

УДК 551.510.528:523.98

С. О. Сорока, В. П. Мезенцев,
Л. М. Каратаєва, О. С. Сорока

Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ—НКАУ

Інфразвук космічного походження та його вплив на земні процеси

Надійшла до редакції 23.01.08

Робота присвячена виявленню змін в атмосферному інфразвуці після сонячних спалахів і під час метеорних потоків. Також проведено моделювання впливу інфразвуку на типові елементи біосфери. В якості типових елементів вибрано капіляри та водні розчини. Виявлено вплив інфразвуку на електропровідність та в'язкість водних розчинів солей. Отримані результати підтверджують факт космічного впливу на атмосферний інфразвук і дають можливість стверджувати про реальність акустичного каналу сонячно-земних зв'язків.

ВСТУП

Земля як відкрита система знаходиться в постійному енергомасообміні з космічними об'єктами та процесами. Часові зміни космічних процесів (космічна погода) в значній мірі визначають динаміку атмосферних процесів (земну погоду). Мірою інтенсивності динамічних процесів в атмосфері може бути інфразвук. Інфразвукові хвилі, породжені космічними факторами, можуть впливати на земні процеси на великих територіях. Цьому сприяє їхня властивість розповсюджуватись на великі віддалі без значного загасання. Фактично пропонується розглядати космофізичний вплив на земні процеси за такою схемою: космічні фактори (електромагнітні хвилі, потоки частинок) → перетворення в атмосферний інфразвук → вплив інфразвуку на земні процеси різної природи, включаючи і біосферні процеси.

Слід зауважити, що атмосферний інфразвук може бути породжений і дією «знизу» земних явищ — землетрусів, вулканів, ураганів та інших високоенергетичних явищ. Експеримен-

тальні дослідження підтвердили зв'язок атмосферного інфразвуку з сейсмічною активністю.

Таким чином, виникає задача виділення із земного інфразвукового шуму атмосфери інфразвуку космічного походження.

Основними факторами космічного впливу на атмосферний інфразвук є сонячна активність (СА), сонячні космічні промені (СКП), галактичні космічні промені (ГКП) та метеорні потоки. Ці фактори і є елементами «космічної погоди».

Метою роботи було виявлення змін атмосферного інфразвуку (АІ) після сонячних спалахів, під час метеорних потоків та моделювання впливу інфразвуку на типові елементи біосфери. В якості типових елементів вибрано капіляри та водні розчини солей.

Дослідження атмосферного інфразвуку проводилась на основі банку цифрових записів інфразвуку за період 1997—2000 рр. в діапазоні 0.003—0.2 Гц. Записи проводились в точці з координатами 48°41' N, 26°30' E в Західному регіональному центрі спеціального контролю НКАУ.

1. ЗАГАЛЬНА СХЕМА ЗВ'ЯЗКУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ ТА АТМОСФЕРНОГО ІНФРАЗВУКУ

Сонячна активність зв'язана з атмосферним інфразвуком через механізми іонізації та утворення аерозолів в атмосфері. Загальна схема впливу СА на атмосферний інфразвук показана на рис. 1. Згідно із запропонованою схемою зміни сонячної активності є керівним сигналом для просторово-часової модуляції утворення іонів та аерозолів в атмосфері.

При низьких рівнях сонячної активності іонізація в атмосфері визначається ГКП. Галактичні космічні промені проникають до найнижчих шарів атмосфери, іонізуючи повітря на всіх висотах. Ріст СА зменшує інтенсивність ГКП і, відповідно, іонізацію. Подальший ріст СА приводить до значного зменшення інтенсивності ГКП, і іонізація в атмосфері вже визначається сонячними частинками. Іони стають центрами утворення кластерів та конденсації води. Таким чином, темп утворення аерозольних частинок буде якісно визначатись графіком, показаним на рис. 2.

При низькій СА кількість аерозольних частинок залежить від ГКП (ділянка АВ на рис. 2), а при високій — від потоків сонячних частинок (ділянка ВС). Сонячні частинки утворюють аерозолі у верхній атмосфері внаслідок їхньої малої проникної здатності, а ГКП — по всій товщі атмосфери.

Наявність в атмосфері аерозольних частинок буде призводити до просторово нерівномірного прогрівання атмосфери. Останнє може відбуватись за рахунок кількох механізмів: поглинання аерозолями сонячної енергії, затінення, конденсація парів води на аерозолях та іонах, кластеризація молекул води, зміни темпів хімічних реакцій в атмосфері. Тільки при конденсації води виділяється 150 кал/г [3]. Таким чином, мізерна енергія ГКП та СКП може приводити до значного виділення в атмосферу прихованої енергії. Просторово-неоднорідний нагрів атмосфери породжує об'ємні сили:

$$F_{\text{ог}}(\mathbf{r}, t) = -k\nabla T(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

де k — коефіцієнт об'ємного розширення, $T(\mathbf{r}, t)$ — температура. Вираз (1) складає основу акусто-теплового ефекту в газовому середовищі. Внаслідок дії об'ємної сили $F_{\text{ог}}$ в атмосфері

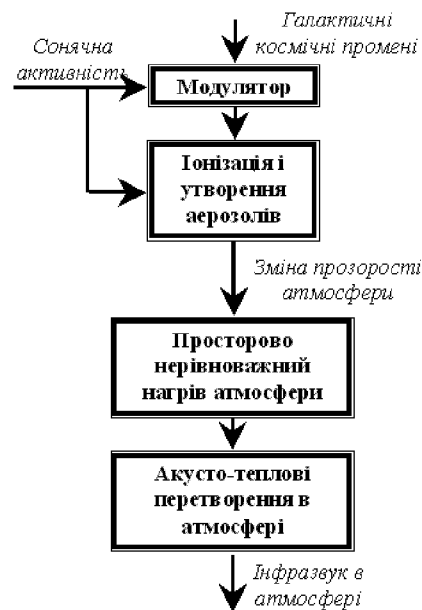


Рис. 1. Схема впливу сонячної активності на атмосферний інфразвук

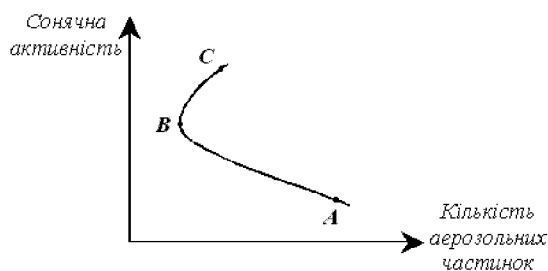


Рис. 2. Залежність кількості аерозольних частинок від сонячної активності

з'являються інфразвукові хвилі.

Згідно з описаною концепцією в атмосферному інфразвуді повинні відображатись ефекти впливу ГКП та сонячної активності. Підтвердженням справедливості цих ефектів може бути спільний аналіз змін атмосферного інфразвуду та ГКП. На рис. 3 показано спектральну густину огинаючої атмосферного інфразвуду за період 1997—2000 рр. та даних нейтронного монітора. Добрий збіг основних піків в спектрі обох характеристик підтверджує вплив ГКП на інфразвук.

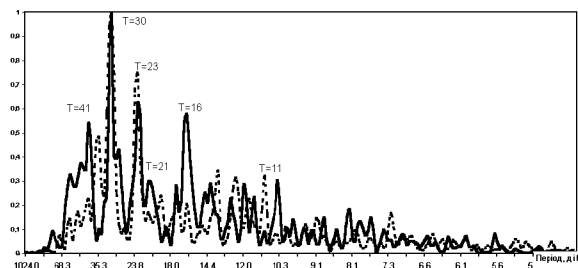


Рис. 3. Спектральні густини огинаючої інфразвуку (пунктирна крива) за добовими відліками і добових даних нейтронного монітора (суцільна крива) за 1997—2000 рр.

Ще одним джерелом аерозолів в атмосфері є метеори. За добу в атмосферу попадає величезна кількість мікрометеорів. Їхня загальна маса оцінюється до 10 т/добу [1]. При розмірах 0.1—70 мкм вони створюють хмари, що суттєво впливає на сонячну радіацію і генерацію атмосферного інфразвуку. Крупні метеори самі можуть створювати звуки, що прослуховуються на поверхні Землі. Однак це рідкісні явища. Слід очікувати, що на інфразвук будуть впливати інтенсивні метеорні потоки.

