми отримали оцінку, яка демонструє залежність розсіяння величин вибраної послідовності від часу (подібно до стандартного відхилення), але не чутлива до виду функції розподілення, яка навіть може змінюватись з часом.

Застосування ентропійних оцінок, заснованих на формулі Шеннона

$$H = -\sum_{k=1}^N p_k \log_2 p_k,$$

де H — ентропія, p_k — ймовірність реалізації k -го (з N можливих) результату експерименту, базується на тому, що у випадку рівних ймовірностей результатів вимірювань ентропія максимальна, а у випадку одного достовірного результату всі інші ймовірності дорівнюють нулеві, і ентропія дорівнює нулеві. Така функція є монотонною, отже вона може служити мірою розсіяння енергії системи по певному набору станів. У застосуванні до аналізу сигналів ентропія може вимірювати складність (різноманітність побудови) цих сигналів [10].

Вейвлетна ентропія [20] вимірює ступінь розсіяння енергії системи по масштабах. Для часових масштабів вейвлетна ентропія є методом аналізу сигналів, а саме — мірою розсіяння форм коливань по масштабах. Масштабні коефіцієнти вейвлет-розвинення відображають грубу структуру сигналу, і ми їх не враховуємо, обчислення виконуються для детальних коефіцієнтів $d_{i,j}$. Обчислюємо величину $E_i = \sum_j (d_{i,j})^2$, що має зміст вейвлетної енергії i -го масштабного рівня, потім повну вейвлетну енергію по всіх масштабних рівнях $E = \sum_i E_i$. Після цього обчислюємо вели-

чину вейвлетної ентропії H за формулою Шеннона, приймаючи, що $p_i = E_i/E$. З побудови бачимо, що вона характеризує неоднорідність розподілу енергії по масштабах (для сигналів — по часових масштабах). В нашій схемі ми виконуємо вейвлет-перетворення у ковзному вікні, щоб аналізувати зміни складності системи з плином часу.

Для пояснення введення монофрактальних та мультифрактальних випадкових коливань розглянемо [17, 25] певне випадкове коливання $X(t)$ на інтервалі часу $[t-\delta/2, t+\delta/2]$ тривалістю δ з центром в часовій точці t , причому $\mu(t, \delta)$ — розмах випадкового коливання на цьому інтервалі. Якщо існує границя

$$h(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\frac{\ln(\mu(t, \alpha))}{\ln(2\delta)} \right),$$

то величина $h(t)$ називається показником Гельдера — Ліпшиця. Якщо величина $h(t)$ не залежить від моменту часу t ($h(t) = \text{const} = H$), то випадкове коливання $X(t)$ називається монофрактальним, а величина H — показником Херста. Якщо ж показники Гельдера — Ліпшиця суттєво різні для різних моментів часу, то випадкове коливання називається мультифрактальним.

Розглянемо множину $T(\alpha)$ таких моментів часу t , для яких $h(t) = \alpha$. Показано, що існують деякі мінімальне α_{\min} та максимальне α_{\max} , і лише для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ множини $T(\alpha)$ будуть непустими. Для кожного такого значення α множина $T(\alpha)$ складається з точок, розсіяних по осі часу. Тоді мультифрактальний спектр сингулярності $F(\alpha)$ є фрактальна розмірність множини точок $T(\alpha)$. Таким чином, мультифрактал — це узагальнення фрактальної множини на випадок, коли фрактальних розмірностей багато, причому фрактали, що мають однакову фрактальну розмірність (один показник Гельдера — Ліпшиця) сильно перемішані між собою.

Враховуючи обмежений обсяг статті, для стислості викладу ми залишаємо до іншого разу деталі мультифрактального методу аналізу даних. Значимо лише, що є різні моделі стохастичних процесів, які зіставляються з реальними процесами. Найбільш відома і застосовна — модель дробового броунівського руху, яка була введена

