

УДК 550.388.2

Акустичне збурення іоносферної плазми наземним випромінювачем.

I. Експериментальне виявлення акусто-іоносферних збурень

В. В. Кошовий¹, С. О. Сорока²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

²Львівський центр Інституту космічних досліджень НАКАУ та НАН України

Надійшла до редакції 25.07.97

Стаття присвячена проблемі акусто-іоносферних збурень в частині експериментальної перевірки можливостей акустичного збурення іоносфери відносно малопотужним керованим акустичним випромінювачем та виявлення цього класу іоносферних збурень за допомогою радіофізичних комплексів на базі радіотелескопа декаметрового діапазону УРАН-3.

ВСТУП

Наявність шару іонізованої плазми в атмосфері Землі із складним просторово-часовим розподілом її параметрів, який є достатньо чутливим до дії різної природи фізичних явищ певної енергетики, створила унікальну можливість побудови інформаційних систем контролю фізичних процесів на Землі. Суть полягає в тому, що реєструючи просторово-часову динаміку параметрів іоносферної плазми в принципі можна ставити і вирішувати обернені задачі з виявлення, просторово-часової локалізації та фізичної ідентифікації тих фізичних явищ (об'єктів, джерел), які викликають зміни іоносферних параметрів.

Властивості іоносфери під дією зовнішніх впливів піддаються регулярним і нерегулярним варіаціям. Впродовж довгого часу режим іоносфери розглядався виключно у зв'язку із сонячними і космічними діями на неї. Однак дослідження приблизно останніх двадцяти років показали, що іоносфера чутливо реагує також на процеси, що відбуваються в атмосфері, гідросфері та літосфері. Цілий ряд фі-

зичних явищ та процесів природного та штучного походження знаходять відгук в іоносфері: вулканічна діяльність, цунамі, грози, запуски ракет, подолання літальними апаратами звукового бар'єру, поширення потужних радіо, акустичних і теплових сигналів та інші [5].

Згадані вище обернені задачі відновлення параметрів фізичних джерел і процесів за зареєстрованими параметрами іоносферної обстановки вимагають в першу чергу дослідження прямої задачі, тобто вивчення реакції іоносфери на ті чи інші енергетичні дії різного фізичного походження. Прямі задачі вимагають постановки відповідних експериментів, бажано з виділеною в чистому вигляді і керованою фізичною дією.

СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ АКУСТО-ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ

Одним із найпоширеніших видів фізичного впливу на іоносферу є акустичні збурення (АЗ). Практично всі види високоенергетичних явищ в атмосфері

Землі, особливо земного походження, генерують АЗ. Практично всі вони в різних методичних модифікаціях використовувалися для дослідження реакції іоносфери на АЗ. В якості зондуючих АЗ використовувалися ядерні вибухи [7, 15], хімічні вибухи [11], землетруси [2, 6], метеорологічні явища (грозові розряди), запуски ракет [4], космічні явища типу сонячного затемнення, проходження термінатора, падіння метеоритів, космічних станцій («Скайлеб», 11.07.1979 р.; «Салют», 07.02.1991 р.) та інші. Більшість з них мала некерований, поодинокий характер. Тому, починаючи з кінця 1970-х рр. в якості основного способу створення зондуючих АЗ почали використовуватись науково-дослідні наземні вибухи з еквівалентом в сотні тон тринітротолуолу (ТНТ). Найвідомішим серед них був проект МАССА (магнітосферно-атмосферні зв'язи при сейсмоакустических явленнях) [3]. Для реєстрації іоносферних збурень (ІЗ) використовувався широкий спектр методів дистанційного зондування іоносфери, в основному наземними засобами.

Аналіз результатів цих досліджень виходить за межі даної роботи. Відмітимо лише деякі аспекти проблеми акусто-іоносферних збурень (АІЗ).

Перший аспект — це класифікація джерел АЗ за потужністю. Характерний період акустичної хвилі (в секундах) наближено дорівнює

$$P = 4E^{1/3}, \quad (1)$$

де E — енергія джерела в еквівалентних одиницях (кт) ТНТ [5].

До потужних джерел відносяться підземні, наземні та повітряні ядерні вибухи з енергією $E \geq 10$ Мт. Вони породжують акустичні хвилі з характерним періодом $P \geq 1-2$ хв. До слабopotужних джерел акустичних збурень відносяться джерела, для яких $E = 0.1$ кт — 1 Мт. Вони породжують акустичні хвилі з характерним періодом 2 с—0.7 хв. До них відносяться хімічні вибухи, викиди вулканів, землетруси, припливи, сонячне затемнення, термінатор, ракети, літаки.

Другий аспект — це основні особливості впливу АЗ на іоносферу. Вибухи потужністю в сотні кілограмів ТНТ спричиняють АІЗ, амплітуда яких знаходиться на межі чутливості методів реєстрації (згідно з літературними джерелами).

Локалізовані (характерний розмір $L \leq 10$ км), крупномасштабні ($L \sim 10^2-10^3$ км) та глобальні ($L \sim 10^3-10^4$ км) АІЗ спостерігаються в іоносфері при енергіях впливу $W \geq 10^{11}$, 10^{12} та 10^{13} Дж відповідно [2]. При вибусі 300 т ТНТ в нижній атмосфері виділяється енергія порядку 10^{12} Дж.

Експериментально виявлено кілька груп швидко-

стей поширення АІЗ в іоносфері: 20—50, 6—8, 2—3, 1—1.5 та 0.3—0.7 (км/с) [2, 8, 12] та показано, що спричинені вибухами та землетрусами збурення охоплюють всю область іоносфери і магнітосферу. В нижній іоносфері — найбільш швидкі процеси аперіодичні і тривають 1—10 хв. В середній іоносфері — процеси періодичні (з періодом 5—20 хв) і тривають приблизно 1 год. Найбільш чітко спостерігається реакція іоносфери на дію хвиль акустичного типу. Ефекти реєструються при енергії $W \geq 10^{11}$ Дж на відстанях до 1000 км і більших.

АІЗ обумовлюють суттєві варіації характеристик радіосигналів в широкому діапазоні частот (від 1 кГц до 30 МГц): підсилення багатомодовості, доплерівське розширення спектрів, перерозподіл енергії по складових, фазові варіації радіосигналів, флуктуації рівня шумового радіовипромінювання іоносфери та ін.

Третій аспект пов'язаний з особливостями поширення атмосферних акустичних хвиль (ААХ). Висотний профіль швидкості поширення акустичної хвилі в значній мірі залежить від висотного розподілу температури [13] і визначає характерні часи затримки при висотному поширенні акустичної хвилі (табл. 1). Підкреслимо, що на висотах 100—200 км температура суттєво збільшується (з 250 К до 1400 К), що призводить до відповідного збільшення швидкості акустичної хвилі.

Таблиця 1. Висотний профіль часу поширення акустичної хвилі в атмосфері Землі

h , км	5	10	50	100	200	500
$\Delta t_{\text{атм}}$, хв	0.25	0.5	3.17	5.5	8.5	15

На амплітуду синусоїдальної акустичної хвилі, яка поширюється вертикально вгору, впливають два фактори. Перший — це зменшення густини повітря з висотою за експоненціальним законом, яке призводить до того, що амплітуда ААХ із збільшенням висоти спочатку збільшується пропорційно $\rho^{-1/2}$, де $\rho = \rho_0 \exp(-\alpha h)$ — густина повітря. На великих висотах переважає інший фактор — збільшення довжини вільного пробігу молекул, що призводить також до підвищеного загасання акустичної хвилі. Існує висота, де амплітуда синусоїдальної акустичної хвилі максимальна. Із зменшенням частоти ця висота та підсилення амплітуди акустичної хвилі збільшуються. В табл. 2 приведені періоди ААХ і висоти, на яких амплітуда ААХ на

Таблиця 2. Висотні зміни параметрів акустичної хвилі при її поширенні в атмосфері Землі

P, c	$h, км$	A/A_0
0.1	40	50
5	80	1000
10	120	3000
25	150	8000
50	200	20000
100	250	40000
200	300	60000

даній частоті максимальна та відношення A/A_0 (A_0 — амплітуда ААХ на Землі), яке характеризує її посилення.

Таким чином, атмосфера виступає підсилювачем сигналу та просторовим фільтром (чим вище, тим менша частота акустичної хвилі). Тому навіть відносно слабкі низькочастотні АЗ можуть досягати іоносферних висот, підсилюючись при цьому по амплітуді в тисячі разів. При таких великих амплітудах можуть домінувати нелінійні ефекти і

відбуватися відповідні трансформації типу ААХ із збільшенням висоти.

ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ КЕРОВАНОГО АКУСТИЧНОГО ЗБУДЖЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ АІЗ

Відомо, що одним із можливих каналів зв'язку підготовчих процесів землетрусів з іоносферними процесами являються акустичні хвилі низькочастотних діапазонів. Для вивчення інформаційних властивостей акустичного каналу поверхня Землі — іоносфера доцільне проведення регулярних експериментів по вивченню проходження низькочастотних акустичних хвиль до іоносферних висот, а також ефектів, які виникають при цьому в іоносфері. Очевидно, що такі експерименти потрібно проводити в різноманітних погодних і геофізичних умовах. Ці дослідження можуть стати основою формування інформаційних ознак для прогнозу сейсмічної активності.



Рис. 1. Зовнішній вигляд акустичного випромінювача

Результати акустичного зондування можуть бути використані і для дослідження параметрів самої іоносфери. Перехідні процеси в іоносфері після акустичного збудження дадуть інформацію про її властивості. Одночасне акустичне та електромагнітне (нагрівними стендами) збудження іоносфери могло б стати принципово новим методом вивчення іоносферної плазми.

До останнього часу акустичне збудження іоносфери реалізовувалось вибуховими методами. Ці методи АЗ іоносфери мають ряд недоліків, що заважають їхньому широкомасштабному використанню. Серед недоліків відмітимо наступні.

Вплив вибухів на іоносферу має комплексний характер і супроводжується не тільки АЗ, але й хімічними викидами, електромагнітним випромінюванням, інтенсивними газодинамічними потоками. Все це не дозволяє в чистому вигляді виділяти ефекти конкретних збурень. Вибухові методи є слабо керованими по інтенсивності та спектру акустичного випромінювання, їм притаманна слабка повторюваність параметрів АЗ навіть при однакових величинах вибухових зарядів. Як показує практика, для помітного впливу на іоносферу необхідні вибухові заряди в сотні тонн вибухівки, що створює значні екологічні та економічні проблеми. В Україні практично немає можливості розвивати вибухові методи збудження іоносфери. Крім того, вибухові методи важко узгодити з уже існуючими стаціонарними радіотехнічними засобами спостереження іоносфери.

Таким чином, доцільно створити дослідницький радіофізичний комплекс акусто-електромагнітного зондування (АЕЗ) на базі керованого потужного екологічно допустимого акустичного випромінювача (АВ), за допомогою якого можна було б ставити регулярні експерименти без часових і просторових обмежень.

АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для підтвердження можливості АЗ іоносфери наземним керованим акустичним випромінювачем була розроблена модель такого випромінювача (рис. 1) з електричною потужністю 150 кВт та акустичним к. к. д. біля 20 %. При середній тривалості роботи біля 60 с загальна випромінена акустична енергія складає приблизно $1.8 \cdot 10^6$ Дж. Ця енергія значно менша, ніж при вибухах, однак по енергії частот, які досягають іоносфери, випромінювач може мати переваги.

При оцінці поширення в атмосфері акустичних збурень від АВ можна вважати, що іоносферних

висот ймовірно досягають інфразвукові складові випромінювання (нижче 10 Гц), які утворюються за рахунок нелінійного параметричного ефекту в атмосфері при взаємодії двох акустичних хвиль різної частоти, генерованих двома акустичними генераторами, що входять до складу АВ [1].

Виявлення іоносферних збурень від дії АВ проводилось шляхом дистанційного зондування іоносфери за допомогою радіофізичних комплексів (РФК), створених на базі радіотелескопа (РТ) декаметрового діапазону УРАН-3 [14], розташованого в м. Шацьк Волинської обл. При цьому реалізовувались два типи методик:

- зондування іоносфери на просвіт зондуючими сигналами реперного космічного радіоджерела (КРД);
- слабонахилене радіозондування іоносфери зондуючими сигналами діючої короткохвильової радіостанції.

Використовувались три модифікації РФК, структура яких представлена на рис. 2. Перша — це модифікований радіоінтерферометр на базі двох

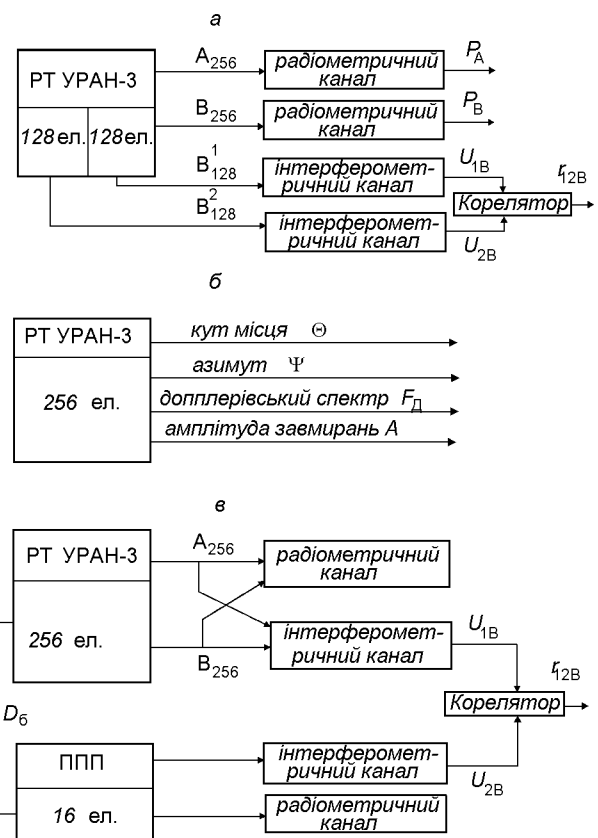


Рис. 2. Структура радіофізичних комплексів на базі радіотелескопа УРАН-3 для дослідження акусто-іоносферних збурень

половин антени РТ УРАН-3 (рис. 2, *a*). Реєстровані параметри: потужності сигналів P_A і P_B , прийнятих окремо поляризаціями A і B антени (256 елементів, радіометричні канали), та модуль взаємнокореляційної функції $|r_{B(t)_{s,c}}|$ сигналів, прийнятих кожною половиною антени (128 елементів) поляризації B . Друга — це іоносферно-діагностичний комплекс на базі РТ УРАН-3 (рис. 2, *b*). Алгоритм його роботи забезпечує програмно кероване сканування діаграмою спрямованості антени по куту місця Θ і азимуту Ψ та реєстрацію амплітуди завмирань A та доплерівського спектру F_d іоносферних сигналів. Третя модифікація — це короткобазовий радіоінтерферометр із змінною базою КБР УРАН-3 (рис. 2, *в*). Крім антени РТ УРАН-3 він містить пересувний приймальний пункт з розбірною антеною (16 елементів), змонтований на шасі автомобіля ЗІЛ-151, сигнали з якого ретранслюються на стаціонарний пункт РТ УРАН-3. Забезпечує можливість радіоінтерферометричних спостережень на змінних базах $0 \div 40$ км і реєстрацію наступних параметрів сигналів — потужності та квадратичних складових або модуль ВКФ сигналів із стаціонарної та пересувної антен.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АІЗ МЕТОДОМ НА ПРОСВІТ ІОНОСФЕРИ

Було розроблено і реалізовані дві методики, які використовували для зондування іоносфери на просвіт дм-випромінювання реперних КРД.

Методика № 1 (схема експерименту представлена на рис. 3, 1996 р.). Радіотелескоп УРАН-3 або КБР УРАН-3 працює в одному із режимів радіоінтерферометричних спостережень КРД (рис. 2, *a*, *в*). Випромінювання КРД реєструється протягом восьми 20-хв сканів. Під час середнього скану (момент кульмінації) включається АВ (м. Львів) з режимом роботи: 50 с звучання, 50 с пауза, три повтори. Геометричне розташування АВ та РТ УРАН-3 (база 200 км) таке, що в районі кульмінації інформаційний радіопромінь від КРД взаємодіє з АІЗ на висотах порядку 220—280 км.

Вибір радіоджерел проводився відповідно до вимог геометрії експерименту. Крім того КРД повинні бути достатньо потужні для впевненої їх реєстрації РФК УРАН-3. Було вибрано два радіоджерела, що задовольняли дані умови: ЗС274 та ЗС348; максимальна висота їх підйому (кульмінація) — 51° та 44° відповідно. Напрямок їх відслідковування — південь.

Вихідні параметри експериментів.

Час проведення експерименту: жовтень—грудень 1996 р.

Обладнання: Радіотелескоп УРАН-3 (м. Шацьк, Волинської обл.). Акустичний випромінювач (м. Львів).

Робоча частота спостережень радіоджерел: 25.230 МГц.