2. ВПЛИВ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ НА АТМОСФЕРНИЙ ІНФРАЗВУК

Взаємодія сонячного вітру та ударних хвиль після сонячних спалахів з магнітосферою Землі приводить до виникнення різних процесів в іоносфері та атмосфері. Відомо, що по динаміці геомагнітного поля можна судити про збуреність магнітосфери та іоносфери, так і по динаміці змін характеристик інфразвуку можна судити про реакції нижньої нейтральної атмосфери та сонячні спалахи. Методика досліджень полягала в аналізі інфразвуку до і після сонячного спалаху. Сонячні спалахи — складне фізичне явище, яке має декілька різних фаз. Розглянемо коротко основні фази розвитку спалаху.

Сонячний спалах починається з різкого зростання електромагнітного випромінювання. Випромінювання зростає практично у всіх діапазонах спектру, але в різних ділянках спектру в різне число разів, і це співвідношення змінюється для кожного спалаху. Після електро-

магнітного спалаху починається зростаючий в часі викид плазмової речовини. Час початку викиду корпускулярного потоку і досягнення максимального значення потоку індивідуальні для кожного спалаху. Швидкість цих частинок — до 1200 км/с, час прольоту до Землі 1-2 доби. При русі у міжпланетному просторі, який заповнений плазмою відносно повільного спокійного сонячного вітру, високошвидкісний потік захоплює цю плазму, в результаті чого перед його фронтом утворюється ударна хвиля. Ударна хвиля несе перед собою також підсилене сонячне магнітне поле, яке не дозволяє зарядженим частинкам проникати всередину високошвидкісного потоку. Тому протягом перших годин після початку спалаху потік сонячних космічних променів може зменшуватись і тільки після цього починає зростати, а швидкість частинок потоку повільно зменшується. Слід очікувати, що інфразвукова реакція на різні фази спалаху буде різною.

Дані про сонячні спалахи взято з джерела інформації (U. S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center, ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA) та [5] наведені в таблиці.

14 листопада 1998 р. о 8:18 розпочався протонний сонячний спалах. Інтенсивний викид частинок сонячної маси розпочався об 11:10 LT і досягнув максимуму о 15:40 LT. Електромагнітний спалах характеризувався потоком енергії 1 мкВт/м². Добові реалізації інфразвуку, представлені на рис. 4, характеризують реакцію інфразвуку на цей спалах.

Реалізація за 13 листопада 1998 р. (рис. 4, а) демонструє спокійний характер коливань інфра-

Дата і час сонячних спалахів, досліджених в роботі

Час випромінювання частинок (LT)		Час електромагнітного випромінювання (LT)
початок	максимум	
14.XI.1998 11:10	14.XI.1998 15:40	14.XI.1998 08:18
23.I.1999 14:05	23.I.1999 14:35	20.I.1999 23:04
04.I.2000 23:55	05.IV.2000 12:30	04.IV.2000 18:41
26.X.2003 21:25	27.X.2003 01:35	26.X.2003 21:19
27.X.2003 12:21		
27.X.2003 15:27		
28.X.2003 12:51		
28.X.2003 15:15	29.X.2003 09:15	28.X.2003 14:10
29.X.2003 23:37		

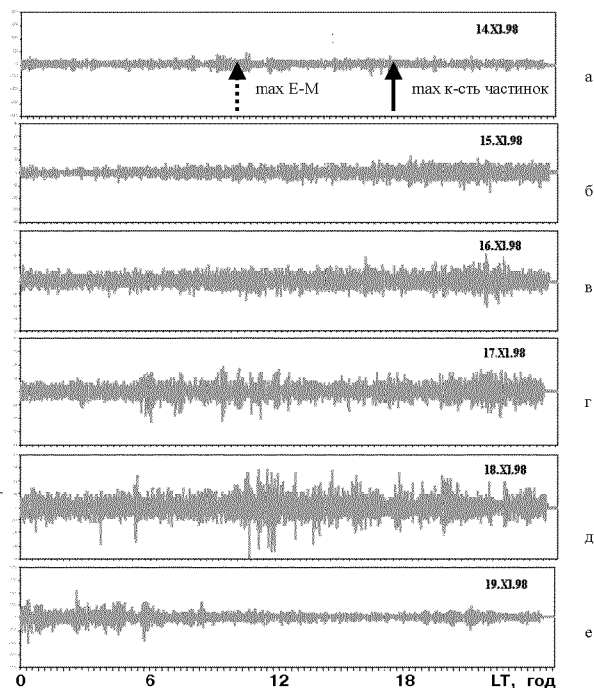


Рис. 4. Добові реалізації інфразвуку за період 14—19 листопада 1998 р. Пунктирна стрілка вказує на максимальне електромагнітне випромінювання спалаху, суцільна — на максимальну кількість частинок

звуку за добу, яка передуює сонячному спалаху.

Запис інфразвуку за 14 листопада (рис. 4, а) також демонструє відсутність змін в розмаху коливань. Однак, як показують графіки відрізків реалізації за 2 години перед спалахом та після його початку (рис. 5), характер коливань після спалаху дещо змінюється.

Спалах 14 листопада характеризується інтенсивним викидом сонячних протонів дуже високої енергії, які за декілька годин приходять в магнітосферу Землі. Цим пояснюється помітний ріст розмаху коливань інфразвуку протягом доби (рис. 4, б). Відмінність цього спалаху полягає у відсутності спаду інтенсивності викиду частинок протягом декількох діб. Це пояснює і розмах коливань інфразвуку, який відбувається 15—17 листопада (рис. 4, в—д). І тільки 19 листопада відбувається поступове зменшення розмаху коливань інфразвуку (рис. 4, е) до величини, характерної для незбурених коливань.

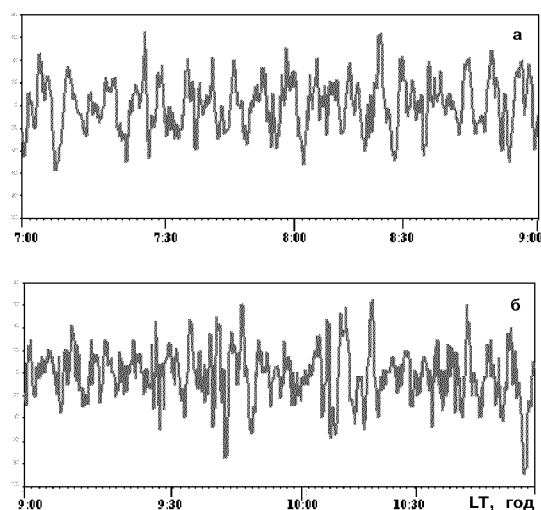


Рис. 5. Відрізки реалізацій інфразвуку 14 листопада 1998 р. з 7:00 до 9:00 LT (а) та з 9:00 до 11:00 LT (б)

Сонячний спалах 20 січня 1999 р. помітно відрізняється від спалаху 14 листопада 1998 р. Спалах розпочався в 23:04 LT електромагнітним випромінюванням із значно більшою густиною потоку енергії рентгенівського випромінювання 50 мкВт/м^2 . Інтенсивний викид частинок розпочався тільки 23 січня з 14:05 LT і протягом півгодини досягнув максимуму густини потоку частинок з енергією понад 10 MeV.

Відповідно з цими особливостями відбувалися і зміни в інфразвукових коливаннях (рис. 6). Збільшення розмаху коливань інфразвуку не відбулося ні в кінці 20 січня, ні на початку 21 січня. Спокійним залишався інфразвук і 22—23 січня. Це повністю узгоджується із тим, що інтенсивний викид частинок почався тільки 23 січня і характеризувався малою густиною потоку енергії частинок, отже їхньою відносно малою швидкістю. Тому збурення коливань інфразвуку починається тільки 24 січня і стає максимальним 25 і 26 січня. З другої половини доби 27 січня розмах коливань інфразвуку зменшується, а 28 січня ці коливання вже повністю спокійні. Таким чином, як і при спалаху 14 листопада 1998 р., і більш потужний електромагнітний спалах не призводить до збільшення розмаху коливань інфразвуку.