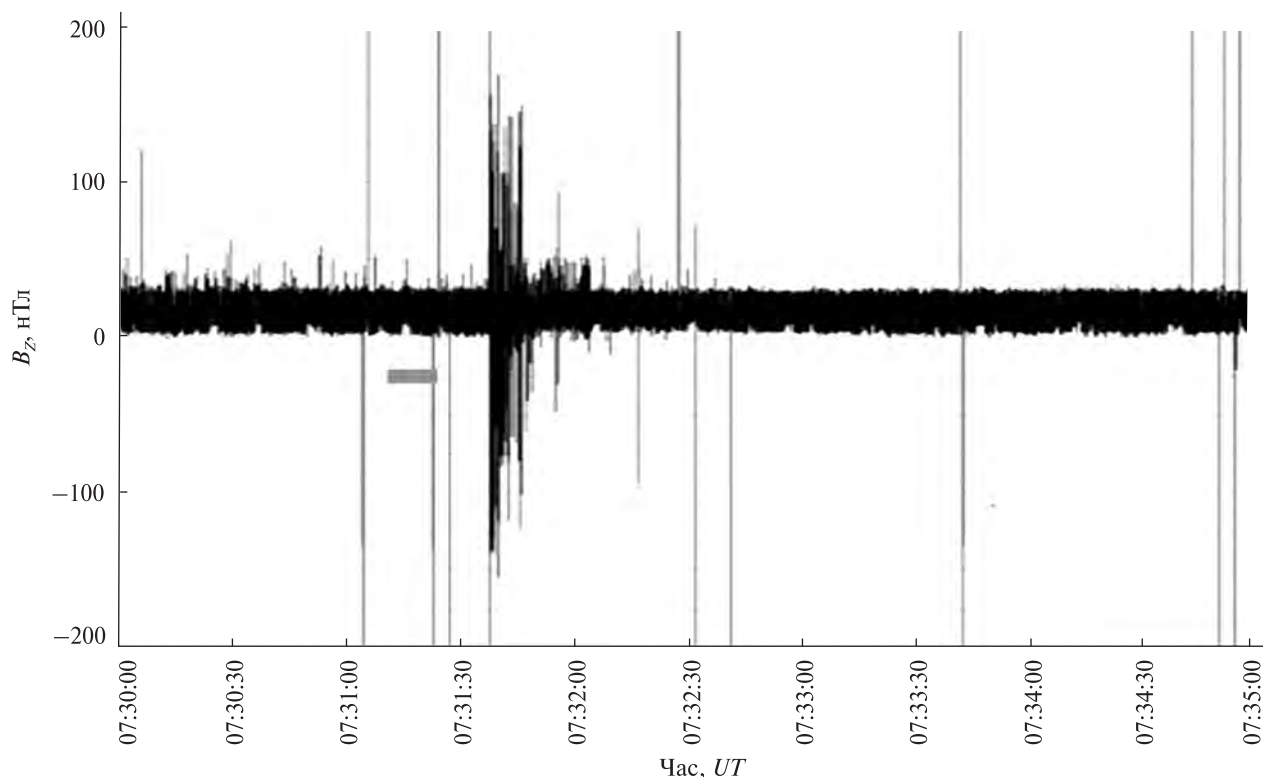


Рис. 5. Фрагмент набору даних № 2, МС «Чибис-М», 28.11.2013 р., вертикальна складова магнітного поля у ДНЧ-діапазоні, початок — 07:30:00 UT, закінчення — 07:35:00 UT. Проходження поблизу генератора з 07:31:10 до 07:31:20 UT. Горизонтальною сірою смужкою виділено відповідний проміжок часу

А. М. Колмогоровим як «гауссівська спіраль у гільбертовому просторі». Її фрактальна розмірність визначається введеним вище показником Херста. В наступних роботах ми плануємо розглянути ці питання детальніше у зв'язку з появою останнім часом нових і ефективних алгоритмів мультифрактального аналізу довгих рядів вимірювань.

Спектр сингулярності можна характеризувати двома параметрами: значенням величини $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, яку називають шириною носія сингулярності, та значенням аргумента α^* , при якому досягається максимум функції $F(\alpha)$. Відзначимо, що якщо сигнал монофрактальний, то маємо $\Delta\alpha = 0$, а функція $F(\alpha^*) = 1$. Тоді з наведених вище визначень $\alpha^* = H$ і називається узагальненим показником Херста. Якщо оцінювати спектр сингулярності $F(\alpha)$ у ковзному вікні, то еволюція його параметрів $\Delta\alpha$, α^* надасть інформацію про зміни структури шуму. Але зауважимо, що літе-

ратурні джерела стверджують, що для впевненого оцінювання ми повинні мати досить багато значень (а значить і велику ширину вікна): понад 10^4 відліків, і для вибору величини зміщення ковзного вікна теж потрібно виробляти певні правила.

Декілька років тому було показано, що обчислення спектру сингулярності простіше всього виконувати з використанням вейвлетів. Так виник алгоритм вейвлетних лідерів [26]. Ми скористались готовою реалізацією алгоритму вейвлетних лідерів і застосували його в ковзному вікні зі зміщенням у ширину вікна (максимально допустимим).

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

1. Дані МС «Чибис-М». На рис. 5 наведено фрагмент ряду значень вертикальної складової B_z маг-

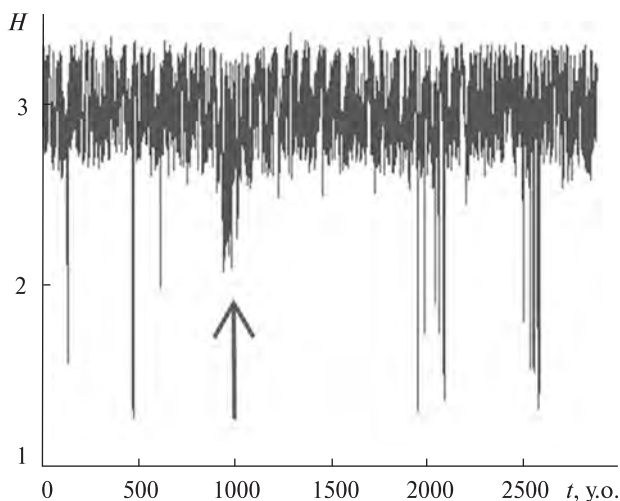


Рис. 6. Вейвлетна інформаційна ентропія H для вибраного набору даних. Стрілка позначає положення в часі імпульсу 07:31:38 UT

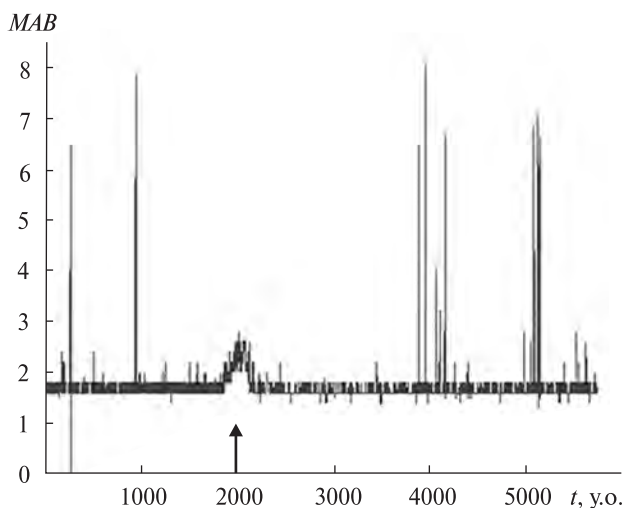


Рис. 7. Нормоване медіанне абсолютне відхилення для вибраного набору даних. Стрілка позначає положення в часі імпульсу 07:31:38 UT

нітного поля у ДНЧ-діапазоні (табл. 2, МС «Чибис-М», 28.11.2013 р.) для проміжку часу, вибраного для аналізу згідно з рис. 4.