Основні робочі частоти акустичних генераторів в складі акустичного випромінювача: 100 Гц і 110 Гц.

Зондуючі космічні радіоджерела: ЗС274, ЗС348.

Потужність потоку випромінювання:

для джерела ЗС274 — 5300 Ян*,

для джерела ЗС348 — 2300 Ян.

Максимальний кут піднесення над горизонтом (кульмінація):

для джерела ЗС274 — 51° ,

для джерела ЗС348 — 44° .

Радіосигнали після акусто-електромагнітної взаємодії (АЕВ), тобто дифракції радіовипромінювання КРД на АІЗ, реєструються і обробляються на комп'ютері. На першому етапі експериментальних досліджень проведено по вісім сеансів запису потужності двох радіоджерел до і після АЗ та контрольні записи без АЗ (табл. 3).

Методика № 2 (схема проведення експерименту на рис. 3, 1997 р.). За допомогою РФК на базі РТ УРАН-3, які працюють в режимі радіоінтерферометричних спостережень (рис. 2, *a*, *в*), проводиться неперервна реєстрація в радіометричному каналі амплітуди випромінювання достатньо інтенсивних КРД, промені яких проходять над м. Львовом, в околі кульмінації джерел під час АЗ. Інтерферометричний канал створено на базі двох половин антенного поля з базою 100 м. Радіосигнали КРД реєструються протягом восьми 20-хв сканів. Під час середнього скану за 5 хв до моменту кульмінації включається АВ (м. Львів) у вибраному режимі роботи. Геометричне розташування АВ та радіотелескопа (база 200 км) таке, що в районі кульмінації зондує випромінювання радіоджерела взаємодіє з АІЗ на висотах порядку 150—250 км (в залежності від положення променя). Результати цієї взаємодії реєструються.

Вибір КРД проводиться відповідно до вимог геометрії експерименту. Крім того, джерела повинні бути достатньо потужні для впевненої їх реєстрації РФК УРАН-3. В табл. 4 і на рис. 4 приведені деякі характеристики найбільш типових КРД, які можна було використовувати в експериментах в якості реперних, час їхньої кульмінації, висоти над АВ та

* $1 \text{ Ян} = 10^{26} \text{ Дж/м}^2$

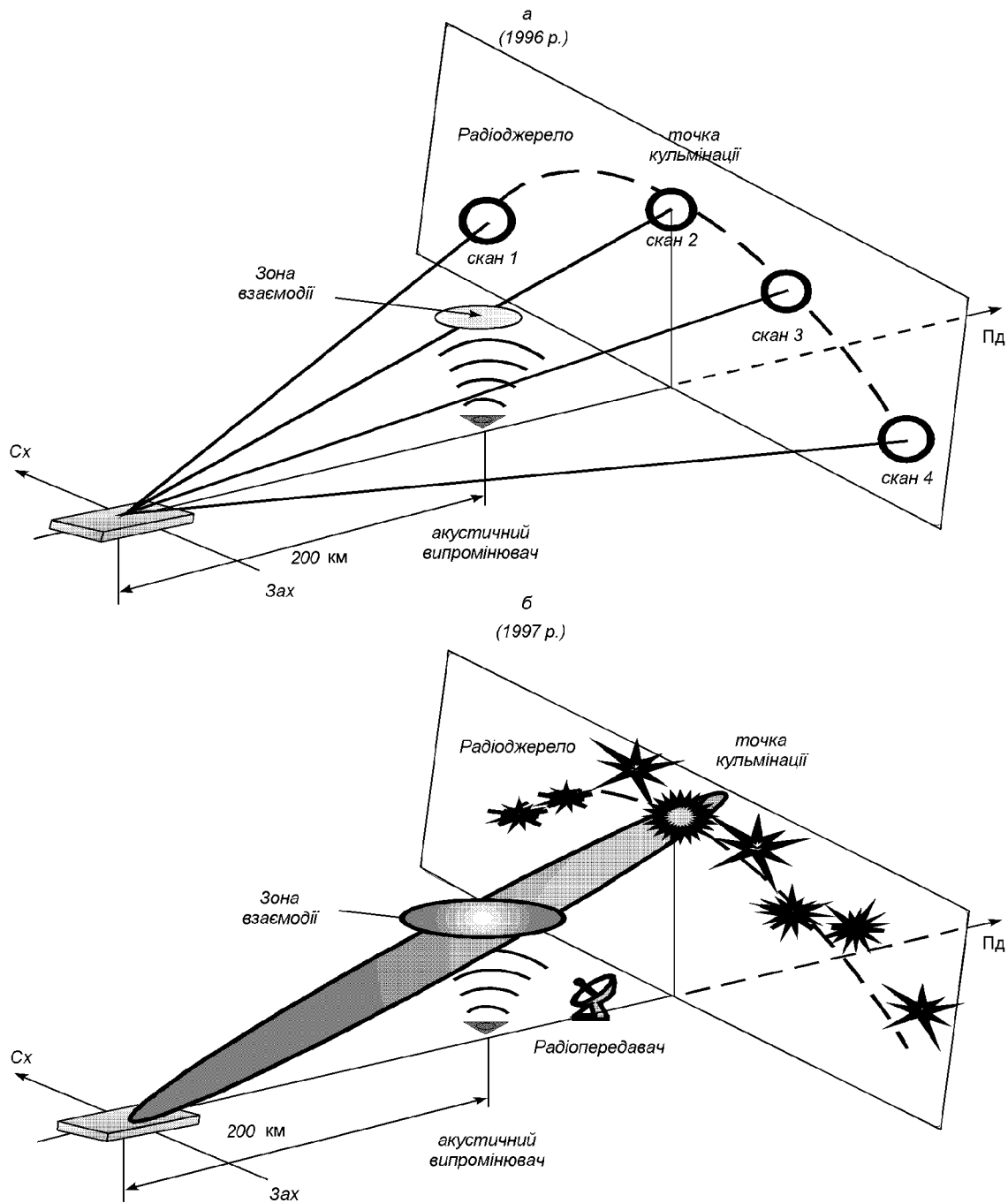


Рис. 3. Схеми проведення експериментів по виявленню акусто-іоносферних збурень методом на просвіт при зондуванні іоносфери сигналами реперних радіоастрономічних джерел

очікувані часи затримки. Результати спостережень реєструються по стандартній методиці радіоінтерферометричних спостережень в комп'ютері.

АЗ проводиться один раз на сеанс спостереження вибраного КРД трьома однохвилинними імпуль-

сами з однохвилинним інтервалом або одиночним однохвилинним імпульсом. Початок і кінець кожного АЗ визначаються часом проходження певного радіоджерела. Повторні експерименти проводяться в тому ж часовому режимі з урахуванням поправки

Таблиця 3. Параметри експериментів з виявлення акусто-іоносферних збурень за допомогою КБР УРАН-3 зондуючими сигналами 25 МГц реперного космічного радіоджерела на просвіт (методика № 1 — сканування джерела рухомих променем діаграми спрямованості радіотелескопа)

Джерело	Дата, 1996	Номер сеансу	Моменти сканування		Параметри акустичного збурення				Наявність ефекту
			Початок	Закінчення	Початок	τ , хв	T, с	n	
ЗС274 (5300 Ян, 51°, 277 км)	30.11	РА01	8 ^h 10 ^m	9 ^h 20 ^m	8 ^h 14 ^m	1	30	6	+
	01.12	РА02	8 ^h 00 ^m	9 ^h 10 ^m	8 ^h 09 ^m	1	30	4	+
	02.12	РА03	8 ^h 20 ^m	9 ^h 10 ^m					
	03.12	РА04	8 ^h 00 ^m	9 ^h 05 ^m	8 ^h 01 ^m	1	30	3	?
	07.12	РА05	7 ^h 45 ^m	8 ^h 50 ^m	7 ^h 42 ^m	1	90	4	?
	08.12	РА06	7 ^h 42 ^m	8 ^h 50 ^m					
	09.12	РА07	7 ^h 30 ^m	8 ^h 40 ^m	7 ^h 39 ^m	1	90	3	
ЗС348 (2300 Ян, 44°, 217 км)	30.11	РА08	12 ^h 30 ^m	13 ^h 40 ^m	12 ^h 34 ^m	1	30	4	
	01.12	РА09	12 ^h 20 ^m	13 ^h 30 ^m	12 ^h 29 ^m	1	30	4	+
	02.12	РА10	12 ^h 20 ^m	13 ^h 10 ^m					
	03.12	РА11	12 ^h 20 ^m	13 ^h 30 ^m	12 ^h 21 ^m	1	120	6	+?
	07.12	РА12	12 ^h 00 ^m	13 ^h 00 ^m	12 ^h 05 ^m	1	60	4	?
	08.12	РА13	12 ^h 00 ^m	13 ^h 10 ^m	12 ^h 02 ^m	1	60	4	+
	09.12	РА14	11 ^h 50 ^m	13 ^h 00 ^m	11 ^h 56 ^m	1	60	4	+

Таблиця 4. Основні характеристики космічних радіоджерел, які використовувалися як реперні в експериментах на просвіт іоносфери

Назва джерела	Потужність, Ян	Час кульмінації
ЗС10	900	11 ^h 55 ^m
ЗС84	1080	14 ^h 49 ^m
ЗС123	1080	16 ^h 06 ^m
ЗС134	600	16 ^h 34 ^m
ЗС144	3170	17 ^h 04 ^m
ЗС218	2150	20 ^h 47 ^m

зміщення часу кульмінації радіоджерела (мінус 4 хв кожної наступної доби).