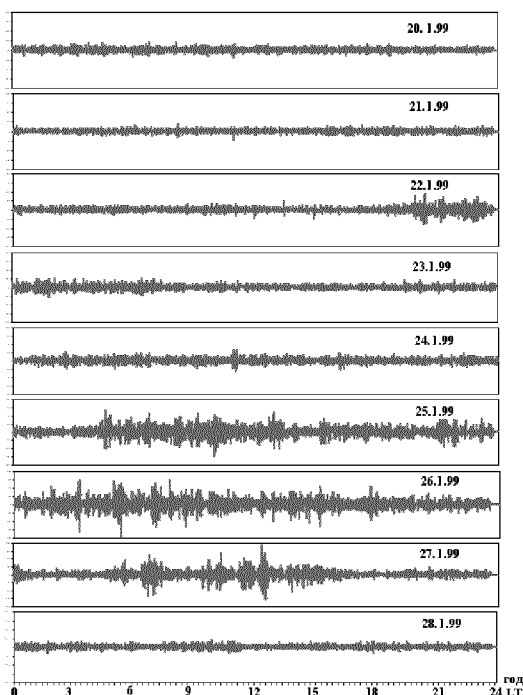


Рис. 6. Добові реалізації інфразвуку за період 20—28 січня 1999 р. Пунктирна стрілка вказує на максимальне електромагнітне випромінювання спалаху, суцільна — на максимальну кількість частинок

Сонячний спалах 4 квітня 2000 р. (рис. 7) спостерігався на фоні дещо підвищеного сонячного вітру, що і обумовило легкі збурення коливань інфразвуку порівняно зі спокійними коливаннями. Спалах розпочався о 19:41 LT електромагнітним випромінюванням з густиною потоку енергії в рентгенівському діапазоні 9 мкВт/м^2 . Інтенсивне корпускулярне випромінювання почалось 5 квітня в 0:55 LT і досягнуло максимуму о 13:30 LT. Вже через півдобу ці частинки досягли магнітосфери Землі і викликали збурення в геомагнітному полі і нейтральній атмосфері, про що можна зробити висновок зі зростаючих збурень в коливаннях інфразвуку 5 квітня (рис. 7, б). Про нерівномірність інтенсивності викиду сонячних протонів можна судити з реалізації коливань інфразвуку 6 квітня. Розмах коливань в першу половину доби значно зменшується, мало відрізняється від незбурених коливань, а в другу — різко зростає і залишається таким і 7 квітня. Далі, 8 квітня спо-

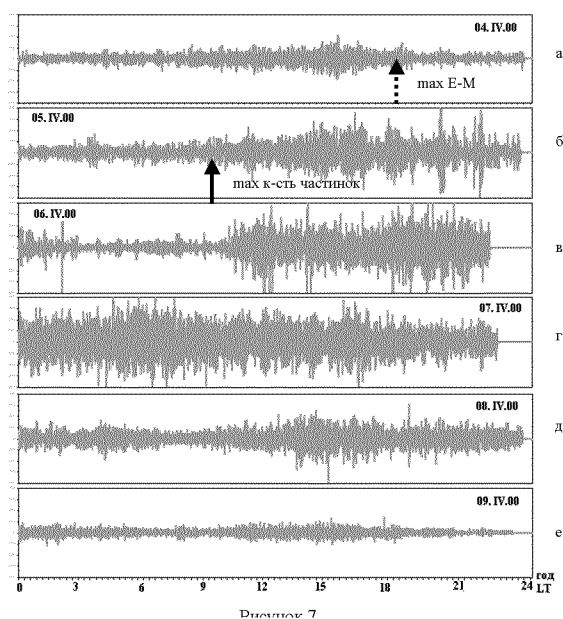


Рис. 7. Добові реалізації інфразвуку за період 4—9 вересня 2000 р. Пунктирна стрілка вказує на максимальне електромагнітне випромінювання спалаху, суцільна — на максимальну кількість частинок

стерігається поступовий спад збурень атмосфери, викликаних сонячним спалахом. 9 квітня характеризується переходом до спокійних коливань інфразвуку. Як і у попередніх випадках, у даного сонячного спалаху немає збільшення розмаху коливань інфразвуку під дією електромагнітного випромінювання. Тут не слід було чекати іншого результату, оскільки електромагнітний спалах спостерігався на фоні легкого збурення атмосферного інфразвуку. Можливо, це затухаючі відголоси збурення інфразвуку, які викликані щорічним метеорним потоком Віргініди 1. Максимум цього потоку припадає на 1 квітня.

Порівнюючи стан інфразвуку 1 квітня 2000 р. (рис. 8) і, наприклад, 7 квітня 2000 р. (рис. 7, г), можна припустити, що акустична реакція атмосфери на сонячний спалах помітно перевищує ефект дії метеорного потоку.

У жовтні — листопаді 2003 р. під час різкого зростання сонячної активності відбулись декілька потужних сонячних спалахів. В двох з них (28 жовтня і 2 листопада) відбулося прискорення протонів до енергії, вищої за 1 Гев, яке зареєстроване штучним супутником Землі серії

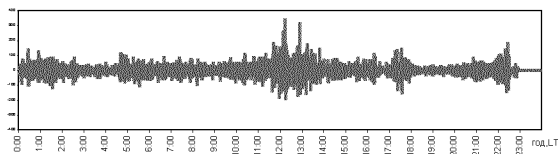


Рис. 8. Довова реалізація інфразвуку за 1 квітня 2000 р.

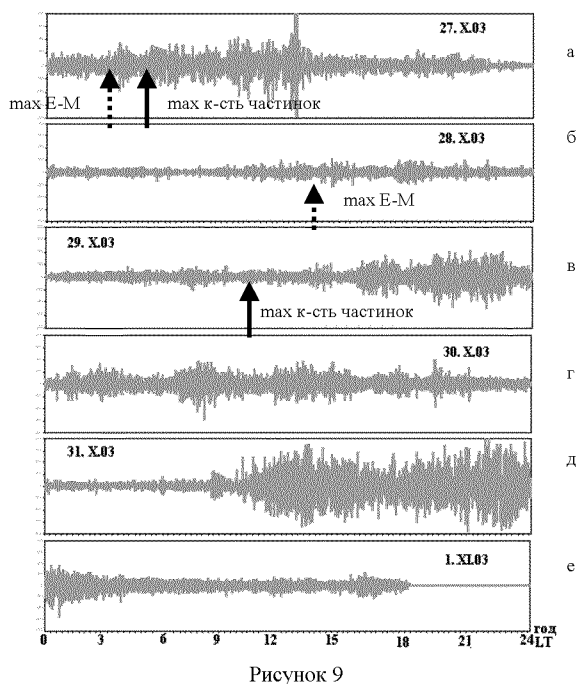


Рисунок 9

Рис. 9. Довові реалізації інфразвуку з 27 жовтня по 1 листопада 2003 р. Пунктирна стрілка вказує на максимальне електромагнітне випромінювання спалаху, суцільна — на максимальну кількість частинок

GOES і мережею наземних нейтронних моніторів [11]. Ці спалахи примітні також небувалим зростанням інтенсивності електромагнітного випромінювання. На рис. 9 продемонстрована реакція інфразвуку на ці спалахи. 26 жовтня 2003 р. о 22:19 LT розпочався електромагнітний сонячний спалах з густиною потоку енергії 100 мкВт/м^2 . Відразу після цього, о 22:25 LT, розпочався викид частинок сонячної речовини. Потік цих частинок досягнув свого максимуму о 2:35 LT 27 жовтня. Як видно з рис. 9, а, першу

половину доби 27 жовтня коливання інфразвуку були збуреними, їхній розмах збільшений. Цей факт важко пояснити. Він пов'язаний, мабуть, із збуренням магнітосфери, яке викликаним підсиленням сонячним вітром ще до цього спалаху. Друга половина доби 27 жовтня відзначена заспокоєнням коливань інфразвуку. Спад коливань продовжується приблизно до 9:00 LT 28 жовтня (рис. 9, б). Цей спад викликаний зменшенням потоку сонячних космічних променів, які надходять в магнітосферу Землі. Можна припустити, що зменшення потоку сонячних космічних променів відбувається під дією ударної хвилі, яка після сонячного спалаху прямує до Землі. Після досягнення ударною хвилею Землі розпочинаються збурення в магнітосфері та іоносфері, які призводять до збурень в нейтральній атмосфері, про що свідчать збільшення розмаху коливань інфразвуку після 9:00 LT 28 жовтня.

28 жовтня о 15:10 LT розпочався один з найпотужніших спалахів за всю історію спостережень. Густина потоку електромагнітної енергії цього спалаху 1700 мкВт/м^2 . В той же день о 16:15 LT починається інтенсивний викид частинок, який досягає максимуму 29 жовтня о 10:15 LT. З початком електромагнітного спалаху починається викид релятивістських сонячних протонів. Потік цих протонів був практично незмінний до 10:00 LT 29 жовтня [11], тобто, до часу приходу ударної хвилі до Землі.