В цьому та наступному аналізі даних ми будемо намагатись брати до розгляду всі найбільш значні події у вибраному нами проміжку часу, який потім будемо зіставляти з просторовими координатами і можливими ознаками іоносферного відгуку на акустичну дію. Подія у вигляді біполярного магнітного імпульсу почалась в

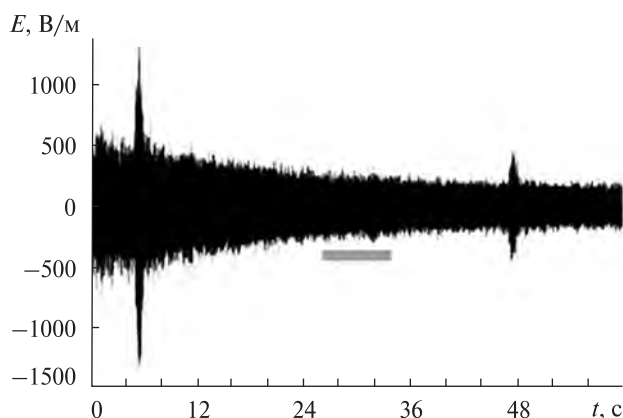


Рис. 8. Фрагмент набору даних № 1, МС DEMETER, 12.05.2005 р., вертикальна складова E_z електричного поля у ДНЧ-діапазоні, початок — 09:17:02.531 UT, закінчення — 09:18:02.537 UT. Горизонтальною сірою смужкою виділено проміжок часу проходження поблизу генератора з 09:25:00 до 09:35:00 UT

07:31:38 UT і закінчилась в 07:31:50 UT, тривалість імпульсу — 12 с. Це відповідає розмірам просторової області в 90 км. Область розташована в 135...138 км на схід від Львова. За першим імпульсом слідує монополярне збудження з амплітудою у чотири рази меншою і тривалістю 15 с. Це відповідає просторовим розмірам у 115 км і розташуванню за 230 км на схід від Львова. Враховуючи досить велику затримку з приходом супутника відносно початку генерації, зміщене розташування області збудження можна частково пояснити вітровим зносом як акустичного пучка — на висоті 100...120 км за нашими розрахунками за моделлю HWM-98 вітер дув на схід зі швидкістю порядку 50 м/с, так і самої області збудження.

Було обчислено вейвлетну інформаційну ентропію (рис. 6). Значне зниження ентропії спостерігається у положенні різкого викиду 1000 у. о. (07:31:38 UT). Це означає, що в сигналі відбувся перерозподіл енергії по меншій кількості часових масштабів. Тобто, сигнал став менше «шуміти», став більш впорядкованим. Цікава особливість міститься біля позначки 2500 у. о. (07:34:30 UT): локалізована впорядкованість з'являється, хоча на графіку рис. 5 там не спостерігається особливостей. Але за просторовою віддаленістю ця область частково впорядкова-

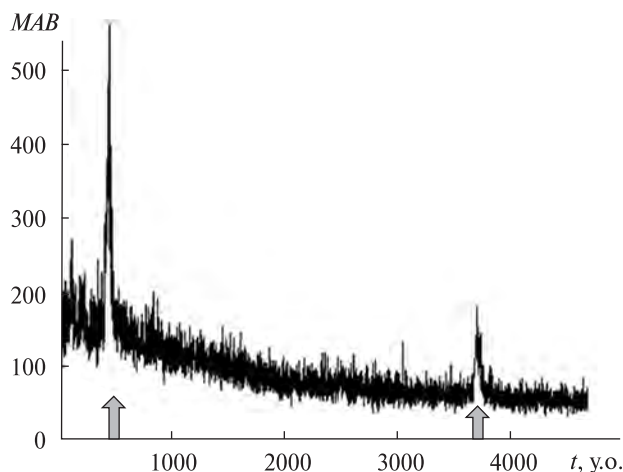


Рис. 9. Нормоване медіанне абсолютне відхилення для вибраного набору даних. Стрілки позначають положення в часі імпульсів 09:17:08.00 та 09:17:50.40 UT

них флуктуацій, за нашим теперішнім розумінням, не має стосунку до акустичного збурення.

На рис. 7 приведено ряд, отриманий у результаті фільтрації початкового набору даних за допомогою нормованого медіанного абсолютного відхилення в ковзному вікні. З особливостей сигналу залишився чіткий викид поблизу 2000 у. о. (07:31:38 UT). Зауважимо, наскільки спростилась форма сигналу після застосування фільтра. Що стосується викиду, що був для ентропії при 2500 у. о., то зараз бачимо, що він має малу ширину. Це в дійсності невелика послідовність дуже різких коливань, прихованих у шумі.

Стрілка позначає положення в часі імпульсу 07:31:38 UT.