Вихідні параметри експериментів.

Час проведення експерименту: квітень 1997 р.

Обладнання: Радіотелескоп УРАН-3 (м. Шацьк, Волинської обл.). Акустичний випромінювач (м. Львів).

Робоча частота спостережень радіоджерел: 25.230 МГц.

Кількість вимірювань: три сеанси по вісім 20-хв сканів в день.

Всього за цією методикою проведено 10 сеансів (табл. 5).

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

На рис. 5 представлені дві типові реалізації сигналів від КРД (експерименти №РА01 і РА07), зареєстрованих по методиці № 1, при дії АЗ.

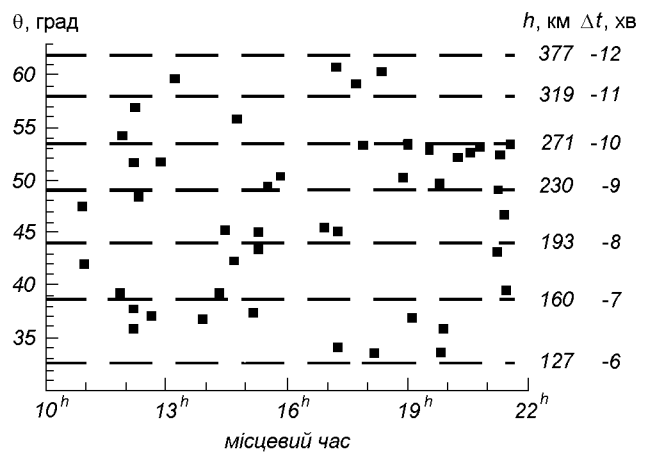


Рис. 4. Просторово-часове розміщення космічних радіоджерел в період проведення експериментів (березень, 1997 р.)

Записи: а — радіометричний канал РТ УРАН-3 (поляризація А), б — радіометричний канал РТ УРАН-3 (поляризація В), в — часова модель акустичного збудження. Зафіксовано декілька типів іоносферних збурень, які можна ідентифікувати як АІЗ, тобто як реакції іоносфери на АЗ, з різним часом затримок по відношенню до АЗ. Такого класу ІЗ при відсутності АЗ не були характерні для записів радіометричних (модуляційних) каналів. Аналіз експериментів, проведених по методиці № 1, виявив цілий ряд недоліків, які затруднюють статистичну обробку та інтерпретацію сигналів. Основний з них це те, що АЗ здійснювалось, коли КРД було в кульмінації над АВ. За час поширення

Таблиця 5. Параметри експериментів з виявлення акусто-іоносферних збурень за допомогою КБР УРАН-3 зондуючими сигналами 25 МГц реперного космічного радіоджерела на просвіт (методика № 2 — сканування джерела нерухомим променем діаграми спрямованості радіотелескопа)

Характеристика джерела (кут, висота)	Дата, 1997	Номер сеансу	Момент сканування		Параметри акустичного збурення					Наявність ефекту
			Початок	Закінчення	Початок	τ , хв	T, хв	n	погода	
38° 175 км	01.04	PA15	11 ^h 49 ^m	15 ^h 08 ^m	12 ^h 46 ^m	1	1	3	+8, 737, 57 %	+
44° 217 км	01.04	PA16	15 ^h 26 ^m	17 ^h 39 ^m	15 ^h 46 ^m	1		1	+10, 737, 56 %	+
32° 140 км	01.04	PA17	17 ^h 58 ^m	21 ^h 17 ^m	19 ^h 42 ^m	1	1	1	+13, 736, 60 %	+
38° 175 км	02.04	PA18	11 ^h 45 ^m	14 ^h 45 ^m	12 ^h 41 ^m	1	1	1	+13, 734, 57 %	+
44° 217 км	02.04	PA19	14 ^h 55 ^m	18 ^h 15 ^m					+16, 732, 46 %	
32° 140 км	02.04	PA20	18 ^h 23 ^m	21 ^h 14 ^m	19 ^h 02 ^m	1	1	1	+12, 731, 54 %	+
38° 175 км	03.04	PA21	12 ^h 01 ^m	14 ^h 41 ^m					+12, 730, 57 %	
44° 217 км	03.04	PA22	14 ^h 43 ^m	17 ^h 51 ^m	15 ^h 38 ^m	1	1	1	+15, 728, 50 %	?
32° 140 км	03.04	PA23	17 ^h 54 ^m	20 ^h 30 ^m	18 ^h 59 ^m	1	1	1	+11, 724, 67 %	+
38° 175 км	04.04	PA24	11 ^h 28 ^m	14 ^h 37 ^m	12 ^h 33 ^m	1	1	3	+4, 724, 67 %	?

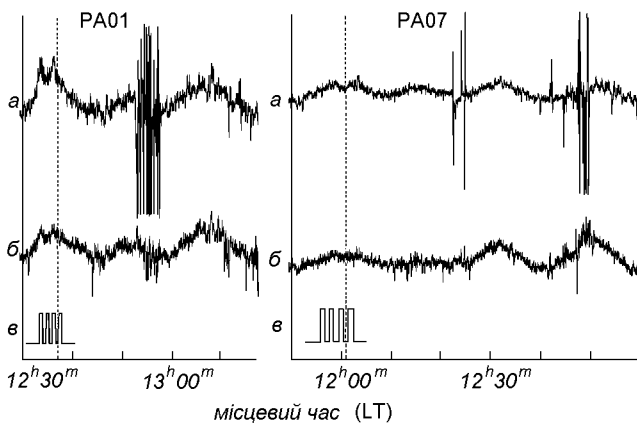


Рис. 5. Результат радіозондування іоносфери методом на просвіт згідно з методикою № 1 (експерименти № PA01 та № PA07 згідно з табл. 3): штрихова лінія — час кульмінації радіоджерела; 12^h57^m — перехід з ручного керування діаграмою спрямованості на автоматичне

АЗ на іоносферні висоти (5—10 хв) відбувалося перемикання ДС антени РТ на інший скан і фактично зондувалась не область АІЗ в іоносфері над АВ, а область іоносфери на відстані декілька сотень кілометрів на захід від АВ. Крім того, очікувана висота АЕВ над АВ завдяки високим кутам схилення КРД була достатньо великою (220—250 км).

Вказані недоліки методики № 1 були враховані в методиці № 2 (рис. 6 і 7). Основні умови і параметри експериментів приведені в табл. 3 і 5. На рисунках представлені:

— записи часових реалізацій сигналів інтерферометричного, поляризації В (записи а) та двох радіометричних, поляризації В і А, каналів (записи б і в);

— часові моделі АЗ біля АВ (записи в для PA15—PA18) із прив'язкою до відносного часу в годинах, який відраховується від моменту кульмінації КРД ЗС461 (Cas A) на меридіані РТ УРАН-3;

— записи б після логічної, типу «I—I», обробки реалізацій сигналів, зареєстрованих трьома каналами, в результаті якої інформаційним для прийняття рішення про наявність чи відсутності АІЗ вважався лише той запис, в якому сигнал— реакція виявлявся у всіх трьох реалізаціях;

— записи ВКФ сигналів КРД, які пройшли через збурену іоносферу, і часових моделей АЗ (на рис. 7, записи а, б, в відповідають відповідно записам на рис. 6).