Аналізуючи графік коливань інфразвуку за 28 жовтня, бачимо, що в інфразвучі не спостерігається зміни розмаху коливань у відповідь на дуже потужний електромагнітний спалах і на прихід релятивістських сонячних протонів. Більш того, з початком 29 жовтня спостерігається заспокоєння коливань інфразвуку і поступове зростання їхнього розмаху тільки після приходу до Землі ударної хвилі (після 10:00 LT). Кінець доби 29 жовтня — це час наближення до Землі підсиленого після сонячного спалаху сонячного вітру. Швидкість цього вітру значно менша за швидкість початкових протонів, але густина потоку частинок вітру на декілька порядків вища за густину потоку початкових частинок високої енергії. Тому цей сонячний вітер викликає значно більші збурення магнітосфери Землі, які через ланцюг різноманітних процесів призводять до більш значних збурень нейтраль-

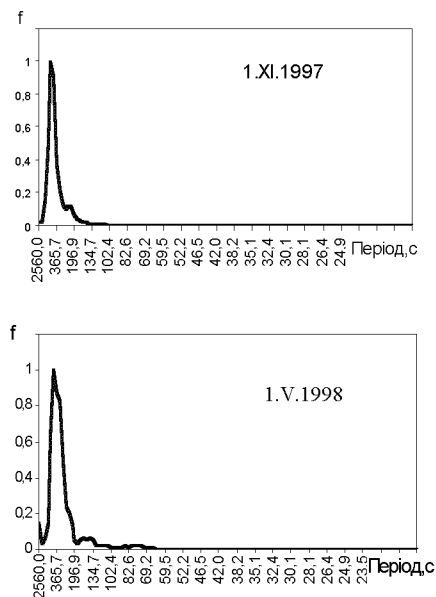


Рис. 10. Графіки типового вигляду спектральної густини незбуреного інфразвуку

ної атмосфери, про що можна судити за суттєво збуреними коливаннями інфразвуку 30 і 31 жовтня. По графіку реалізації інфразвуку за 1 листопада можна спостерігати за процесом заспокоєння коливань після магнітної бурі і, як наслідок, установлення звичайного незбуреного рівня сонячного вітру.

Таким чином, реакція інфразвуку (збільшення розмаху коливань) на один з найпотужніших сонячних спалахів суттєво не відрізняється від реакції на сонячні спалахи значно меншої потужності.

Помітне збільшення розмаху коливань інфразвуку спостерігається через 1—3 доби після початку сонячного спалаху і є, очевидно, результатом процесів, викликаних магнітною бурєю після приходу в магнітосферу Землі дуже посиленого сонячного вітру та впливу потоку частинок на нейтральну атмосферу. Не знайдено збільшення коливань інфразвуку під дією електромагнітного випромінювання сонячного спалаху і приходу початкових релятивістських протонів.

Відсутність змін розмаху коливань ще не означає, що реакції інфразвуку на спалахові процеси на Сонці немає. В цьому переконують

зміни спектрального складу інфразвуку під час спалаху і після нього. Спектральні характеристики більш чутливі до зміни умов існування інфразвукових коливань, ніж величина розмаху коливань. На рис. 10 представлено графіки типового вигляду спектральної густини інфразвуку при відсутності його збурення. Це крива з одним піком відносно вузької ширини.

На рис. 11 показано оцінки спектральної густини інфразвуку у проміжках часу впродовж всіх фаз сонячного спалаху, який почався 14 листопада 1998 р. о 8:18 LT. Спектральна густина коливань практично незмінна від початку доби і до моменту початку спалаху (рис. 11, а, б). Але з 9:00 до 11:00 LT (рис. 11, в) характер оцінки різко змінюється: з'являються нові піки, які були відсутні при незбурених коливаннях. Таким чином, якщо на графіку реалізації інфразвуку (рис. 4, б) після початку спалаху з 9:00 до 11:00 LT відсутні будь-які значні зміни, то оцінка спектральної густини дозволяє виявити реакцію інфразвуку на електромагнітний спалах на Сонці. Після електромагнітного збурення атмосфери коливання інфразвуку згідно з рис. 11, в стають більш хаотичними, з'являються високочастотні складові, яких не було при незбуреному інфразвучі. До вечора 14 листопада інфразвук повертається до спокійних коливань (рис. 11, г) і залишається таким наступну добу (рис. 11, д). Зростання сонячного вітру досягло магнітосфери Землі 16 листопада. Цьому відповідає і збурена спектральна густина інфразвуку (рис. 11, е) і особливо після 17 листопада (рис. 11, ж). Ці дні відзначені, згідно з рис. 4, г, д, і найбільшим розмахом коливань. Після 19 листопада атмосфера повертається у спокійний стан. Про це свідчить вид оцінки спектральної густини інфразвуку на рис. 11, з.

Як вже було зазначено, сонячний спалах 20 січня 1999 р. характеризувався відносно великою густиною енергії електромагнітного випромінювання. Також цей спалах відмічений порівняно малою густиною потоку протонів з енергією понад 10 MeV, які спостерігались після електромагнітного випромінювання. У відповідності з двома цими особливостями динаміка зміни спектральної густини інфразвуку перед цим спалахом і після нього має характерний вигляд, який показано на рис. 12.

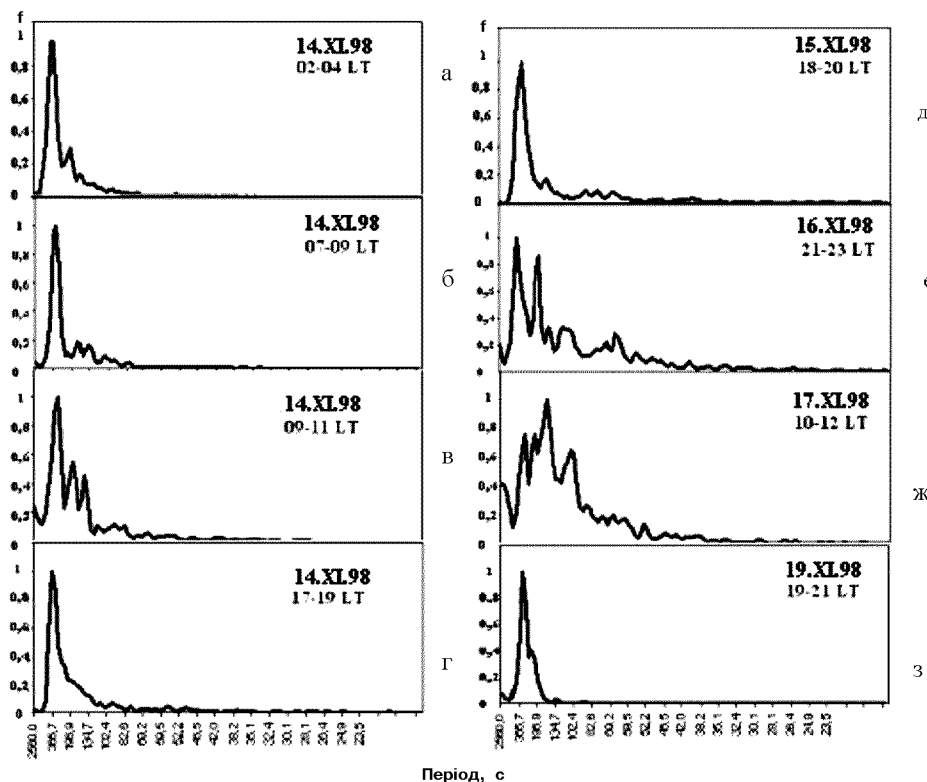


Рис. 11. Оцінки спектральної густини інфразвуку за двогодинними відрізками реалізацій у період 14—19 листопада 1998 р.

Спалах розпочався 20 січня о 23:04 LT. Безпосередньо перед спалахом оцінка спектральної густини інфразвуку має вигляд, близький до вигляду оцінки спектральної густини незбурених коливань (рис. 12, а). А вже на графіку спектральної густини після спалаху (рис. 12, б) виявляється реакція інфразвуку на електромагнітне випромінювання спалаху. Ця реакція полягає у виникненні трьох сумірних за інтенсивністю піків. До 12:00 LT 21 січня збурення, які викликані електромагнітним спалахом, згасають. Про що свідчить вигляд графіка спектральної густини з одним чітко вираженим піком (рис. 12, в). Згідно з рис. 6 зростання коливань інфразвуку починається тільки 24 січня, стають максимальними 25, 26 січня, а з другої половини доби 27 січня починають спадати. Це відповідає часу приходу сонячного вітру, якій помітно зріс після спалаху. Тому 22 і 23 січня — це час спокійних коливань інфразвуку, що підтверджують графіки на рис. 12, г, д. Однак

вигляд графіків оцінок спектральних густин інфразвуку 24—27 січня (рис. 12, е—і) не відрізняється, або мало відрізняється від спектральних густин незбурених коливань і виявляє незначні зміни спектру. Це, безумовно, зв'язано з малою густиною потоку протонів з високою енергією. Таким чином, суттєві спектральні зміни коливань інфразвуку відбуваються під дією сонячного спалаху з відносно високою густиною потоку високоенергетичних протонів, а збільшення розмаху коливань інфразвуку відбувається і в результаті відносно слабких сонячних спалахів, але при наявності магнітної бурі. Крім того, оцінка спектральної густини дозволяє виявити і реакцію інфразвуку на електромагнітне випромінювання сонячного спалаху, в той час як зміни розмаху коливань при цьому не спостерігаються.