2. Дані MC DEMETER. На рис. 8 наведено фрагмент ряду значень вертикальної складової електричного поля E у ДНЧ-діапазоні (табл. 1, MC DEMETER, 12.05.2005 р.) виділений для проміжка часу, вибраного для аналізу згідно з рис. 2: 09:17:02...09:18:02 UT. Виділяються дві виражених події збудження: при 09:17:08.00 та 09:17:50.40 UT. Попередня оцінка їхньої тривалості: 1.5 та 2.0 с відповідно.

Таким чином, просторові розміри областей становлять 11 та 15 км відповідно. Области віддалені від наземного пункту Львів на 184 км на

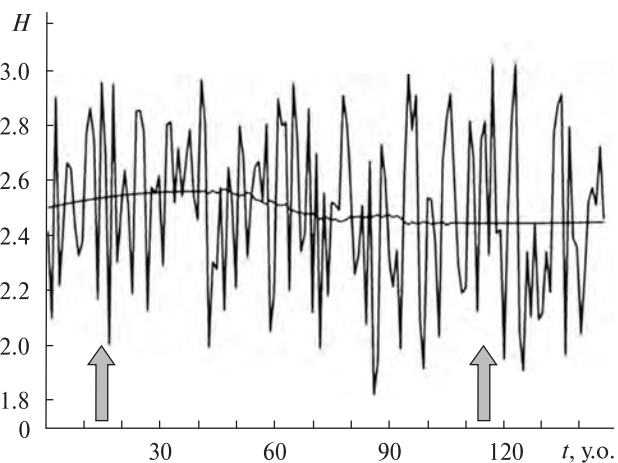


Рис. 10. Вейвлетна інформаційна ентропія H для вибраного набору даних. Стрілки позначають положення в часі імпульсів 09:17:08.00 та 09:17:50.40 UT, горизонтальна лінія – поліноміальний тренд у ковзному вікні

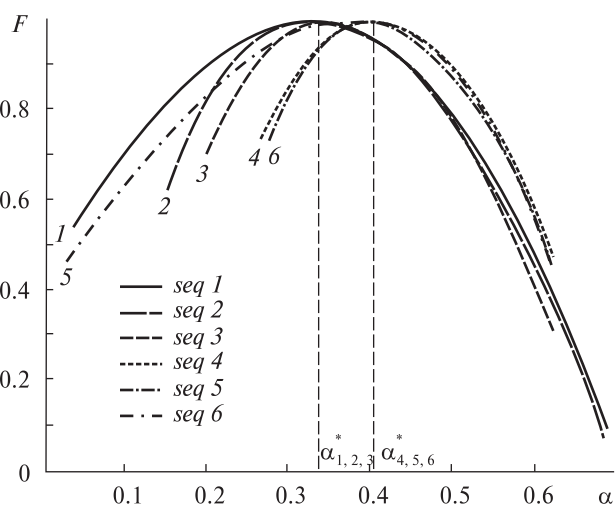


Рис. 11. Залежність функції спектра сингулярностей $F(\alpha)$ від значення показника Гельдера — Ліпшиця α для вибраного набору даних. Інтервал відліків сигналу (60 с) розбито на шість проміжків тривалістю 10 с. У кожному проміжку за методом вейвлетних лідерів будувались залежності $F(\alpha)$. Величини $\alpha^*_{1,2,3}$ та $\alpha^*_{4,5,6}$ — аргументи максимумів функції $F(\alpha)$ для проміжків 1—3 та 4—6 відповідно

північ та 135 км на південь. Супутник попадає у першу область через 188...248 с після початку збудження E -шару переднім фронтом акустичного сигналу, а у другу — через 230...290 с. Відносно моменту приходу заднього фронту сигна-

лу в E -шар (закінчення дії збудника), то маємо випередження у 112...52 с для першої області, та 70...10 с — для другої. Тобто супутник пролітав обидві області під час дії акустичного імпульсу на E -шар іоносфери. У нас ще немає достатньої інформації, щоб інтерпретувати перший імпульс як реакцію іоносфери на акустичного збурення — причина можливого зміщення збурення на північ наразі невідома. Що ж до другої області, то зауважимо, що вона, маючи ширину порядку 15 км, перебуває від центральної силової трубки збудження на відстанях 115...135 км. Навіть якщо взяти до уваги зауваження Похотелова та ін. [19] про спостереження областей збудження, які рухались вздовж E -шару зі швидкостями до 500 м/с, то оцінка максимального зміщення центра «плями» дає 100...120 км. З урахуванням дифузного розпливання «плями» робимо висновок, що належність даної збуреної області до околу ОЕЗ на висоті орбіти виключати не можна. Підтвердженням цього була б зміна статистики фонових шумів на південь від даної області, що буде розглянуто нижче.

Розглянемо фільтрацію нормованим MAB у ковзному вікні (рис. 9). Виділяються тільки два імпульси, а прихованих у шумі локалізованих збуджень немає.

Розглянемо вейвлетну інформаційну ентропію у ковзному вікні (рис. 10). Области імпульсів характеризуються підвищенням ентропії. Відзначимо, що після прольоту Львова (приблизно 75 у. о.) тренд ентропії (горизонтальна лінія) стабілізується. Але навколо тренду відбуваються посилені коливання ентропії, які в часі виглядають як «пачки імпульсів». Тобто, іоносфера південніше генератора має «плямисту» структуру: області деякої впорядкованості змінюються областями більш «шумними». Ми знаємо про вплив акустики на фрагментацію області E , можливо, що й тут діє подібний механізм.