В результаті такої обробки були виявлені ІЗ з різними часами затримки, які чітко корелюють із АЗ і які з високим ступенем достовірності можна ідентифікувати як АІЗ. Об'єктивними показниками того, що реєструвались саме АІЗ, можуть бути:

- поява реакції іоносфери на обох лінійних поляризаціях одночасно на інтерферометричних і на радіометричних каналах;
- поява першої реакції іоносфери через 5—6 хв після АЗ, що відповідає часу поширення акустичної хвилі на висоту приблизно 120 км;
- повторні появи реакції іоносфери (з відносно стійкими часовими затримками приблизно 10, 20, 40 хв);
- повторюваність параметрів реакції іоносфери в різні дні (наприклад, вранці 01.04.97 затримка дорівнює 40 хв, а вранці 02.04.97 — 41 хв);
- повторюваність реакції іоносфери для різних КРД;
- наявність чіткої кореляції між реакцією іоносфери та АЗ за результатами їхньої взаємнокореляційної обробки;

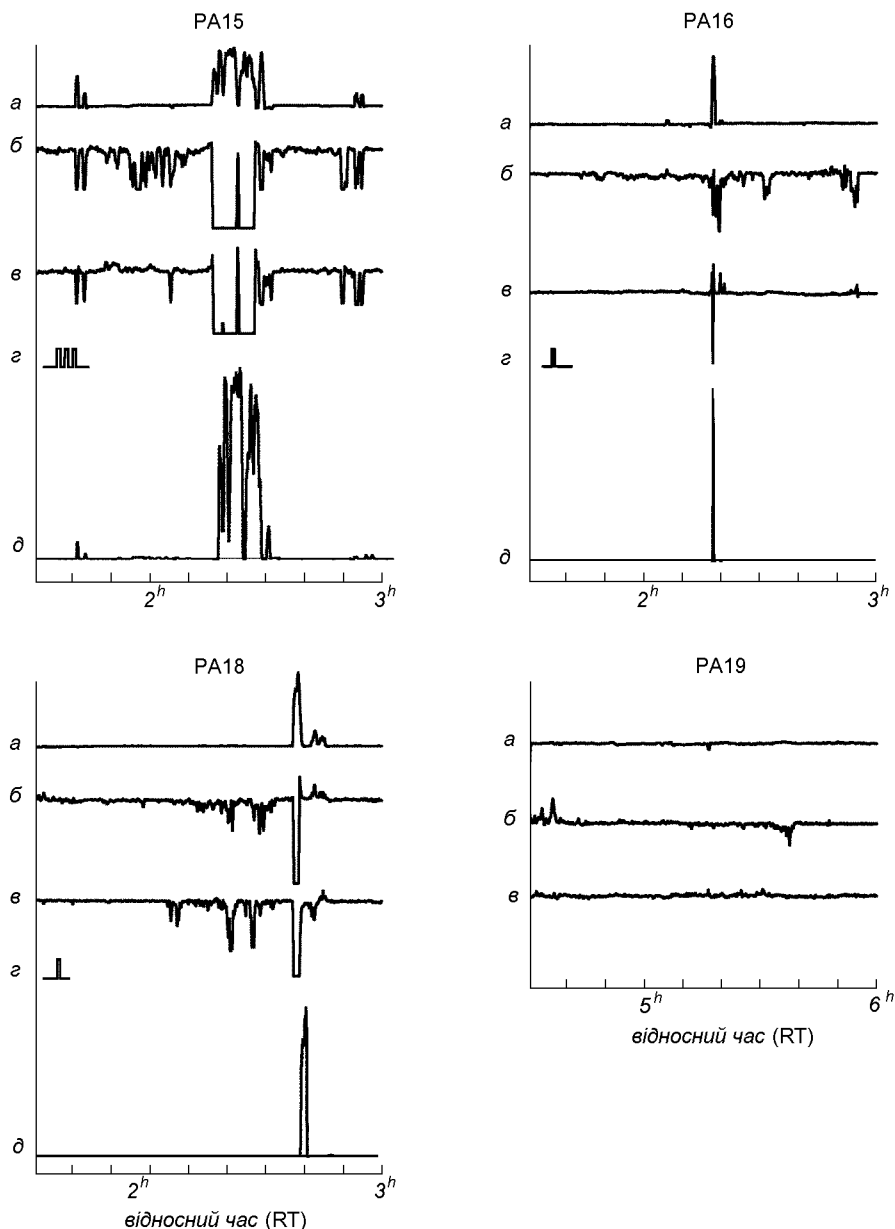


Рис. 6. Результат радіозондування іоносфери методом на просвіт згідно з методикою № 2 (експерименти № PA15, № PA16, № PA18, № PA19 згідно з табл. 5). Вимірювання проведені 01.04.97 р. Початок АЗ — $12^{\text{h}}45^{\text{m}}53^{\text{s}}$, кінець — $12^{\text{h}}50^{\text{m}}48^{\text{s}}$. Кут піднесення 39° . Висота 160 км. Вимірювання проведені 02.04.97 р. Початок АЗ — $12^{\text{h}}41^{\text{m}}57^{\text{s}}$, кінець — $12^{\text{h}}42^{\text{m}}41^{\text{s}}$. Кут піднесення 39° . Висота 160 км

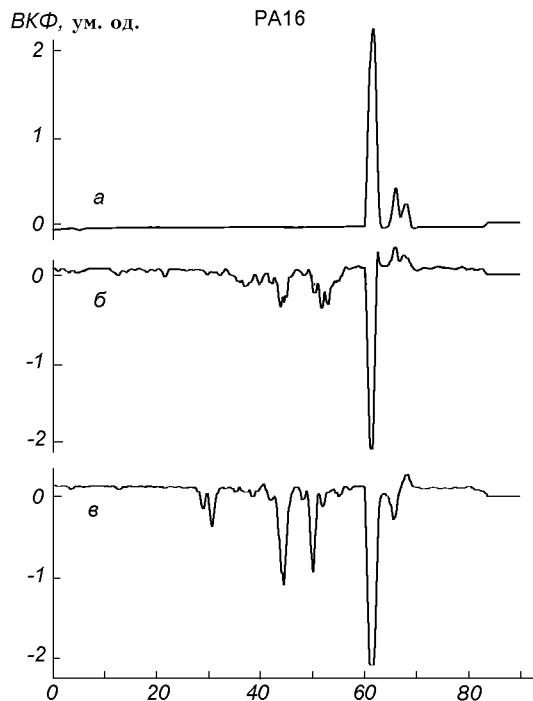
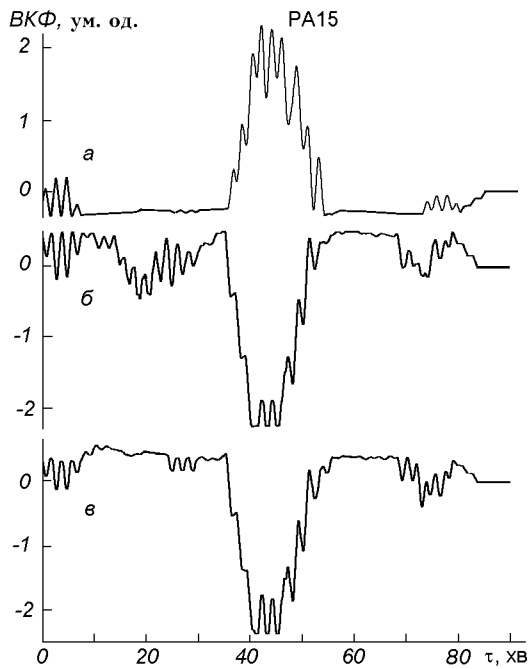
- відсутність якісної подібності записів сигналів КДР при наявності і відсутності АЗ (PA19);
- прояв реакції іоносфери не лише на наявність АЗ, а і на форму АЗ (PA15 і PA16).

Однією із об'єктивних характеристик процесу АЕВ є час затримки реакції іоносфери на АЗ. Результати сумарної обробки результатів всіх експериментів шляхом оцінки часу затримки представлені на рис. 8. На рис. 8, а представлено: по

абсцисі — час, по ординаті — номер експерименту. Від першого по десятій номер — експерименти (ранок, обід, вечір) 1—4.04.97 р. Від одинадцятого по двадцять третій — експерименти, проведені у 1996 р. В напрямках, паралельних осі абсцис, навпроти кожного номера експерименту квадратами показано час затримки зареєстрованих ІЗ відносно часу АЗ. Час затримки визначався від початку першого випромінювання до початку іоно-

сферного збурення.

На рис. 8, б представлена гістограма часового розподілу частоти виявлення реакції іоносфери відносно АЗ (зведено по всіх експериментах). Аналіз гістограми показує, що спостерігаються п'ять груп значень часу затримки τ . Вважаючи похибки вимі-



рювань незалежними і розподіленими за нормальним законом, побудовано довірчі інтервали центра розподілу a та середнього квадратичного відхилення σ часів затримок τ з надійністю P за формулами [9]:

$$\bar{X} - t(P; n - 1) \frac{S}{\sqrt{n}} < a < \bar{X} + t(P; n - 1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

де $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ — незміщена і слушна оцінка вибіркового середнього a , значення $t(P; n - 1)$ даються таблицею t -розподілу Ст'юдента для n степенів свободи, $S^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ — незміщена і слушна оцінка вибіркової дисперсії, та

$$S z_n < \sigma < S z_b, \quad (3)$$

де z_n та z_b — нижня і верхня границі відношення $\frac{\sigma}{S}$ (шукається з таблиць для довірчих границь середнього квадратичного відхилення).