Повертаючись до реакції інфразвуку на сонячний спалах 20 січня, робимо висновок, що згідно з рис. 6 і рис. 12, к 28 січня ця реакція спадає,

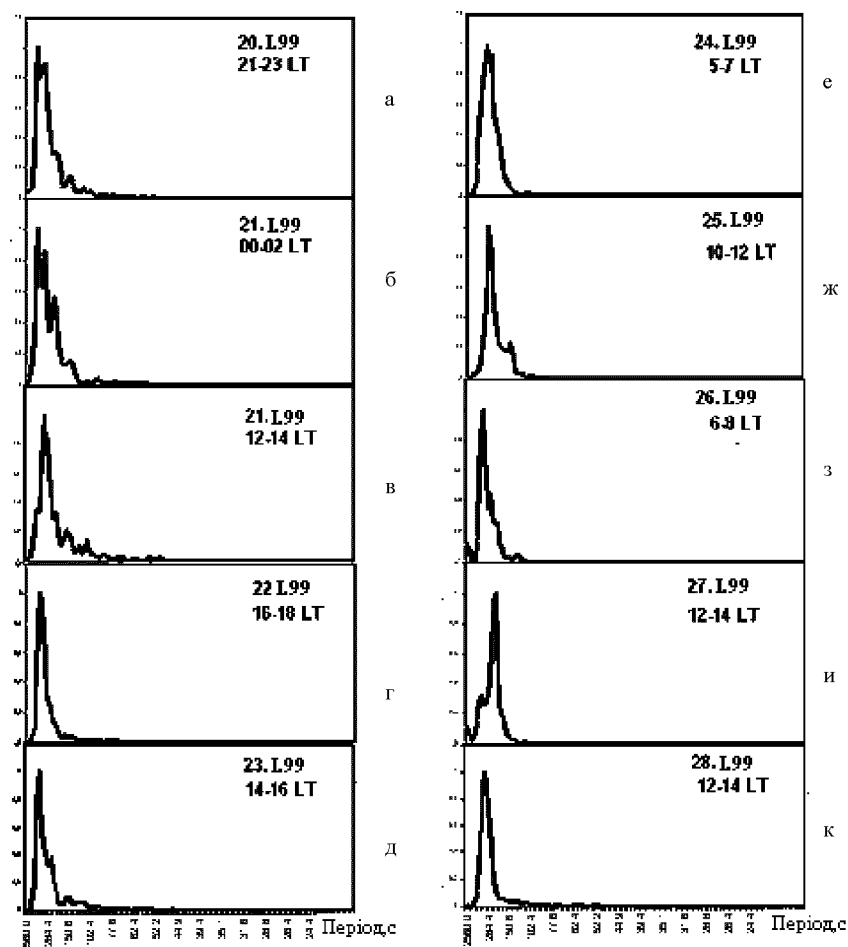


Рис. 12. Оцінки спектральної густини інфразвуку за двогодинними відрізками реалізацій в період 20—28 січня 1999 р.

коливання інфразвуку відбуваються з порівняно малим протягом доби постійним розмахом і характеризуються тільки одним вузьким піком спектральної густини.

Закономірності реакції інфразвуку на сонячні спалахи проявляються в кожному окремому випадку індивідуальними особливостями, які визначаються в основному відмінністю характеристик окремих сонячних спалахів. Наприклад, для спалахів з низькою густиною потоку енергії електромагнітного випромінювання в оцінках спектральної густини інфразвуку не виявлено реакції на електромагнітне випромінювання спалаху. В реакціях на більш потужні спалахи є

особливості, яких немає для менш потужних сонячних спалахів. Оцінка спектральної густини інфразвуку після одного з найпотужніших сонячних спалахів 28 жовтня 2003 (рис. 13) характеризується збуреннями по всій осі частот, що для інших спалахів не спостерігалось.

3. ІНФРАЗВУКОВА РЕАКЦІЯ АТМОСФЕРИ НА МЕТЕОРНІ ПОТОКИ

Одним із джерел атмосферного інфразвуку другого типу є метеорні потоки. Болідні явища викликають акустичні збурення, які можна чути

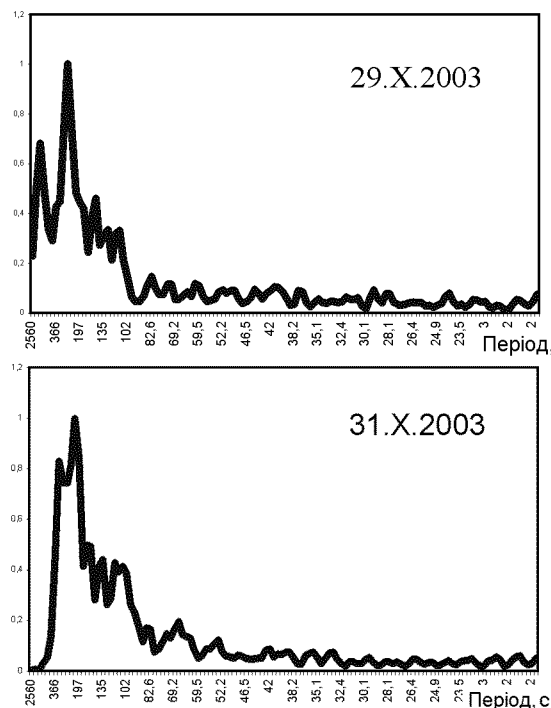


Рис. 13. Оцінки спектральної густини інфразвуку за дводинними відрізками реалізацій за 29 та 31 жовтня 2003 р.

на поверхні Землі [13]. Існує гіпотеза, що і потоки дрібних метеорів генерують інфразвуки, які досягають поверхні Землі.

Проникнення метеорної речовини в атмосферу є однією із сторін матеріального обміну між Землею і Космосом. Завдяки великій швидкості метеорна частинка може розвивати потужність в десятки і сотні кіловат [1].

Висота, на яку проникає метеор, залежить від швидкості, маси, густини метеорного тіла і нахилу його траєкторії до горизонту. В основному метеори проникають на висоти від 120 до 60 км від поверхні Землі. Швидкості руху метеорних тіл різні — від 11 до 75 км/с. Чим більша швидкість метеорного тіла, тим більша висота початку його руйнування і світіння метеора. Метеор з більшою швидкістю набагато частіше стикається з частинками повітря. При одній і тій же швидкості глибина, на яку проникає метеор в атмосферу, залежить від його маси і густини.

Що більша маса і густина, то глибше він проникає в атмосферу Землі [2].

Для розуміння процесів, які протікають в атмосфері при прольоті метеора, потрібно розглянути основні явища, пов'язані з цим.

На висотах 60—120 км атмосфера в основному складається із азоту і кисню, приблизно в такій ж пропорції, як у приземному шарі. Густина і тиск повітря в метеорній зоні в сотні мільйонів раз менша, ніж на поверхні Землі. Коли метеорне тіло входить в цю розріджену атмосферу, воно піддається інтенсивному бомбардуванню молекулами і атомами повітря, які при пружних зіткненнях відштовхуються або з силою втискаються в кристалічну ґратку метеора. Чим глибше в земну атмосферу проникає метеор, тим більша стає густина повітря, і метеорне тіло більше піддається бомбардуванню молекулами повітря. Внаслідок зростаючого опору атмосфери метеор гальмується, нагрівається, кришиться, плавиться і випаровується.

При русі метеорного тіла в атмосферному середовищі його швидкість і маса безперервно зменшуються. Якщо знехтувати силою притягання Землі (оскільки вона значно менша, ніж сила опору повітря), то рух метеорного тіла описується рівнянням [2]

$$M \frac{dv}{dt} = -\Gamma S \rho v^2, \quad (2)$$

де M — маса метеорного тіла в даний момент, v — його швидкість, Γ — коефіцієнт лобового опору (у більшості випадків $0.5 \leq \Gamma \leq 1.0$), S — площа поперечного перерізу метеора, ρ — густина повітря, а dv/dt — гальмування метеора. Рівняння (2) є основою для розрахунку енерговиділення метеора.

Частково кінетична енергія метеора перетворюється в акустичні хвилі [9]. Більшість метеорів згорає на великих висотах. Згідно з розрахунками збурення тиску на поверхні Землі при прольоті метеора з початковою масою 1 кг складає 250 мкН/см^2 [9]. Максимальна амплітуда тиску спостерігається у площині, перпендикулярній до осі сліду метеорита. Великі метеорити з'являються рідко, проте акустичні збурення, викликані ними, значні [15].