Розглянемо далі мультифрактальну структуру шумів вздовж орбіти супутника (рис. 11). Видно, що на перших трьох проміжках (0...30 с сеансу) максимум $F(\alpha)$ досягається при одній і тій же величині $\alpha = \alpha_{1,2,3}^* = 0.34$, після чого він змінюється, і на останніх трьох проміжках (31...60 с) дорівнює $\alpha = \alpha_{4,5,6}^* = 0.40$. Наявність такого стриб-

ка свідчить про зміну фрактальних властивостей флуктуацій, що відбулась після прольоту МС над генератором (після 30 с сеансу, див. рис. 3). Нагадаємо, що виявлення можливості таких стрибків, власне, і є завданням даної роботи. Що ж до ширини фрактального спектру $\Delta\alpha$, бачимо, що вона прогресивно зменшується, але зазнає стрибка на п'ятому проміжку (з 10 до 20 с після прольоту над генератором, що складає 75...150 км на південь від Львова). Інтерпретація таких особливостей ще попереду.

ВИСНОВКИ

Аналіз записів супутникових вимірювань низькочастотних варіацій електричного та магнітного полів в іоносфері на висотах 420 км (МС «Чибис-М») та 710 км (МС DEMETER) дозволив виявити проходження супутників крізь локалізовані області збудження, що відрізняються від навколишнього середовища іншою просторово-часовою варіабельністю. Аналіз просторово-часових зв'язків, характерних для експериментів, дозволив інтерпретувати знайдені події як *кандидати* до збуджень, викликаних дією акустичного випромінювання наземного керованого акустичного випромінювача.

Як і очікувалось, вимірювання електричної складової виявились загалом більш інформативними. Що стосується експериментів з новими методами обробки даних, то зазначимо, що мультифрактальний аналіз дав найбільш виразний результат.

Незважаючи на наявність великої кількості експериментальної інформації, за результатами виконаного нами аналізу зрозуміло, що, поперше, потрібно вдосконалити розроблену нами модель поширення акустичного випромінювання від наземного керованого акустичного випромінювача [22] в напрямках: врахування динамічних процесів в атмосфері (вітрів на різних висотах та ін.), більш чітке моделювання змін форми акустичного пучка в таких динамічних умовах (можливо з підключенням сучасних адаптованих променевих моделей), розробка моделі взаємодії АГХ з іоносферною плазмою на основі статистик іоносферних процесів, що мають відношення до основної задачі.

Для розв'язання цих задач потрібно врахувати у моделі різку відсічку сигналу на початку і при закінченні генерації пакетів, оскільки це впливає на процес збудження іоносферної плазми. Більшість досліджень акустичних впливів на іоносферу оперують з тими чи іншими ударними хвилями. Наскільки це має відношення до випромінювання НКВ?

Алгоритми і програмні засоби, які ми використовували в аналізі супутникової інформації, зарекомендували себе добре і стануть основою для подальшої аналітичної роботи в рамках космічного проекту «Іоносат-Мікро».

Робота була частково підтримана Цільовою комплексною програмою НАН України з наукових космічних досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журн. наук о Земле. — 2000. — 2, № 2. — С. 95—108.
2. 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 // Радиопиз. и радиоастрон. — 2015. — 20, № 1. — С. 37—47.
3. Петрухин Н. С., Пелиновский К. Н., Бацына Е. К. Безотражательные акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. — 2012. — 52, № 6. — С. 854—860.
4. Черемных О. К., Гримальський В. В., Івантишин О. Л., Івченко В. М., Козак Л. В., Кошовий В. В., Мезенцев В. П., Мельник М. О., Ногач Р. Т., Рапопорт Ю. Г., Селіванов Ю. О., Жук І. Т. Експериментальні та теоретичні дослідження штучної акустичної модифікації атмосфери та іоносфери // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 1. — С. 48—53.
5. Черемных О. К., Климов С. И., Корепанов В. Е., Кошовый В. В., Мельник М. Е., Ивантишин О. Л., 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—74.
6. Черемных О. К., Селиванов Ю. А., Захаров И. В. Влияние сжимаемости и неизотермичности атмосферы на распространение акусто-гравитационных волн // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 1. — С. 9—19.
7. 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.
8. Aoyama Tadashi, Iyemori Toshihiko, Nakanishi Kunihito, Nishioka Michi, Rosales Domingo, Veliz Oscar, Safor Erick Vidal. Localized field-aligned currents and 4-min TEC and ground magnetic oscillations during the 2015 eruption of Chile's Calbuco volcano // Earth, Planets and Space. — 2016. — 68. — P. 148. — doi: 10.1186/S40623-016-0523-0.
9. Boateng Kwame Osei, Asubam Benjamin Weyori, Laar David Sanka. Improving the Effectiveness of the Median Filter // Int. J. Electron. and Communication Engineering. — 2012. — 5, N 1. — P. 85—97.
10. Cianchini G., De Santis A., Balasis G., Manda M., Qamili E.. Entropy based analysis of satellite magnetic data for searching possible electromagnetic signatures due to big earthquakes // Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09). — P. 29—35.
11. Cussac T., Clair M.-A., Ultré-Guerard P., Buisson F., Lassalle-Balier G., Ledu M., Elisabelar C., Passot X., Rey N. The DEMETER microsatellite and ground segment // Planet. and Space Sci. — 2006. — 54. — 427 p. — doi:10.1016/j.pss.2005.10.013.
12. Fedorenko A. K., Bepalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere // Ann. Geophys. — 2015. — 33. — P. 101—108. — doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
13. Infrasound Propagation // Geospace Science & Technology Branch (7630) / Space Science Division / The U.S. Naval Research Laboratory [Офіційний веб-сайт Військово-морських сил США]. — URL: www.nrl.navy.mil/ssd/branches/7630/infrasound-propagation (дата звернення: 20.08.2018).
14. Jakobson J. Infrasound emission from wind turbines // J. low frequency noise, vibration and active control. — 2005. — 24, N 3. — P. 145—155.
15. Karavosov R. K., Prozorov A. G. Nonordinary excitation of hydroacoustic resonance in the hydroturbine circuit of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant // J. Eng. Phys. and Thermophys. — 2011. — 84, N 3. — P. 585—588.
16. Koshovy V. V. Radiophysical and Radio Astronomical Diagnostics of Ionospheric Effects Induced by a Ground-Based Infrasonic Transmitter (Preliminary Results) // Radiophys. and Quantum Electron. — 1999. — 42, N 8. — P. 691—703.
17. Lyubushin A. A., Kalab Z., Lednicka M. Geomechanical Time Series and its Singularity Spectrum Analysis // Acta geod. geophys. et montanist. Acad. sci. hung. — 2012. — 41, N 1. — P. 1—9. — doi: 10.1556/AGeod.47.2012.1.6
18. Pokhotelov O. A., Liperovskii V., Fomichev Y. P., Rubtsov L. N., Alimov O. A., Sharadze Z. S., Liperovskaya R. K.