Було розглянуто п'ять вибірок τ (хв):

- 5, 6, 6, 6;
- 17, 19, 20, 20, 20, 21, 21, 24, 24;
- 28, 28, 28, 30, 30, 30, 30, 31;
- 38, 39, 40, 40, 40, 40, 42, 42, 42, 43, 44, 44, 45, 45;
- 54, 55, 57, 58, 59, 60, 62, 65, 66.

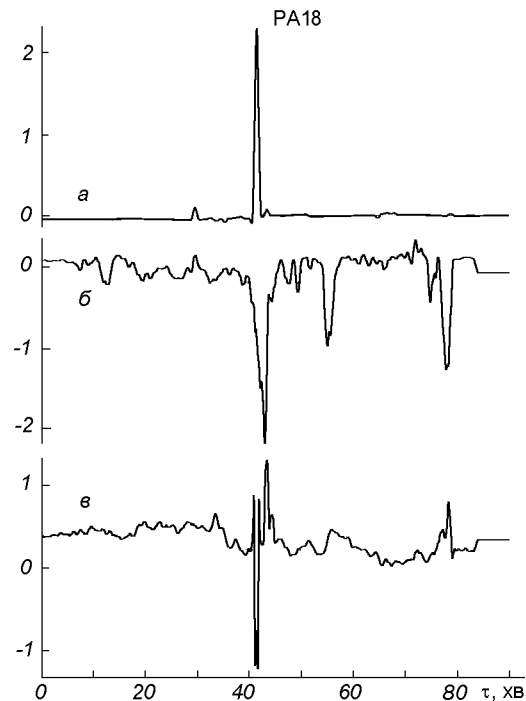


Рис. 7. Модуль ВКФ сигналів космічних радіоджерел при радіозондуванні іоносфери на просвіт і часової моделі акустичного збурення (експерименти № PA15, № PA16, № PA18 згідно з табл. 5)

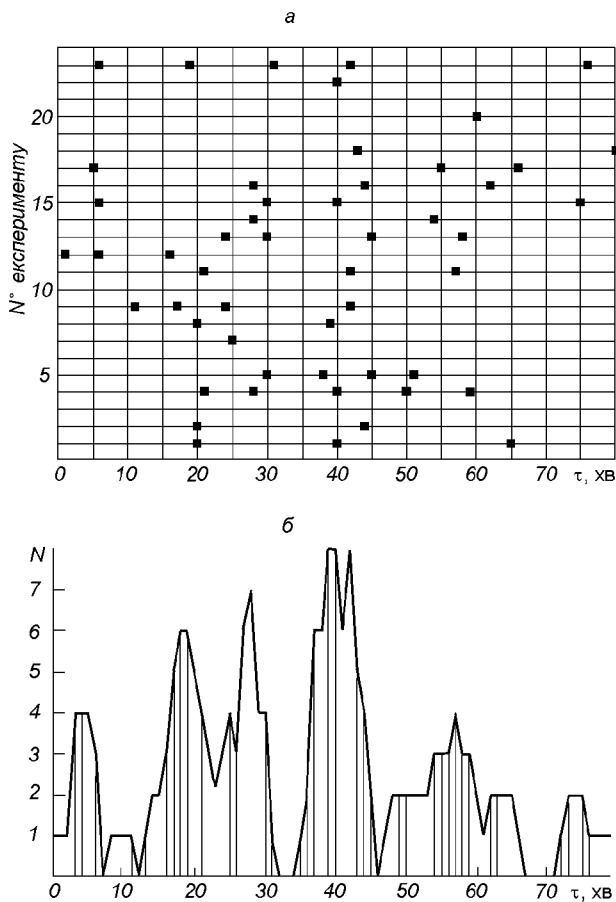


Рис. 8. Гістограма варіацій часу затримки виявлених іоносферних збурень в експериментах радіозондування іоносфери методом на провіт, спричинених наземним акустичним збудженням

Результати досліджень викладено в табл. 6.

Аналіз гістограми показує, що основні максимуми припадають на часові інтервали приблизно 6, 20, 30, 40 і 60 хв. Максимум збігів припадає на час

запізнення сигналу АЕВ приблизно 40 хв. Подальші максимуми мають згасаючий характер.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕВ МЕТОДОМ СЛАБОНАХИЛЕНОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

Методика № 3 (схема експерименту представлена на рис. 9). Експериментальні дослідження ефекту АІЗ методом слабонахилоного зондування іоносфери (СНЗ) по односкачкової трасі Миколаїв (Львівська обл.) — Шацьк (Волинська обл.) проводилися в березні 1997 р. на іоносферно-діагностичному комплексі УРАН-3, (рис. 2, б). Для зондування іоносфери використовувались радіосигнали Миколаївської короткохвильової радіостанції, яка розташована на південь від приймального пункту на відстані 225 км. Вона забезпечувала випромінювання АМ радіосигналу в діапазоні 4—25 МГц. Частота модуляції 1 кГц, випромінювання не направлене по куту схилення. АВ розташований у Львові на північ від передавального пункту на відстані 25 км.

Експериментально реєструвалися амплітуда замирань радіосигналу по двох поляризаціях і доплерівський спектр при фіксованих кутах приходу. Частота сигналів СНЗ вибиралася після попереднього дослідження радіо-іоносферного каналу зв'язку Миколаїв—Шацьк. Умови проведення і параметри експериментів приведені в табл. 7.

Сеанс експерименту в основному передбачав три цикли включення АЗ тривалістю 1—2 хв кожний. Основна робоча частота 5.179 МГц; азимут 179°; кут місця 62°; очікувана висота відбивання від іоносфери — 200 км.

Результати спостережень. Особливістю експериментальних записів є збільшення амплітуди і зміна характеру амплітудних флуктуацій сигналів НЗ, що почала проявлятися через 12—13 хв після

Таблиця 6. Довірчі інтервали центра розподілу a та середньо-квадратичних відхилень σ

Номер вибірки	\bar{x}	S	P, %	Довірчий інтервал для a	Довірчий інтервал для σ
1	5.75	0.5	95 99	4.831436—6.668564 4.063848—7.436152	0.283—1.865 0.2415—3.235
2	20.66	2.236	95 99	18.84361—22.48972 18.01431—23.31903	1.5093—4.29312 1.350544—5.45584
3	29.28572	1.25356	95 99	28.03342—30.53801 27.3886—31.18283	0.8073—2.7578 0.71328—3.7356
4	41.71429	2.26779	95 99	40.35571—43.07286 39.81983—43.60875	1.64415—3.651137 1.49674—4.3315
5	59.5555	4.15665	95 99	56.16666—62.94445 54.62505—64.48606	2.80574—7.98077 2.510619—10.142238

Таблиця 7. Умови проведення і параметри експериментів по виявленню АІЗ методом нахиленого зондування іоносфери

Код	Робочі параметри			Час запису			Параметри акустичного сигналу		
	$F_{\text{роб}}$	Азимут	Кут місця	$t_{\text{поч}}$	$t_{\text{зак}}$	Дата, 1997	τ , хв	T , хв	n
I-01	5.179	180.5	14; 25; 32	11 ^h 00 ^m	12 ^h 00 ^m	20.03	1	10	6
I-02	5.179	180.5	14; 25; 32	17 ^h 00 ^m	18 ^h 00 ^m	20.03	1	10	6
I-03	25.48	180.5	14; 25	11 ^h 00 ^m	12 ^h 00 ^m	21.03	1	10	6
I-04	5.179	180.5	62	17 ^h 00 ^m	18 ^h 00 ^m	21.03	1	10	6
I-05	5.179	180.5	77	11 ^h 00 ^m	13 ^h 00 ^m	24.03			
I-06	5.179	180.5	62	16 ^h 00 ^m	18 ^h 00 ^m	24.03	1	20	3
I-07	14.28	180.5	14	10 ^h 30 ^m	12 ^h 00 ^m	25.03	1	20	3
I-08	5.179	180.5	62	16 ^h 30 ^m	18 ^h 00 ^m	25.03	1; 1.8	20	2
I-09	5.179	179.0	62	10 ^h 30 ^m	12 ^h 00 ^m	26.03	1.7; 1; 1.7	20	3
I-10	5.179	179.0	62	16 ^h 40 ^m	18 ^h 40 ^m	26.03	1.7; 1.1; 1.9	20	3
I-11	5.179	179.0	62	10 ^h 10 ^m	12 ^h 00 ^m	27.03	1.8; 1.1; 1.5	20	3
I-12	5.179	179.0	62	16 ^h 30 ^m	18 ^h 30 ^m	27.03	1.7; 1; 1.8	20	3
I-13	5.179	179.2	54	10 ^h 00 ^m	12 ^h 00 ^m	28.03	1.8; 1; 1.8	20	3
I-14	5.179	180.6	44	10 ^h 30 ^m	12 ^h 00 ^m	29.03	11.9; 1; 1.8	20	3
I-15	5.179	179.5	32	16 ^h 45 ^m	18 ^h 30 ^m	29.03	1.8; 1; 1	20	3