В роботі [10] показано, що під час метеорних потоків на висотах 70—130 км формуються нано- і мікромасштабні частинки. Підтвердженням

цьому явищу можуть служити спостереження стійких «пилових» електромагнітних ліній на фоні радішумів іоносфери [12], які є результатом модуляційної взаємодії електромагнітних хвиль з пиловими звуковими хвилями. В [10] показано, що наявність низькочастотних пилових звукових збурень може приводити до генерації інфразвукових коливань. Також порушені питання можливості спостереження цих збурень на поверхні Землі поряд з флуктуаціями шумів іоносфери під час метеорних потоків.

Після прольоту метеора з надзвуковою швидкістю створюється ударна хвиля. На фронті ударної хвилі скачком зростають тиск, густина і температура набігаючого газу. Ударна хвиля породжує акустичну, яка починає розширюватись, розходитись у всі сторони, в тому числі і до земної поверхні.

При поширенні вниз акустична хвиля зустрічає все густіші шари повітря, в рух доводиться залучати (в тому ж об'ємі) все більше молекул, тому акустична хвиля, яка поширюється вниз, втрачає енергію і швидкість сильніше, ніж хвиля, яка поширюється догори [4].

З таких міркувань передача хвильової енергії зверху вниз затруднена. Амплітуда коливань при поширенні вниз має падати по експоненті $\exp(-z/2H)$, де H — висота однорідної атмосфери. Акустичні коливання від метеорів виникають на великих висотах, і при поширенні до поверхні Землі загасають. При цьому ніякого впливу на земні процеси не має виявитись. Рішення парадоксу можливе шляхом введення атмосферних підсилювачів хвильових процесів, причому, коефіцієнт підсилення має задовольняти умову $k > \exp(-z/2H)$.

Для реалізації підсилення акустичних збурень в середовищі, в якому поширюється хвиля, має бути прихована енергія. При поширенні хвилі в такому середовищі прихована енергія перекачується із середовища у хвилю. Можна виділити декілька значних атмосферних резервуарів енергії: енергія внутрішніх станів нерівноважно розігрітих газів, енергія хімічних реакцій, енергія фазових переходів води, електростатична енергія. На рис. 14 схематично показані області, де розміщені резервуари прихованої енергії.

На висотах від 40 до 80 км створюються умови для нерівноважного розігріву газу. Під дією сонячної радіації температура внутрішніх станів

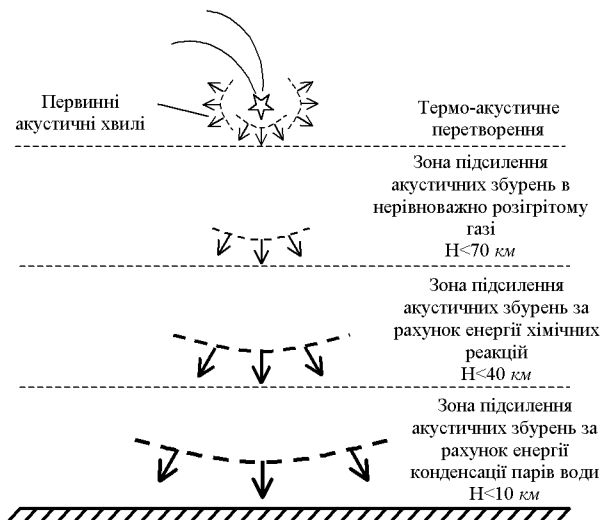


Рис. 14. Схема можливих механізмів підсилення акустичних збурень, які викликані проходженням метеорів

молекул (коливних, обертових) може перевищувати температуру поступальних рухів. Акустична нестійкість в таких середовищах пов'язана з виконанням критерію Релея: в максимумі хвилі тепловиділення збільшується за рахунок внутрішньої енергії молекул. При цьому буде зростати різниця тисків між областями стиску і розрідження у звуковій хвилі.

В лабораторних умовах ефект підсилення акустичних збурень відомий [8]. Нерівноважний стан газового середовища в реальній атмосфері створюється ультрафіолетовою радіацією Сонця.

На менших висотах (10—40 км) підсилення акустичних збурень може відбуватись за рахунок енергії хімічних реакцій. Умови підсилення в цьому випадку практично такі ж, як і в нерівноважних газах. В фазі стиску акустичної хвилі має виділятися додаткове тепло хімічної реакції. Можна припустити, що такою реакцією може виступати цикл Чепмена утворення і руйнування атмосферного озону. Проте ця гіпотеза потребує детальніших теоретичних і експериментальних досліджень.

Можливо, найбільш потужний підсилювач газодинамічних збурень реалізується в тропосфері. Джерелом прихованої енергії є енергія фазових переходів води. В даному випадку необхідно враховувати три складові — газ, пара і краплі.

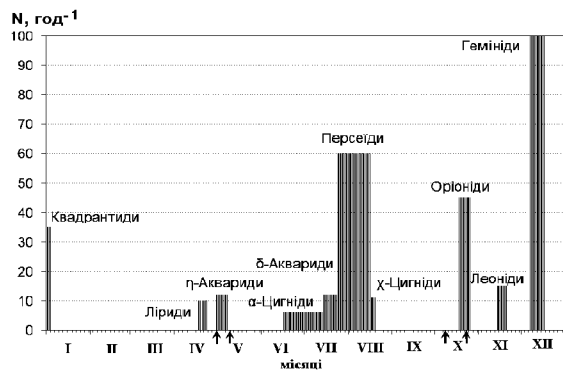
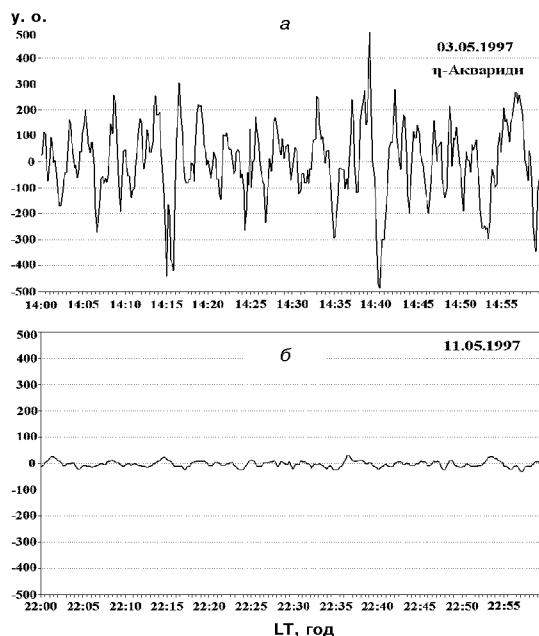


Рис. 15. Основні щорічні метеорні потоки

Рис. 16. Реалізації інфразвуку під час метеорного потоку η -Аквариди (а) і коли його немає (б)

В такому середовищі може бути декілька режимів підсилення інфразвуку — когерентний, некогерентний, некогерентний з додатковими джерелами енергії.

Активність метеорних потоків в різні роки різна. Бувають роки, коли кількість метеорів, які належать потоку, дуже мала, а в інші роки (які повторюються, як правило, з визначеним періодом) настільки велика, що саме явище

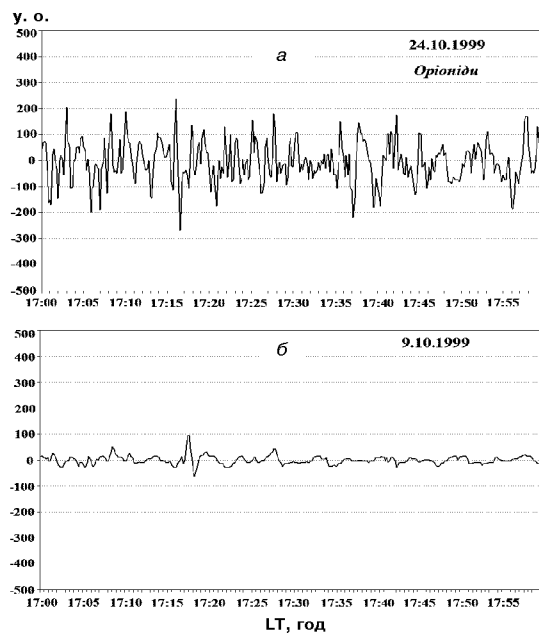


Рис. 17. Реалізації інфразвуку під час метеорного потоку Орionіди (а) і коли його немає (б)

отримало назву зоряного дощу. Зміна активності метеорних потоків пояснюється тим, що метеорні частинки в потоках нерівномірно розподілені вздовж еліптичної орбіти, яка перетинає земну орбіту.