- Ionospheric modification during the military actions in the Persian gulf zone // *Doklady Akad. Nauk SSSR*. — 1991. — **321**, N 6. — P. 1168—1172.
19. Pokhotelov O. A., Pilipenko V. A., Fedorov E. N., Stenflo L., Shukla P. K. Induced Electromagnetic Turbulence in the Ionosphere and the Magnetosphere // *Phys. Scr.* — 1994. — **50**. — P. 600—605.
 20. Quian Quiroga R., Rosso O. A., Başar E., Scürmann M. Wavelet entropy in event-related potentials: a new method shows ordering of EEG oscillations // *Biol. Cybern.* — 2001. — **84**. — P. 291—299.
 21. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., Grimalsky V. V., Ivchenko V. N., Milinevsky G. P., Tkachenko E. N., Melnik M. O., Mezentsev V. P., Karataeva L. M., Nogach R. T. Ionosphere as a Sensitive Indicator of Powerful Processes in the Lower Atmosphere / *Lithosphere, Artificial Acoustic Influence and Space Weather // Electromagnetic Effects of the Earthquakes and Volcanoes EMSEV 2014 Workshop, Konstancin Jeziorna, 22—26.09.2014, Book of Abstracts.* — 2014. — P.133—135.
 22. Rapoport Y. G., Cheremnykh O. K., Koshovy V. V., Melnik M. O., Ivantyshyn O. L., Nogach R. T., Selivanov Y. 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.
 23. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., Fedorenko A. K., Ivchenko V. M., Grimalsky V. V., Tkachenko E. N. Oscillations of neutral and charged components of near-Earth plasma and effects of active media // *UK-Ukraine Meeting on Solar Physics and Space Science UKU SPSS/TASS-2011.* — 2011.
 24. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., Fedorenko A. K., Ivchenko V. M., Grimalsky V. V., Tkachenko E. N. Modeling AGW and PEMW in inhomogeneous atmosphere and ionosphere // *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET) / 2012 IEEE Int. Conf.* — 2012/8/28. — P. 577—580.
 25. Rezek I. A., Roberts S. J. Stochastic Complexity Measures for Physiological Signal Analysis // *IEEE Transactions on BME.* — 1998. — **45**, N 9. — P. 1186—1191.
 26. Serrano E., Figliola A. Wavelet Leaders: A new method to estimate the multifractal singularity spectra // *Physica A.* — 2009. — **388**. — P. 2793—2805.
 27. Snively J. B. Nonlinear Gravity Wave Forcing as a Source of Acoustic Waves in the Mesosphere, Thermosphere, and Ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 2017. — **44**. — P. 23.
 28. Zettergren M. D., Snively J. B. Ionospheric response to infrasonic-acoustic waves generated by natural hazard events // *J. Geophys. Res: Space Phys.* — 2015. — **120**, N 9. — P. 8002—8024.
 29. Zettergren M. D., Snively J. B., Komjathy A., Verkhoglyadova O. P. Nonlinear ionospheric responses to large-amplitude infrasonic-acoustic waves generated by undersea earthquakes // *J. Geophys Res: Space Phys.* — 2017. — **122**, N 2. — P. 2272—2291.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2018