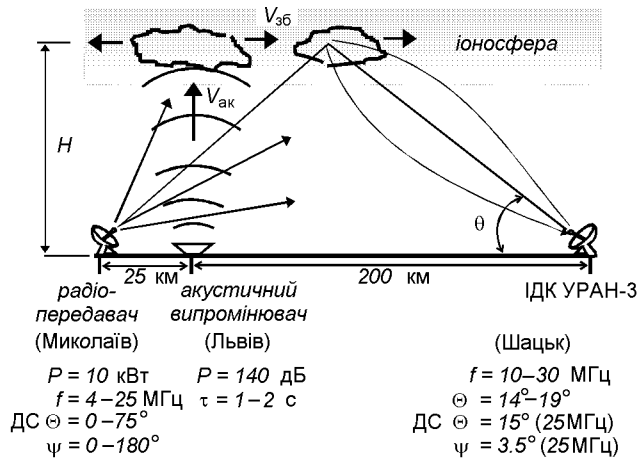
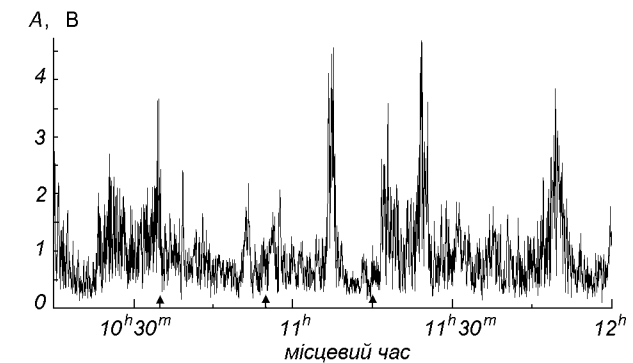


Рис. 9. Схема експерименту по нахиленому радіозондуванню іоносфери при акустичному збудженні

початку АЗ. Флуктуації ставали більш глибокими, з певною періодичністю, частота якої збільшувалась. Типова реалізація амплітуди завмирань представлена на рис. 10. Кількісні статистичні оцінки флуктуацій отримані шляхом статистичної обробки експериментальних даних. При цьому весь сеанс розбивався на однохвилинні інтервали. Частота збору даних 4 Гц.

На рис. 11 приведені часові залежності середнього значення амплітуди A , періоду T флуктуацій, відношення $A_{\text{мін}}/A_{\text{макс}}$ локальних максимумів сигналу і доплерівської частоти $F_{\text{д}}$ (по осі абсцис — місцевий час LT). Отримані характеристики показують, що в результаті акустичного збудження іоносфери при експериментах методом СНЗ спостерігається через деякий час:

Рис. 10. Типова реалізація амплітуди завмирань $A(t)$ поляризації B при нахиленому радіозондуванні іоносфери під час акустичного збудження (експеримент № 1—11 згідно з табл. 7; час АЗ показано вертикальними стрілками; 27.03.97; $\Theta = 62^\circ$; $\Psi = 180.5^\circ$; $h \approx 200$ км)

- збільшення середнього значення амплітуди;
- зменшення періоду флуктуацій амплітуди в 2—3 рази;
- короткочасне розщеплення доплерівського спектру сигналу.

В часовій залежності параметра $A_{\text{мін}}/A_{\text{макс}}$ локальних максимумів сигналу та інших особливостей не виявлено.

На рис. 12, а представлено часові залежності амплітуди і графіки автокореляційних функцій амплітуди однохвилинних реалізацій відбитого іоносферного сигналу до і після моменту АЗ (вертикальні стрілки), з яких видно, що АКФ амплітуди досліджуваного сигналу до АЗ плавно спадає, а після АЗ має коливний характер. Це якісно відповідає результатам [10] експериментальних до-

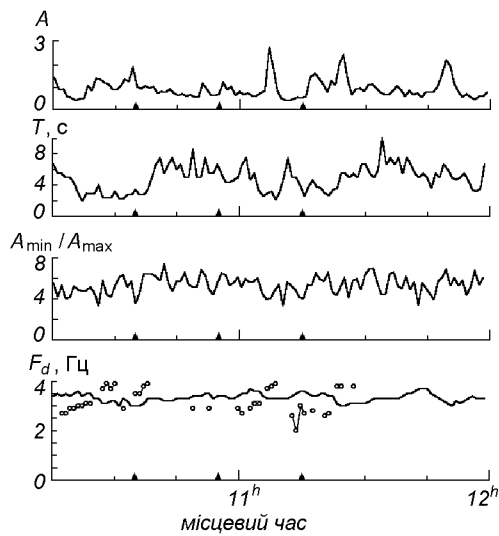


Рис. 11. Часові залежності інформаційних характеристик відбитих іоносферних сигналів, зареєстрованих методом СНЗ при наземному акустичному збудженні (експеримент № 1—11)

сліджень впливу на стан іоносфери потужного електромагнітного випромінювання дм-діапазону нагрівного стелю (рис. 12, б). Графіки ВКФ часової моделі АЗ (МАЗ) і середнього значення амплітуди завмирань A іоносферного сигналу (рис. 13, а) та ВКФ МАЗ і періоду флуктуацій T амплітуди сигналу (рис. 13, б) дозволяють визначити час затримки τ появи реакції іоносфери на АЗ. Вони підтверд-

жують періодичність появи реакції на АЗ в рамках одного експерименту. Порівняння значень часу затримок, визначених по ВКФ часової МАЗ із реалізаціями A і T , показує, що найімовірніші значення часів затримок реакції іоносфери складають: 3—4 хв; 11—14 хв; 23—24 хв; 32—33 хв; 37—40 хв; 50 хв; 57—59 хв; 72—76 хв.

Перша з одержаного ряду затримка 3—4 хв відповідає висотам приблизно 80 км. На цих висотах нижньої слабоіонізованої іоносфери у зв'язку з малою відстанню між радіостанцією і АВ можлива взаємодія безпосередньо радіохвиль короткохвильової передаючої станції із атмосферною акустичною хвилею на основі ефекту рефракції електромагнітної хвилі на акустичній просторовій решітці. Друга з одержаного ряду затримка $\tau = 11—14$ хв може мати кілька пояснень.

Модель створення і поширення АІЗ (рис. 9) постулює вертикальне поширення ААХ до висоти $h \approx 200$ км і поширення створеного АІЗ в іоносферному каналі. При цьому для часу затримки $\tau = 13$ хв (друге значення з одержаного ряду затримок) ймовірна швидкість поширення АІЗ в іоносферному каналі може бути розрахована по схемі:

- час вертикального поширення ААХ на висоту 200 км $\tau_a \approx 8.5$ хв;
- час поширення АІЗ в іоносферному каналі $\Delta\tau = \tau - \tau_a \approx 13 - 8.5 = 4.5$ хв;
- швидкість поширення АІЗ в іоносфері $v_{\text{аб}} = S/\Delta\tau \approx 300$ м/с, де S — половина відстані між радіостанцією і РТ УРАН-3 (рис. 9).