На рис. 15 показано інтенсивність і період активності основних щорічних метеорних потоків. Дані про метеорні потоки брались зі щорічних астрономічних календарів.

Для якісного аналізу рівня інфразвуку під час метеорного потоку і без нього були побудовані графіки 10-секундних відліків реалізацій інфразвуку за одну годину (рис. 16, 17). Стрілками на рис. 15 позначені дні, взяті для аналізу (при наявності метеорного потоку і без нього). На рис. 16, а) представлені дані реалізацій інфразвуку за 3 травня 1997 р. (з 14:00 до 15:00), під час активності метеорного потоку η -Аквариди, а на рис. 16, б — коли його немає, 11 травня 1997 р. з 22:00 до 23:00 LT. Такі ж графіки побудовано і для метеорного потоку Орionіди (рис. 17, а) за 22 жовтня 1999 р. з 17:00 до 18:00 LT, і для періоду, коли його немає (рис. 17, б)

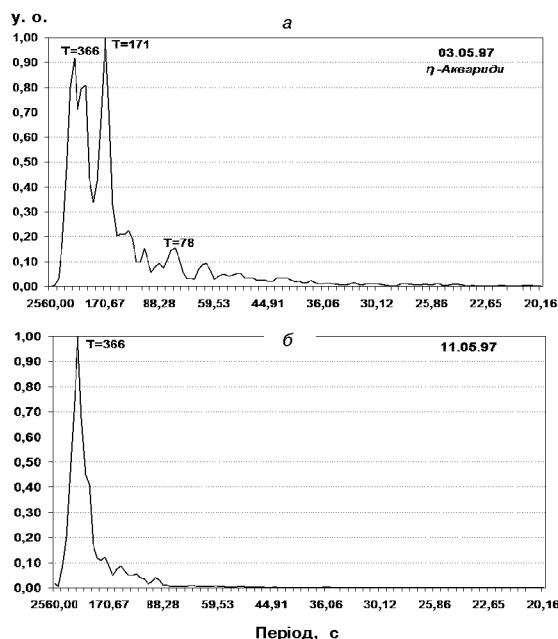


Рис. 18. Спектральна густина інфразвуку метеорного потоку η -Аквариди (а) і коли його немає (б)

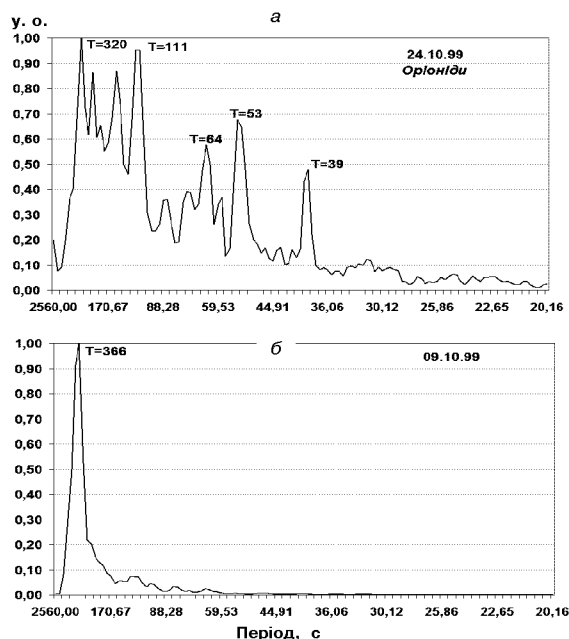


Рис. 19. Спектральна густина інфразвуку метеорного потоку Оріоніди (а) і коли його немає (б)

за 9 жовтня 1999 р. з 17:00 до 18:00 LT. Видно, що розмахи коливаль і динаміка змін інфразвуку в дні, коли є метеорний потік, і коли його немає, відрізняються.

На рис. 18, а та 19, а показані спектральні характеристики інфразвуку у дні, коли є метеорний потік, а на рис. 18, б і 19, б — коли його немає. Видно, що під час метеорного потоку спектр інфразвуку розширюється, і з'являються додаткові максимуми на малих періодах.

Число метеорів, які реєструються за одну годину, змінюється протягом доби. Часове число метеорів є мінімальним близько 18 години місцевого часу і максимальним у ранішні часи (близько 6 години). Виявляється, що після півночі метеорів у середньому в два рази більше, ніж у вечірні години [9].

Як змінюються спектральні густини характеристики інфразвуку протягом дня під час метеорного потоку і без нього, показано на рис. 20, 21. Із рис. 20 видно, що під час метеорного потоку η -Аквариди спектральні густини інфразвуку відрізняються в залежності від години, і спектр багатопіковий, тобто з'являються максимуми на малих періодах. Коли метеорного потоку немає (рис. 21) характер спектру суттєво відрізняється (спектр однопіковий).

ку немає (рис. 21) характер спектру суттєво відрізняється (спектр однопіковий).

4. ОСНОВНІ МІШЕНІ ВПЛИВУ ІНФРАЗВУКУ. МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ІНФРАЗВУКУ

Важливим розділом досліджень сонячно-земних зв'язків є пошук найбільш чутливих до даного фізичного носія зв'язку об'єктів та процесів. В даному випадку це об'єкти та процеси, чутливі до інфразвуку. Найбільше досліджень в цьому напрямку присвячено магнітним полям. Лише в роботі Б. М. Володимирського [6] вказувалось на необхідність досліджень інфразвуку як фактору, що передає вплив сонячної активності на біосферу.

Чутливими до акустичних хвиль є як макропроцеси навколишнього середовища, так і мікропроцеси всередині окремих організмів.

Лабораторні експерименти в спеціальному боксі показали вплив інфразвуку на провідність та в'язкість водних розчинів солей (рис. 22). Причому електропровідність змінюється в протифазі до в'язкості. Таким чином, слід було

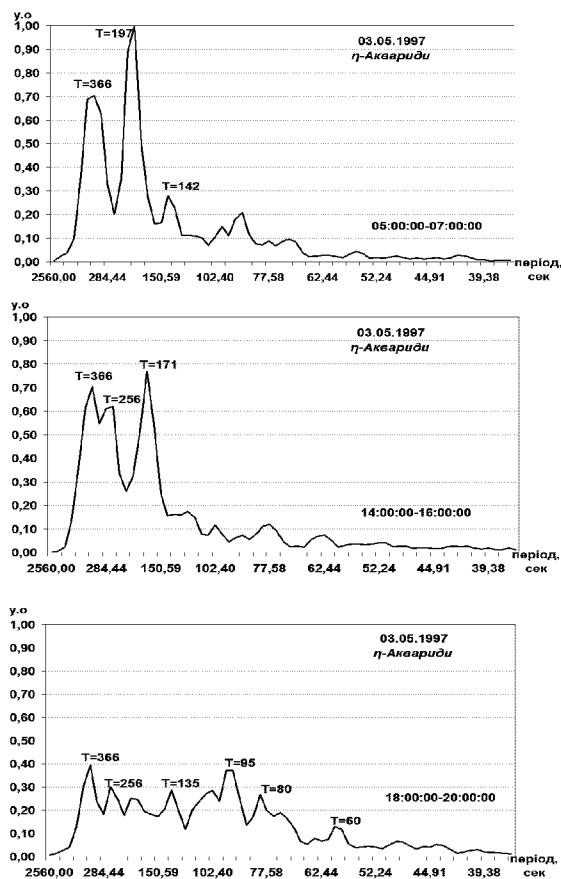


Рис. 20. Спектральні густини інфразвуку протягом дня під час метеорного потоку η -Аквариди

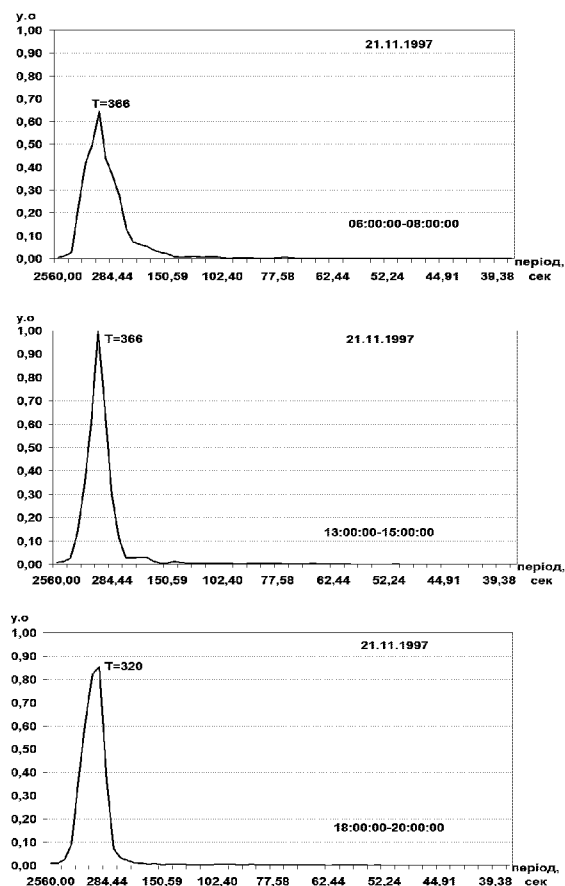


Рис. 21. Спектральні густини інфразвуку протягом дня, коли немає метеорного потоку

очікувати впливу інфразвуку на рух рідин в капілярних системах. Експерименти підтвердили цей факт [14]. Враховуючи, що практично всі біоб'єкти є капілярними системами, заповненими рідиною, вплив інфразвуку може мати глобальні наслідки.