REFERENCES

1. Gokhberg, M. B. and Shalimov, S. L. Lithosphere-ionosphere coupling and its modeling. *Russian Journ. On Earth Sciences*, **2**: 95—108 (2000) [in Russian].
2. Emelyanov, L. Ya., Zivolup, T. G., Soroka, S. A., Cheremnykh, O. K., and Chernogor, L. F. Ground acoustic influence on the ionosphere: the results of observations by means of incoherent scattering and vertical sounding the methods. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **20**: 37—47 (2015) [in Russian].
3. Petrukhin, N. S., Pelinovsky, E. N. & Batsyna, E. K. Reflectionless acoustic-gravity waves in the Earth's atmosphere. *Geomagnetizm and Aeronomy*, **52**. N 6: 854—860 (2012) [in Russian].
4. Cheremnykh, O. K., Grimalsky, V. V., Ivantyshyn, O. L., Ivchenko, V. M., Kozak, L. V., Koshovy, V. V., Mezentsev, V. P., Melnik, M. O., Nogach, R. T., Rapoport, Yu. G., Selivanov, Yu. A., Zhuk, I. T. Experimental and theoretical research of artificial acoustic modification of the atmosphere and ionosphere. *Kosm. nauka tehnol.*, **21**, N 1: 48—53 (2015) [in Ukrainian].
5. Cheremnykh, O. K., Klimov, S. I., Korepanov, V. E., Koshovy, V. V., Melnik, M. O., Ivantyshyn, O. L., Mezentsev, V. P., Nogach, R. T., Rapoport, Yu. G., Selivanov, Yu. A., Semenov, L. P. Ground-space experiment for artificial acoustic modification of ionosphere. Some preliminary results. *Kosm. Nauka tehnol.*, **20**, N 6: 60—74 (2014) [in Russian].
6. Cheremnykh, O. K., Selivanov, Yu. A., Zakharov, I. V. The influence of compressibility and non-isothermality of the atmosphere on the propagation of acoustic-gravity waves. *Kosm. nauka tehnol.*, **16**, N 1: 9—19 (2010) [in Russian].
7. Chernogor L. F. Geophysical effects and geo-ecological consequences of mass chemical explosions at military depots in the city of Artemovsk. *Geophys. J.*, **26**, N 4: 31—44 (2004) [in Russian].
8. Aoyama Tadashi, Iyemori Toshihiko, Nakanishi Kuni-hito, Nishioka Michi, Rosales Domingo, Veliz Oscar, Safor Erick Vidal. Localized field-aligned currents and 4-min TEC and ground magnetic oscillations during the 2015 eruption of Chile's Calbuco volcano. *Earth, Planets and Space.*, **68**: 148 (2016): — doi: 10.1186/S40623-016-0523-0.
9. Boateng Kwame Osei, Asubam Benjamin Weyori, Laar David Sanka. Improving the Effectiveness of the Median

- Filter. *Int. J. Electronics and Communication Engineering*, **5**, N 1.: 85–97 (2012).
10. Cianchini G., De Santis A., Balasis G., Manda M., Qamili E.. Entropy based analysis of satellite magnetic data for searching possible electromagnetic signatures due to big earthquakes. *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09)*: 29–35.
 11. Cussac T., Clair M.-A., Ultré-Guerard P., Buisson F., Lassalle-Balier G., Ledu M., Elisabelar C., Passot X., Rey N. The DEMETER microsatellite and ground segment. *Planetary and Space Science*, **54**: 427 p. (2006). — doi:10.1016/j.pss.2005.10.013.
 12. Fedorenko A. K., Bepalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere. *Ann. Geophys.*, **33**: 101–108 (2015).
 13. Infrasound Propagation [Electronic resource]. Geospace Science & Technology Branch (7630) / Space Science Division / The U.S. Naval Research Laboratory [Official Navy Website]. — URL: www.nrl.navy.mil/ssd/branches/7630/infrasound-propagation. — Date of appeal: 20.08.2018.
 14. Jakobsen J. Infrasound emission from wind turbines. *Journal of low frequency noise, vibration and active control.*, **24**, N 3: 145–155 (2005).
 15. Karavosov R. K., Prozorov A. G. Nonordinary excitation of hydroacoustic resonance in the hydroturbine circuit of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant. *J. Engineering Physics and Thermophysics*, **84**, N 3: 585–588 (2011).
 16. Koshovy V. V. Radiophysical and Radio Astronomical Diagnostics of Ionospheric Effects Induced by a Ground-Based Infrasonic Transmitter (Preliminary Results), *Radiophysics and Quantum Electronics*, **42**, N 8: 691–703 (1999).
 17. Lyubushin A. A., Kalab Z., Lednicka M.. Geomechanical Time Series and its Singularity Spectrum Analysis. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, **41**, N 1: 1–9 (2012) — doi: 10.1556/AGeod.47.2012.1.6
 18. Pokhotelov O. A., Liperovskii V., Fomichev Y. P., Rubtsov L. N., Alimov O. A., Sharadze Z. S., Liperovskaya R. K. Ionospheric modification during the military actions in the Persian gulf zone. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **321**, N 6: 1168–1172 (1991).
 19. Pokhotelov O. A., Pilipenko V. A., Fedorov E. N., Stenflo L., Shukla P.K. Induced Electromagnetic Turbulence in the Ionosphere and the Magnetosphere. *Physica Scripta.*, **50**: 600–605 (1994).
 20. Quian Quiroga R., Rosso O. A., Başar E., Scürmann M. Wavelet entropy in event-related potentials: a new method shows ordering of EEG oscillations. *Biol. Cybern.*, **84**: 291–299 (2001).
 21. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., Grimalsky V. V., Ivchenko V. N., Milinevsky G. P., Tkachenko E. N., Melnik M. O., Mezentsev V. P., Karataeva L. M., Nogach R. T. Ionosphere as a Sensitive Indicator of Powerful Processes in the Lower Atmosphere / Lithosphere, Artificial Acoustic Influence and Space Weather. Electromagnetic Effects of the Earthquakes and Volcanoes EMSEV 2014 Workshop, Konstancin Jeziorna, 22–26.09.2014, Book of Abstracts, 133–135 (2014).
 22. Rapoport, Y. G., Cheremnykh, O. K., Koshovy, V. V., Melnik, M. O., Ivantyshyn, O. L., Nogach, R. T., Selivanov, Y. A., Grimalsky, V. V., Mezentsev, V. P., Karataeva, L. M., Ivchenko, V. M., Milinevsky, G. P., Fedun, V. N., and Tkachenko, E. N. Ground-based acoustic parametric generator impact on the atmosphere and ionosphere in an active experiment. *Annales of Geophysicae*, **35**: 53–70 (2017). — doi:10.5194/angeo-35-53-2017.
 23. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., Fedorenko A. K., Ivchenko V. M., Grimalsky V. V., Tkachenko E. N. Oscillations of neutral and charged components of near-Earth plasma and effects of active media. *UK-Ukraine Meeting on Solar Physics and Space Science UKU SPSS/TASS-2011* (2011).
 24. Rapoport Yu. G., Cheremnykh O. K., Selivanov Yu. A., Fedorenko A. K., Ivchenko V. M., Grimalsky V. V., Tkachenko E. N. Modeling AGW and PEMW in inhomogeneous atmosphere and ionosphere. *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2012 IEEE Int. Conf., 2012/8/28: 577–580.
 25. Rezek I. A., Roberts S. J. Stochastic Complexity Measures for Physiological Signal Analysis. *IEEE Transactions on BME.*, **45**, N 9: 1186–1191 (1998).
 26. Serrano E., Figliola A. Wavelet Leaders: A new method to estimate the multifractal singularity spectra. *Physica A.*, **388**: 2793–2805 (2009).
 27. Snively, J. B. Nonlinear Gravity Wave Forcing as a Source of Acoustic Waves in the Mesosphere, Thermosphere, and Ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **44**: 23 (2017).
 28. Zettergren M. D., Snively J. B. Ionospheric response to infrasonic-acoustic waves generated by natural hazard events. *J. Geophys. Res: Space Phys.*, **120**, N 9: 8002–8024 (2015).
 29. Zettergren M. D., Snively J. B., Komjathy A., Verkhoglyadova O. P. Nonlinear ionospheric responses to large-amplitude infrasonic-acoustic waves generated by undersea earthquakes. *J. Geophys Res: Space Phys.*, **122**, N 2: 2272–2291 (2017).