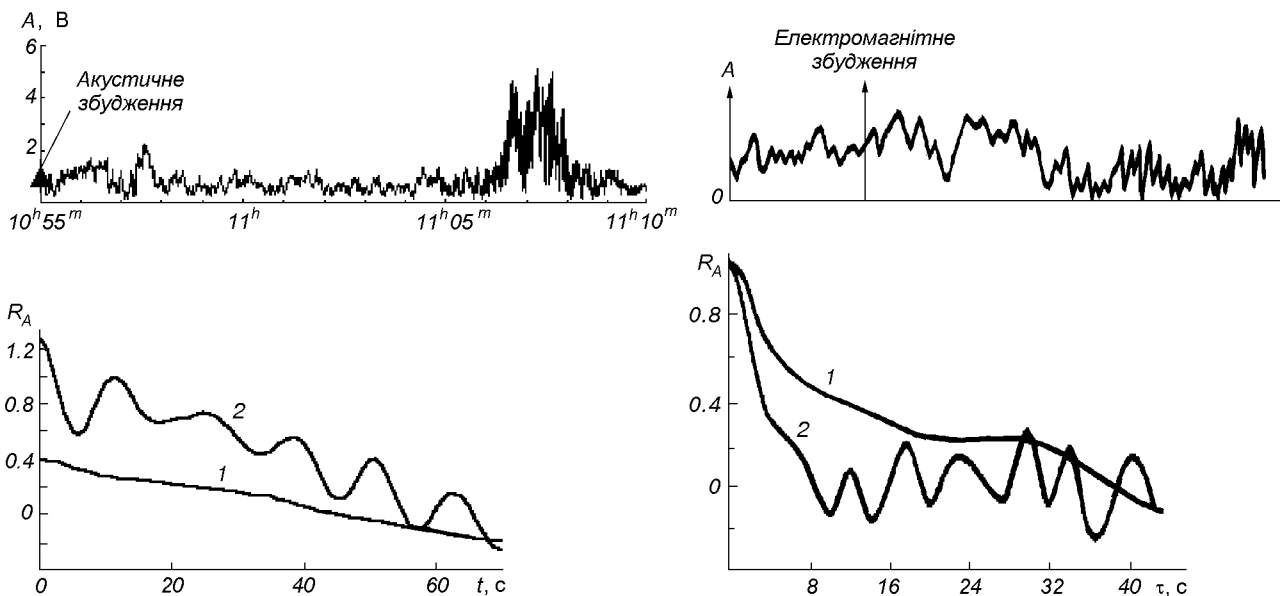


Рис. 12. Порівняння реакцій іоносфери на дії потужних електромагнітних (декаметрових) збурень нагрівним стелю (Солодовников, 1989) і акустичних збурень наземним керованим акустичним випромінювачем (експеримент № 1—11)

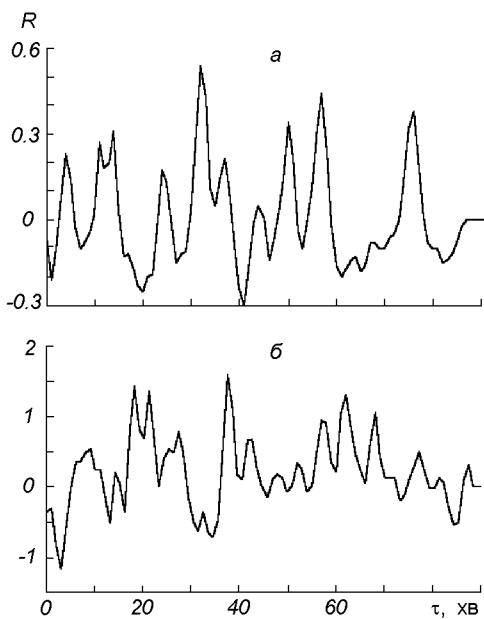


Рис. 13. ВКФ часової моделі акустичного збудження із часовими реалізаціями параметрів іоносферних сигналів при АЗ (*a* — для середнього значення амплітуди, *b* — для періоду флюктуацій)

З іншого боку, якщо низькочастотна ААХ ненаправлена, то вона може досягнути без значних втрат області дзеркального відбивання в іоносфері (рис. 9) через 11 хв, що теж наближено відповідає експериментально одержаному другому значенню затримки сигналу реакції іоносфери на наземне АЗ, яке лежить в межах $\tau = 11\text{--}14$ хв.

На даному етапі досліджень на базі лише поставлених експериментів важко однозначно визначити механізми утворення АІЗ і акусто-електромагнітної взаємодії при дії відносно слабкого наземного керованого акустичного випромінювача. Ця задача вимагає подальших детальних досліджень.

ВИСНОВКИ

Результати попередніх досліджень можливостей акустичного збудження іоносферної плазми керованим акустичним випромінюванням експериментально підтвердили:

— можливість збудження іоносфери низькоінтенсивною ААХ з енергією на поверхні Землі порядку $2 \cdot 10^6$ Дж за час 60 с;

— дієздатність конструкції експериментального акустичного випромінювача та можливість його застосування при створенні мобільного акустичного випромінювача для іоносферних досліджень;

— можливість використання високочутливих радіофізичних комплексів на базі радіотелескопа декаметрового діапазону УРАН-3, створених ФМІ НАНУ (м. Львів), і таких радіофізичних методів як просвічування іоносфери радіосигналами космічних радіоджерел і слабонахилене зондування сигналами короткохвильових радіостанцій, для виявлення з високою вірогідністю акусто-іоносферних збурень, спричинених відносно слабким наземним акустичним збудженням атмосфери;

— технічну можливість і доцільність створення в Західному регіоні України на базі радіофізичних комплексів РТ УРАН-3 і наземного керованого акустичного випромінювача регіонального комплексу дистанційного висотного акусто-електромагнітного зондування атмосфери до іоносферних висот в режимі цілодобового моніторингу, націленого на раннє виявлення високоенергетичних акусто-сейсмічних явищ в атмосфері та літосфері Землі шляхом виявлення та ідентифікації акусто-іоносферних збурень.

Автори висловлюють глибоку подяку співробітникам ФМІ НАНУ та ЛЦ ІКД НКАУ та НАНУ Альохіній Л. В., Досину Д. Г., Івантишину О. Л., Калиті Б. І., Каратаєвій Л. М., Левицькому О. Є., Лозинському А. Б., Маршалку Я. П., Романишину І. М., Романчеву Ю. В., Харченко Б. С. та іншим, які приймали активну участь в експериментах, в обробці та представленні результатів, а також д. ф.-м. н. Ямпольському Ю. М. (Радіоастрономічний інститут НАНУ) за плідну участь в обговоренні планів і результатів експериментальних досліджень.

1. Андрианов В. А., Кальцин В. А. Применение нелинейных эффектов при выборе акустической антенной системы для зондирования атмосферы // Радиотехника и электроника.—1981.—26, № 10.—С. 2209—2211.
2. Гармаш К. П. и др. Исследование реакции ионосферной плазмы на воздействие подземных, наземных воздушных взрывов и землетрясений // Физика космической плазмы. (6—10 июня 1993 г., Киев). — Киев, 1993.—С. 151—160.
3. Изв. АН СССР. Физ. Земли.—1985.—№ 11.—112 с.
4. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем // Космич. исследования.—1980.—Вып. 18.—С. 266—277.
5. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на ионосферные процессы. — Л.: Гидрометеоздат, 1990.—464 с.
6. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—304 с.
7. Нагорский П. М., Таращук Ю. Е. Ионосферные возмущения, вызываемые мощными взрывами // Изв. вузов. Физика.—1992.—№ 9.—С. 110—119.
8. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Кажущиеся скорости распространения возмущения в околоземном космосе // Космич. наука и техн.—1990.—Вып. 5.—С. 71—74.

9. Румшинский Л. З. Элементы теории вероятностей. — М.: Наука, 1976.—240 с.
10. Солодовников Т. К., Новожилов В. И., Фаткулин М. Н. Распространение радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосфере. — М.: Наука, 1989.—200 с.
11. Тарашук Ю. Е. и др. Нестационарные процессы в ионосфере Земли и их влияние на распространение коротких радиоволн. — Томск: Изд.-во ТГУ, 1986.—164 с.
12. Черногор Л. Ф. Глобальные эффекты при локальном энерговыделении в геосфере // Нетрадиционные научные идеи о природе и ее явлениях: Сб. докл. Всес. конф. ФЕНИД-90. — Гомель, 1990.—Т. 2.—С. 221—229.
13. Hardreaves J. K. The solar-terrestrial environment. — Cambridge: Univ. press, 1992.—420 p.
14. Megn A. V., Braude S. Ya., Rashkovsky S. L., et al. VLBI network URAN and interferometric studies in the decameter waveband // J. of Physics.—1994.—P. 813—818.
15. Uyeda K., Maeda H., Kimpara A. et al. Geophysical effects associated with high-altitude nuclear explosions // J. Geomagn. Geol.—1959.—N 1.—P.39—45.

**ACOUSTIC DISTURBANCE OF IONOSPHERIC PLASMA
BY A GROUND-BASED RADIATOR**

V. V. Koshovyi and S. O. Soroka

We present the first results of experimental testing of the possibilities of acoustic disturbance of the ionosphere by a controllable ground-based low-power radiator. Detection of ionospheric perturbations of this kind by radiophysical complexes based on the decameter radiotelescope URAN-3 is discussed.