Чутливими до дії акустичних хвиль є атмосферні тумани, опади. На основі цього ефекту вже створені акустичні засоби розгону туманів атмосфери [7]. Експериментально виявлено вплив акустичних збурень на локальні зміни швидкості вітру. На рис. 23 показано зміни швидкості вітру після короткочасного акустичного (~ 1 хв) збурення атмосфери параметричним акустичним випромінювачем на різницевій частоті 20 Гц.

Як показали експериментальні дослідження штучні акустичні збурення впливають на електромагнітні поля в різних діапазонах. На рис. 24 показано зміни геомагнітних варіацій в діапазоні 1—40 Гц після штучного акустичного збурення протягом 1 хв.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально виявлено реакцію атмосферного інфразвуку на сонячні спалахи. Після спалаху відбувається збільшення розмаху коливань інфразвуку і поява нових піків у спектральній густині (в рамках моделі стаціонарного випадкового процесу) в діапазоні періодів 40—

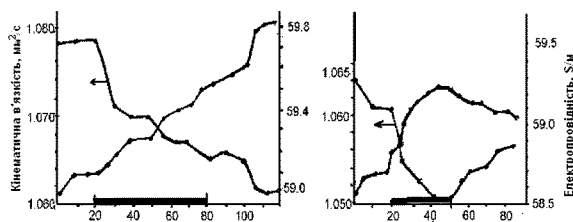


Рис. 22. Зміна в'язкості і електропровідності розчинів: *a* — частота 0.08 Гц, $\Delta P = 75$ Па, $T = 19^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 0.995 \cdot 10^5$ Па; *б* — частота 0.08 Гц, $\Delta P = 65 \dots 75$ Па, $T = 19.5^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 0.992 \cdot 10^5$ Па

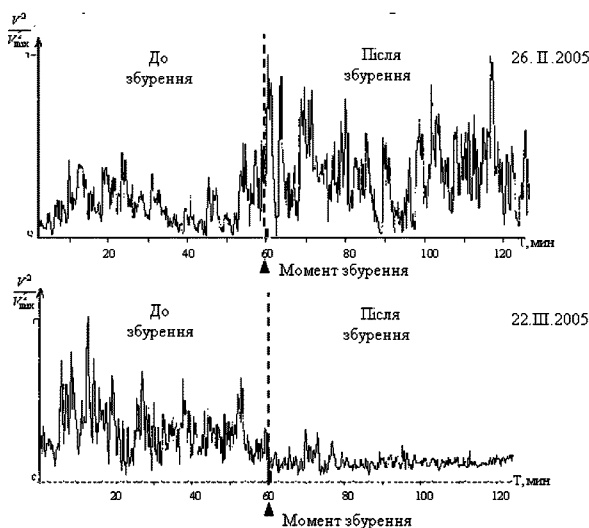


Рис. 23. Характерні зміни швидкості вітру після акустичного збурення протягом 1 хв

200 с. Незбурений інфразвук має один спектральний пік на частоті, що має період приблизно 360 с. Аналогічні зміни спостерігались і після дії метеорних потоків з дещо вищою частотою.

2. Проведено модельні експерименти із впливу інфразвуку на атмосферні процеси. Виявлено вплив інфразвуку на електропровідність та в'язкість водних розчинів солей.

3. Отримані результати підтверджують факт космічного впливу на атмосферний інфразвук і реальність акустичного каналу сонячно-земних зв'язків.

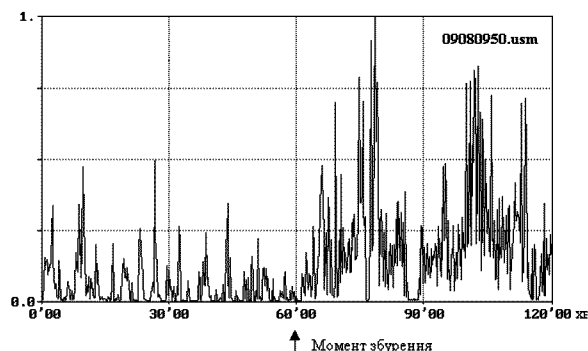


Рис. 24. Зміни геомагнітних варіацій в діапазоні 1—40 Гц після штучного акустичного збурення протягом 1 хв

Робота проводилась в рамках програми НАН України «Розробка теорії, методів та інформаційних технологій комплексного вивчення сонячно-земних зв'язків як основа прогнозування «космічної погоди».

1. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Физматгиз, 1958.—640 с.
2. Бабаджанов П. Б. Метеоры и их наблюдение. — М.: Наука, 1987.—178 с.
3. Богданов М. Б., Сурков А. Н., Федоренко А. В. Влияние космических лучей на атмосферное давление в высокогорных условиях // Геомагнетизм и аэронавигация.—2006.—46, № 2.—С. 268—274.
4. Бронштэн В. А. Метеоры, метеориты, метеороиды. — М.: Наука, 1987.—173 с.
5. Веселовский И. С., Панасюк М. И., Авдюшин С. И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре—ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед.—2004.—42, № 5.—С. 453—508.
6. Владимирский Б. М. Атмосферный инфразвук как возможный фактор, передающий влияние солнечной активности на биосферу // Проблемы космической биологии / Под ред. В. М. Черниговского. — М.: Наука, 1982.—Т. 43.—С. 230.
7. Галечан Г. А. К вопросу стимулирования осадков акустическими волнами // Журн. техн. физ.—2005.—75, вып. 9.—С. 85—88.
8. Галечан Г. А., Даванян Э. Г., Мкртычан А. Р. Усиление звука в плазме // Акустический журн.—1990.—36, № 2.—С. 20—27.
9. Голицин Н. Д., Гуревич А. В. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1977.—13, № 9.—С. 926—935.
10. Копнин С. И., Попель С. И. Генерация инфразвуковых колебаний во время метеорных потоков // 49-я науч. конф. — М.: МФТИ, 2006. http://mipt.ru/nauka/conf49/z49/faki/program/kopnin_tezisy.pdf

11. Кузнецов С. Н., Юшков Б. Ю., Кудела К. Измерение спектра релятивистских протонов от солнечных вспышек 28 октября и 2 ноября 2003 г. на ИСЗ КОРОНАС-Ф // Космич. исслед.—2007.—45, № 4.—С. 397—400.
12. Мусатенко С. І., Мусатенко Ю. С., Курочка Є. В. та ін. Спостережні параметри пилової плазмової лінії під час високошвидкісних метеорних потоків // Четвертая Украинская конференция по космическим исследованиям: Сб. тез. — Крым, Понизовка, 2004.—С. 96.
13. Ольховатов А. Ю. Анализ механизмов генерации электрофонных звуков, сопровождающих болидные явления // Геомагнетизм и аэрономия.—1993.—№ 2.—С. 154—155.
14. Сорока С. А., Каратаева Л. М., Мезенцев В. П. Атмосферный инфразвук космического происхождения и его влияние на биосферу // VII Междунар. крым. конф. «Космос и биосфера», Крым, Судак, 1—6 октября 2007 г.
15. Шумилов О. И., Касаткина Е. А., Терещенко Е. Д. и

др. Регистрация инфразвука от Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Письма в ЖЭТФ.—77, вып. 2.—С. 121—123.

INFRA SOUND OF SPACE ORIGIN AND IT INFLUENCE ON TERRESTRIAL PROCESSES

*S. A. Soroka, V. P. Mezentssev,
L. M. Karataeva, O. S. Soroka*

The present work is devoted to atmospheric infrasound changes detection after solar flares and during star shows. Also, modeling of infrasound influence on typical biosphere elements was conducted. Capillars and water substances were chosen as typical elements. Infrasound influence on electrical conductivity and water saline solutions viscosity was detected. Obtained results confirmed the fact of space influence on atmospheric infrasound and give an opportunity to contend about acoustic channel solar-terrestrial relationship reality.