Received 27.03.2018

Ю. А. Селиванов, Ю. Г. Рапопорт, О. К. Черемных

Институт космических исследований
Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины,
Киев, Украина

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА АКУСТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПО ДАННЫМ МИКРОСПУТНИКОВ DEMETER И «ЧИБИС-М»

Активные наземно-космические эксперименты, выполненные Институтом космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИКИ), Львовским центром Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ЛЦ ИКИ) и Физико-механическим институтом Национальной академии наук Украины (ФМИ) в 2013 г. (с привлечением спутника Chibis-M), а в 2005 г. — ЛЦ ИКИ совместно с ФМИ (с привлечением спутника DEMETER) были посвящены изучению программированного инфразвукового воздействия на ионосферу Земли со стороны акустического источника искусственного происхождения. В данной работе внимание сосредоточено на измерениях, выполненных указанными спутниками во время активного действия наземного акустического генератора. Дано описание специфики экспериментов, соответствующих методов анализа данных, приведены некоторые результаты анализа. Анализ записей спутниковых измерений низкочастотных вариаций электрического и магнитного полей в ионосфере на высотах 420 км (МС «Чибис-М») та 710 км (МС DEMETER) позволил выявить прохождения спутников через локализованные области возбуждения, отличающиеся от окружающей среды другой пространственно-временной изменчивостью. Анализ пространственно-временных связей, существовавших во время экспериментов, позволил интерпретировать некоторые из найденных событий в качестве кандидатов возбуждений, вызванных действием акустического излучения наземного управляемого акустического излучателя. Анализ данных был выполнен с помощью реализаций методов скользящего нормированного медианного абсолютного отклонения, вейвлетной энтропии в скользящем окне и мультифрактального анализа. Выработаны рекомендации по дальнейшим этапам анализа. Созданное методическое и программное обеспечение будет использовано в исследованиях по космическому проекту «Ионосат-Микро».

Ключевые слова: активные наземно-космические эксперименты, ионосфера, программированное инфразвуковое воздействие, наземный акустический генератор, современные методы анализа данных.

Yu. O. Selivanov, Yu G. Rapoport, O. K. Cheremnykh

Space Research Institute of the National Academy
of Sciences of Ukraine and the State Space Agency
of Ukraine, Kyiv, Ukraine

IONOSPHERIC RESPONSE TO ACOUSTIC INFLUENCE ACCORDING TO THE DATA OF DEMETER AND CHIBIS-M MICROSATELLITES

Active ground-space experiments carried out by the Space Research Institute of the National Academy of Sciences and the State Space Agency of Ukraine (SRI), the Lviv Center for the Space Research Institute of the National Academy of Sciences and the State Space Agency of Ukraine (LC SRI), and the Physical-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (FMI) in 2013 (involving the microsatellite Chibis-M), and in 2005 — LC SRI together with FMI (with the involvement of the microsatellite DEMETER) were devoted to the study of programmable infrasonic impact on the ionosphere of the Earth from the ground-based acoustic source of an artificial origin. In this paper, attention is focused on the measurements made by these satellites during the active action of the ground-based acoustic generator. The description of the specifics of experiments, corresponding data analysis methods as well as discussion of their results is given. An analysis of records of satellite measurements of low-frequency variations of electric and magnetic fields in the ionosphere at altitudes of 420 km (MS Chibis-M) and 710 km (MS DEMETER) allowed detecting the passage of satellites through localized excitation areas that differ from the environment by another spatial-temporal variability. The analysis of spatio-temporal relations that existed during experiments allowed interpreting some of the observed events as candidates for excitations caused by the action of acoustic radiation of a ground-based acoustic emitter. The data analysis was performed using implementations of sliding normalized median absolute deviation, wavelet entropy in a sliding window, and multifractal analysis. Recommendations for further analysis stages are given. The developed methodology and software will be used in the space project «Ionosat-Micro» research.

Keywords: active ground-space experiments, ionosphere, programmable infrasound influence, ground acoustic generator, modern methods of data analysis